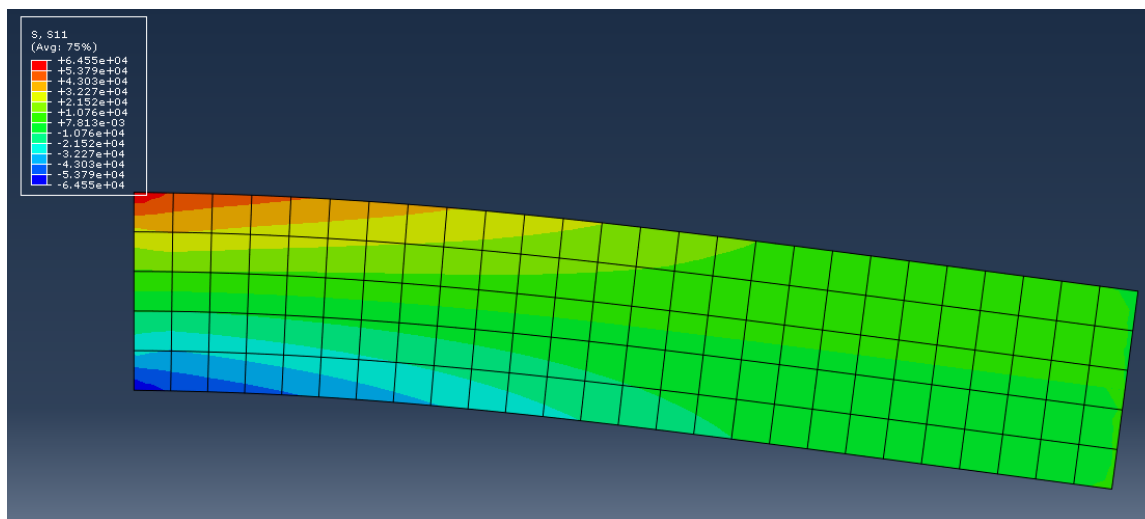


Prácticas Métodos Computacionales en Ingeniería Civil

Tema 1. Introducción a los Elementos Finitos.

Sergio Blanco, Ángel Yagüe, Diego Manzanal



Introducción

Los objetivos de esta práctica son los siguientes:

1. Introducir los conceptos prácticos asociados al análisis numérico por elementos finitos.
2. Introducir el uso del programa de elementos finitos Abaqus (versión *Interactive*) mediante la simulación de un problema lineal.

La práctica consta de dos secciones:

Sección 1. Descripción del procedimiento de análisis por elementos finitos de un problema mecánico lineal con el programa. Abaqus.

Sección 2. Ejercicios propuestos a resolver por el alumno.

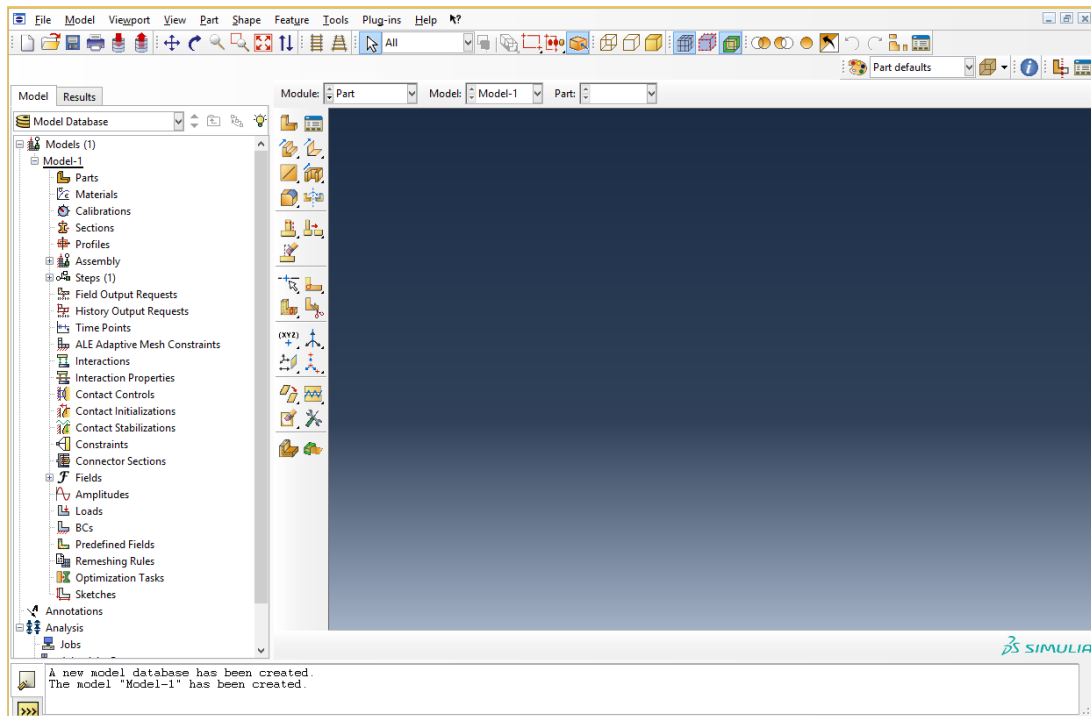


Figura 1: Interfaz gráfica Abaqus/CAE

1. Introducción al análisis numérico con Abaqus

1.1. Motivación

Introducción al programa Abaqus. Abaqus es un programa (o un conjunto de programas) para realizar análisis por elementos finitos en el que hay dos formas de trabajar:

1. **Interactive:** Usando la interfaz gráfica de usuario Abaqus/CAE (Fig. 1).
 - No es necesario aprender la sintaxis del fichero de entrada del programa.
 - Más costoso cambiar un parámetro y realizar de nuevo el análisis.
2. **Keywords:** Se construye un fichero de entrada `.inp` tipo texto plano con los comandos necesarios para realizar el análisis (Fig. 2).
 - Hay que saberse la sintaxis del fichero de entrada del programa.
 - Es muy fácil modificar algo y realizar un nuevo análisis
 - Aunque trabajemos en modo *interactive*, al final Abaqus siempre genera un fichero de texto plano.

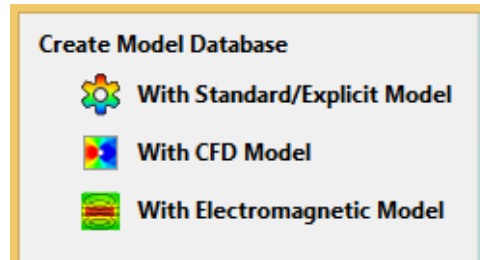


Figura 3: Inicio programa Abaqus

```

*HEADING
Two-dimensional overhead hoist frame
SI units (kg, m, s, N)
1-axis horizontal, 2-axis vertical
*PREPRINT, ECHO=YES, MODEL=YES, HISTORY=YES
**
** Model definition
**
*NODE, NSET=NALL
101, 0., 0., 0.
102, 1., 0., 0.
103, 2., 0., 0.
104, 0.5, 0.866, 0.
105, 1.5, 0.866, 0.
*ELEMENT, TYPE=T2D2, ELSET=FRAME
11, 101, 102
12, 102, 103
13, 101, 104
14, 102, 104
15, 102, 105
16, 103, 105
17, 104, 105
*SOLID SECTION, ELSET=FRAME, MATERIAL=STEEL
** diameter = 5mm --> area = 1.963E-5 m^2
1.963E-5,

**
** History data
**
*STEP, PERTURBATION
10kN central load
*STATIC
*BOUNDARY
101, ENCASTRE
103, 2
*CLOAD
102, 2, -10.E3
*NODE PRINT
U,
RF,
*EL PRINT
S,
*****
** OUTPUT FOR ABAQUS QA PURPOSES
*****
*EL FILE
S,
*NODE FILE
U, RF
*END STEP

```

Figura 2: Ejemplo fichero .inp

Nosotros vamos a trabajar en modo *interactive*. Para arrancar el programa de pre-proceso gráfico Abaqus/CAE debemos escribir **abaqus cae** en la consola de comandos o pulsar el enlace directo. Una vez arrancado, de las opciones que nos da elegiremos **Create Model Database with Standard/Explicit Model** tal como indica la Fig. 3)

Nos aparece el entorno de trabajo de Abaqus/CAE donde podemos identificar las siguientes secciones (Fig. 4):

- **Viewport:** Parte principal de la pantalla de Abaqus/CAE donde visualizamos el pre y postproceso de nuestro análisis.
- **Model Tree View:** Todos los pasos que seguimos en nuestro modelo se representan en esta sección en forma de nodos del árbol. Cada nodo se subdivide en varios subnodos con sus funcionalidades correspondientes. Si el *Model Tree* no está visible, hazlo visible pulsando **View/Show Model Tree** o pulsando CTRL+T.
- **Toolbar Section:** A cada nodo del *Model Tree* le corresponde una barra de herramientas donde el usuario puede acceder a los comandos asociados. Podemos acceder a estos comandos también mediante los menús desplegables de la barra superior (aunque en este tutorial usaremos los iconos gráficos de la barra de herramientas).

- *Prompt region*: Cuando seleccionamos un cierto comando, en la región *Prompt* aparece información sobre la siguiente acción a realizar.

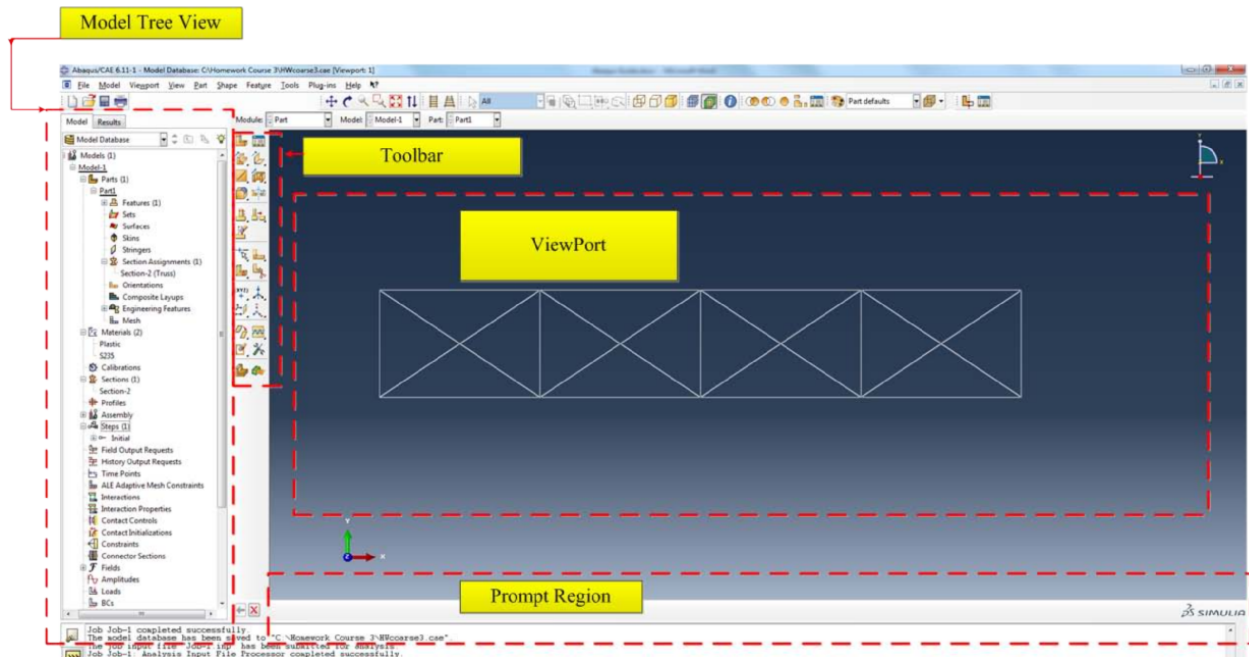


Figura 4: Descripción espacio de trabajo Abaqus CAE

Fases del análisis Para realizar un análisis de elementos finitos debemos realizar una serie de pasos. Abaqus ha agrupado estos pasos en **Módulos** secuenciales. A continuación se resumen las funcionalidades asociadas a cada módulo¹:

Módulo Part. Crear la geometría de los elementos. (*Parts*)

1. Bosquejar los elementos de la geometría del dominio
2. Crear *Parts* con los elementos de la geometría del dominio

Módulo Property. Definir materiales y secciones.

1. Definir las propiedades de los materiales
2. Definir las secciones (que asociamos a los materiales)
3. Asignar las secciones a las *Parts* correspondientes.

Módulo Assembly. Ensamblar el modelo creando copias (instancias) de las *Parts*.

Módulo Step. Configurar el procedimiento de análisis.

1. Definir los pasos de cálculo
2. Definir el tipo de análisis en cada paso de cálculo (térmico, mecánico, estacionario, transitorio, ...)

¹Los módulos con asterisco * no los vamos a usar en este curso

3. Definir las variables que el programa debe guardar para visualizar en el post-proceso
4. Definir los parámetros de los algoritmos numéricos utilizados en cada paso de cálculo.

Módulo Iteration*. Crear restricciones entre elementos de nuestra geometría.

Módulo Load. Aplicar las condiciones de contorno en cada paso de tiempo.

Módulo Mesh. Crear la malla.

Módulo Optimization*. Utilizar el análisis por elementos finitos para optimizar una propiedad de nuestro modelo.

Módulo Job. Crear el trabajo y lanzar el análisis numérico.

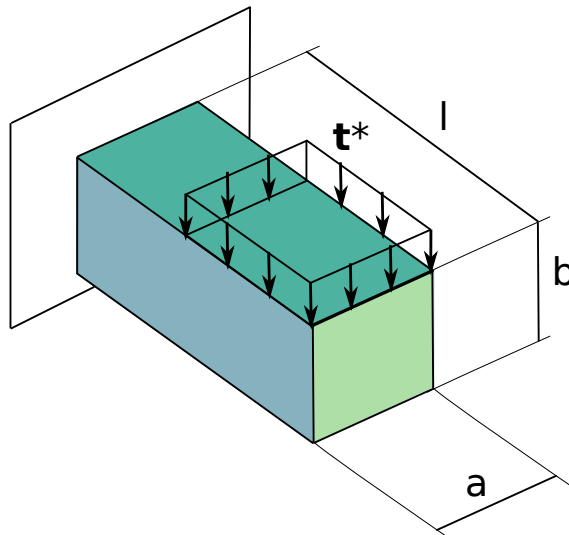
Módulo Visualization. Realizar el post-proceso.

Descripción del problema a resolver. Una de las primeras cosas que debemos hacer antes de definir el modelo numérico es decidir qué sistema de unidades vamos a usar. Abaqus no tiene un sistema predefinido, simplemente debemos trabajar en un sistema de unidades consistente. En la Fig. 5 se muestran cuatro sistemas de unidades consistentes:

Quantity	SI	SI (mm)	US Unit (ft)	US Unit (inch)
Length	m	mm	ft	in
Force	N	N	lbf	lbf
Mass	kg	tonne (10^3 kg)	slug	lbf s ² /in
Time	s	s	s	s
Stress	Pa (N/m ²)	MPa (N/mm ²)	lbf/ft ²	psi (lbf/in ²)
Energy	J	mJ (10^{-3} J)	ft lbf	in lbf
Density	kg/m ³	tonne/mm ³	slug/ft ³	lbf s ² /in ⁴

Figura 5: Unidades consistentes

El problema que queremos resolver está resumido en la Fig. 6. Se trata de una ménsula empotrada en su extremo izquierdo que tiene aplicada un vector tensión $\mathbf{t}^* = [0, -1000, 0]^T$ Pa en la mitad derecha de su cara superior. Las medidas de la ménsula son 5 metros de largo y una sección cuadrada de 1 metro de lado. El material es hormigón con constantes elásticas $E = 27$ GPa y $\nu = 0,3$. Como puedes comprobar, nuestro problema puede ser reducido a un problema plano en tensión plana.



Parámetros geométricos:

$$a = 1 \text{ m.}$$

$$b = 1 \text{ m.}$$

$$l = 5 \text{ m.}$$

Parámetros materiales:

$$E = 27 \text{ GPa}$$

$$\nu = 0.3$$

Vector Tensión aplicado:

$$t^* = [0, -1000, 0] \text{ Pa}$$

Figura 6: Descripción del modelo

Inicio del análisis con Abaqus. Antes de empezar a trabajar hagamos tres cosas:

1. Definir un directorio de trabajo en **File/Set Working Directory** donde se guardarán todos los archivos que generemos.
2. Ver la ayuda de Abaqus:
 - Si vas a **Help/On Context** obtendremos ayuda sobre aquel icono que pulsemos después.
 - Si vas a **Help/On Module** obtendremos ayuda sobre el módulo en el que estés en ese momento.
 - Si vas a **Help/Search and Browse Guide** iremos a la página principal de la ayuda de Abaqus.
3. Asignemos un nombre a nuestro modelo. Situamos el cursor encima del modelo en la parte superior del *Model Tree*, pulsamos el botón derecho del ratón, seleccionamos **Rename** y le asignamos el nombre *Mensula*. Tiene que quedarte como indica la Fig. 7.

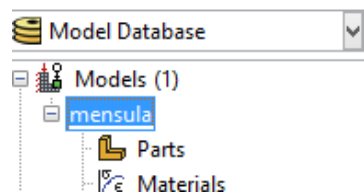


Figura 7: Cambio nombre del modelo

A continuación vamos a describir todas las fases del análisis con la ayuda del ejemplo descrito.

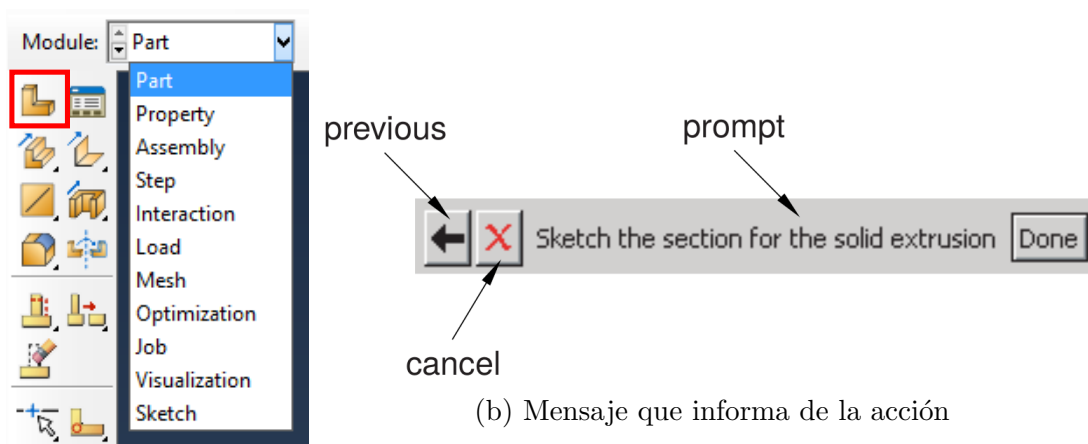
1.2. Módulo Part. Crear la geometría de los elementos.

En Abaqus debemos tener definida la geometría de los elementos que forman nuestro modelo. Estos elementos se denominan *parts* y nos permitirán ensamblar luego un modelo creando una o varias copias (instancias) de cada *part*, en caso de que haya elementos repetidos.

Para definir la geometría de los elementos de nuestro modelo:

1. Activamos primero el módulo **Part** y pulsamos el comando **Create Part** (Fig. 8a).

En la esquina inferior izquierda Abaqus muestra un mensaje (Prompt) que nos indica qué tenemos que hacer. Pulsaremos el botón **Cancel** para cancelar la tarea que estamos haciendo, el botón **Previous** para cancelar el paso que estemos haciendo dentro de una tarea y volver al paso previo y el botón **Done** para acabar la tarea (ver Fig. 8b).



(a) Comando **Create Part**

(b) Mensaje que informa de la acción

Figura 8: Inicio módulo part y mensaje *Prompt* de información

Nos aparece el diálogo **Create Part** donde nos pregunta si va a ser un dominio tridimensional, plano o axisimétrico (**Modeling Space**), si va a ser un objeto deformable o rígido (**type**) y qué tipo de geometría es (**Base Feature**). Para nuestro problema elegiremos las opciones que indica la Fig. 9. Para la variable **Aproximante size** hemos puesto un valor de 10 (metros en nuestro sistema de unidades asumido), que es el doble de la dimensión máxima de nuestro dominio y que Abaqus usará para proporcionarnos un entorno de trabajo donde crear la geometría.

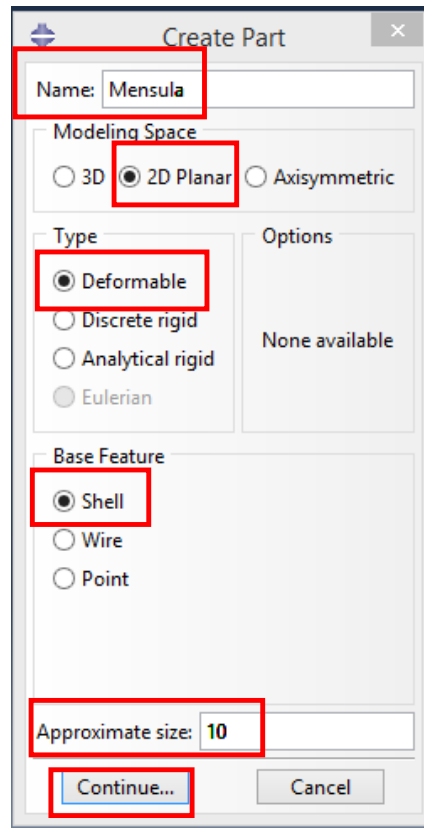


Figura 9: Diálogo **Create Part**

2. A continuación nos aparece una pantalla de un entorno de trabajo (*Sketcher*) con las herramientas CAD necesarias para crear la geometría de nuestra *part*. Respecto al sketcher debemos saber:

- Puedes utilizar los puntos de la ventana de trabajo (pulsando con el ratón) para definir entidades geométricas.
- Las líneas punteadas son los ejes X e Y y se interseccionan en el origen.
- La orientación del plano de trabajo se define con los ejes de abajo a la izquierda.
- Cuando activas una herramienta de dibujo, las coordenadas se dibuja en la parte superior izquierda.

Hay dos caminos para definir dicha geometría: (a) definir de forma precisa las entidades geométricas y (b) definir las rápidamente con el uso de la rejilla y luego aplicar restricciones para conseguir la geometría buscada. Vamos a trabajar de la segunda manera:

- a) Pulsa el botón **Create lines: Rectangle** y dibuja un rectángulo sin preocuparte por las dimensiones (ver Fig. 10).

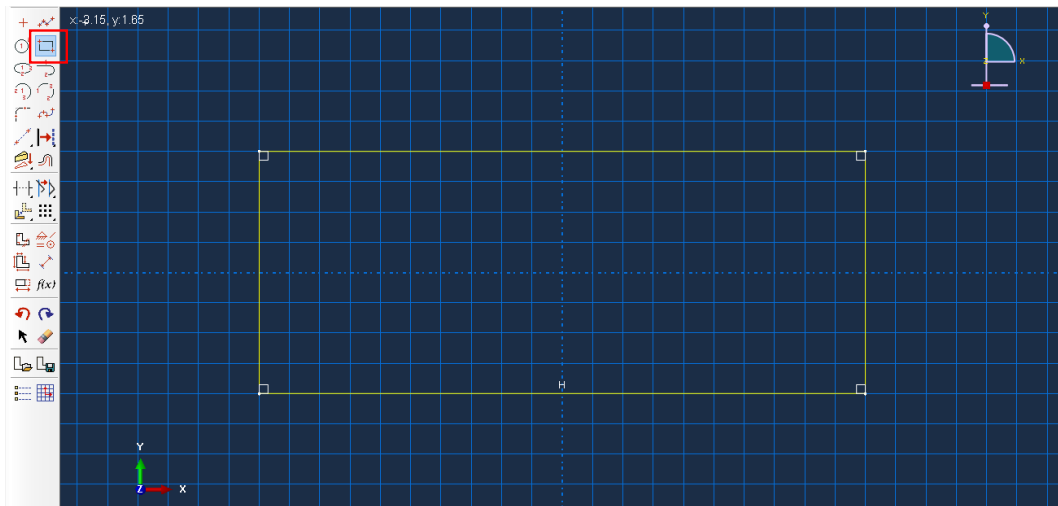


Figura 10: Rectángulo inicial

- b) Pulsa el comando **Add dimension**, selecciona uno de los lados horizontales y modifica la dimensión a 5 metros (ver Fig. 11).

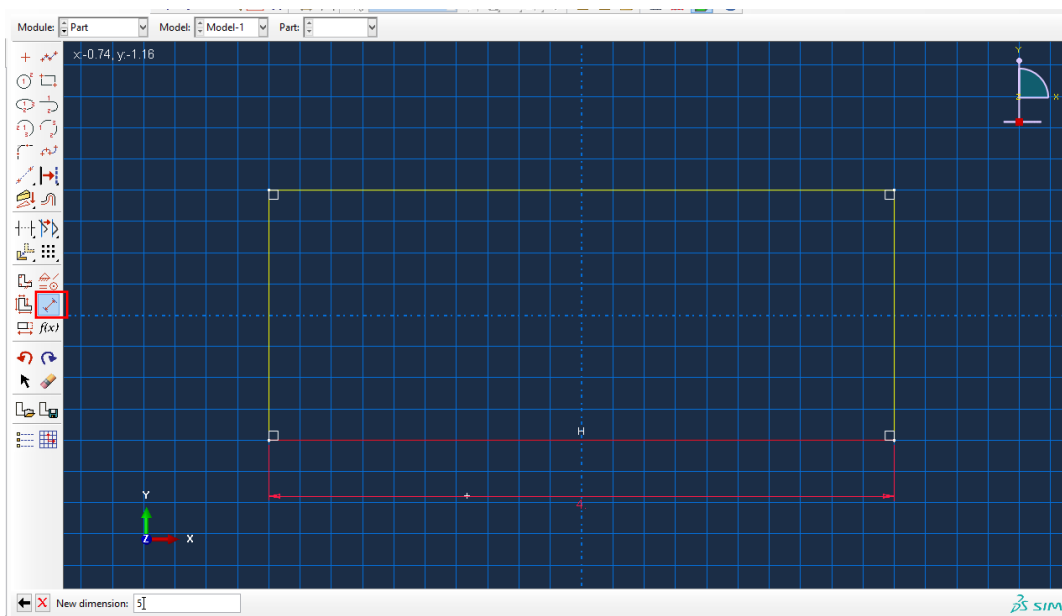


Figura 11: Modificación de una dimensión

- c) Como en el apartado anterior modifica la dimensión vertical a 1 metros. Una vez hecho, pulsa **Auto Fit view** para centrar la imagen (debe quedarte como la Fig. 12).

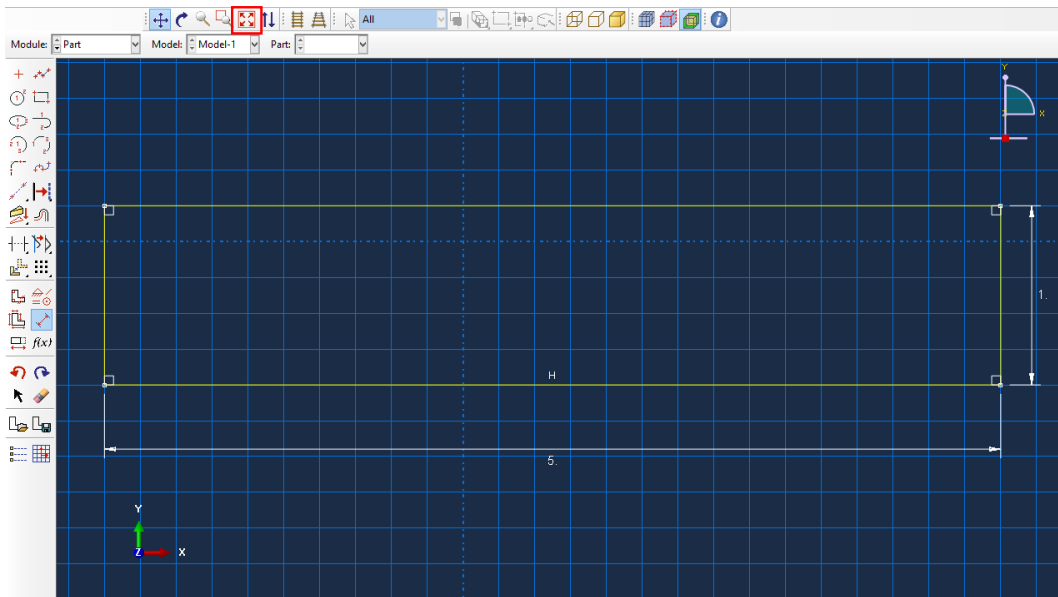


Figura 12: Rectángulo final

- d) Finalmente, pulsa cancel para abandonar la herramienta **Sketcher** y pulsa **Done** para generar la *part* que buscábamos (ver Fig. 13).

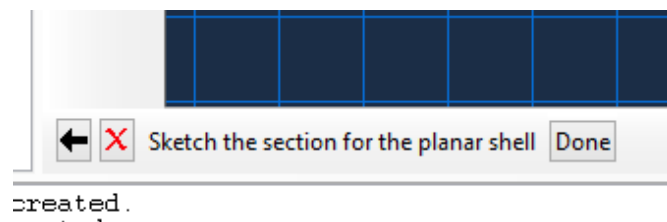
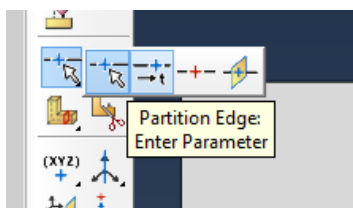


Figura 13: Orden final para crear el objeto *Part*

3. Si nos fijamos en las cargas repartidas de nuestro modelo, debemos dividir el borde superior en dos mitades para poder asignar las cargas sólo en la mitad tal como indica la Fig. 6. Para poder hacerlo sigue los siguientes pasos:

- a) De los iconos asociados a la modificación de una *part*, pulsa **Partition Edge: Enter Parameter** tal como indica la Fig. 14a. Posteriormente selecciona el borde superior de la ménsula (Fig. 14b).



(a) Activación **Partition Edge**



(b) Selección borde superior

Figura 14: División de borde superior

- b) A continuación nos pide un parámetro entre 0 y 1 para indicar el punto de corte según la dirección del vector que se ve en la pantalla. Como queremos dividir por la mitad, indica 0.5 tal como indica la Fig. 15

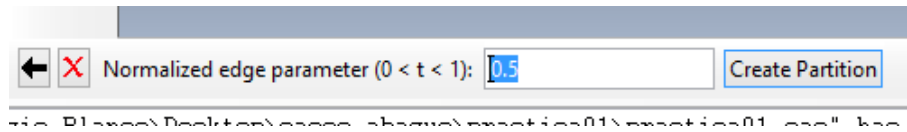


Figura 15: Introducción parámetro de división

Una vez creada la *Part*, guarda el modelo con la orden **Save model database**.

1.3. Módulo Property. Definir materiales y secciones.

En este módulo debemos definir los materiales, las secciones y asignar esta información a la *part* que hemos creado en el apartado anterior.

1. **Definir el material.** Seleccionamos el módulo **Property** y pulsamos el icono **Create Material** (ver Fig. 16a). En la ventana que nos aparece para definir el material le damos un nombre, incluimos una breve descripción y le asignamos el comportamiento constitutivo mecánico **Elástico** tal como resume la Fig. 16b. Finalmente asigna las propiedades mecánicas de un hormigón estándar ($E = 27 \text{ GPa}$, $\nu = 0,3$) como indica la Fig. 16c.

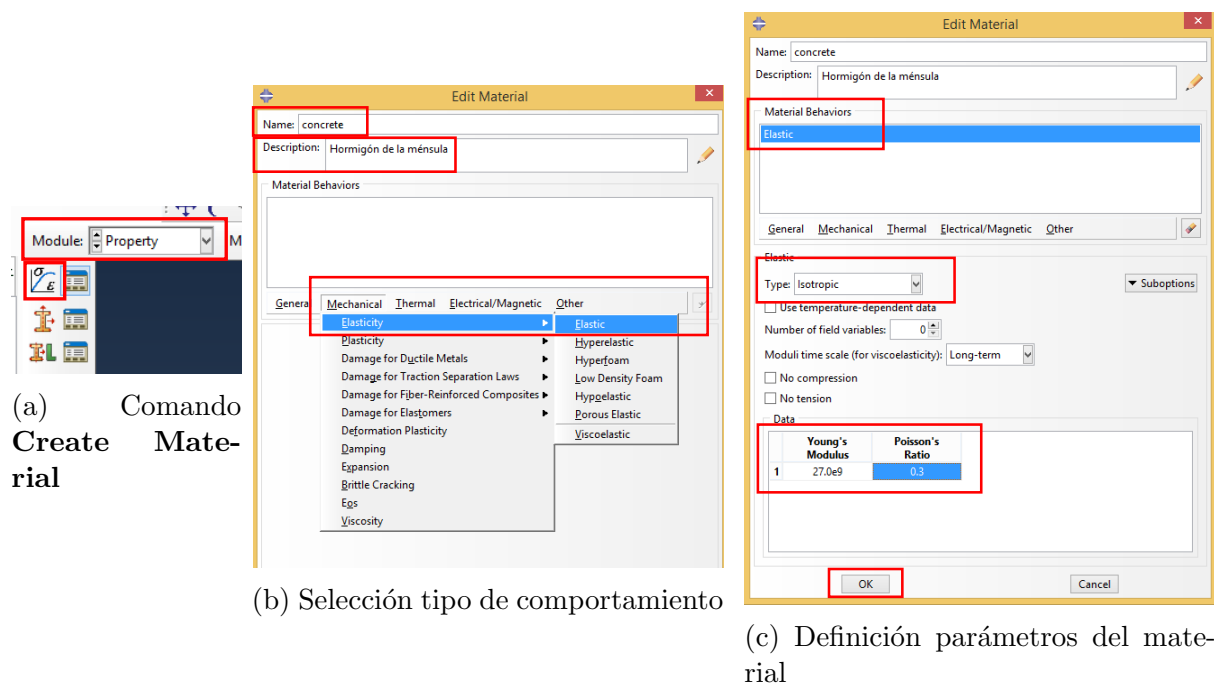


Figura 16: Definición del material *concrete*

2. **Definir la sección.** Aún dentro del módulo **Property** pulsamos el icono **Create Section** (ver Fig. 17a). En la siguiente ventana (Fig. 17b) asignémosle el nombre *SeccionMensula*, la categoría de elemento finito **Solid** y el tipo **Homogeneous**. Finalmente asociemos esta sección con el material *concrete* tal como indica la Fig. 17c (observa que el espesor por defecto de la pieza es 1 metro, que coincide con nuestra dimensión).

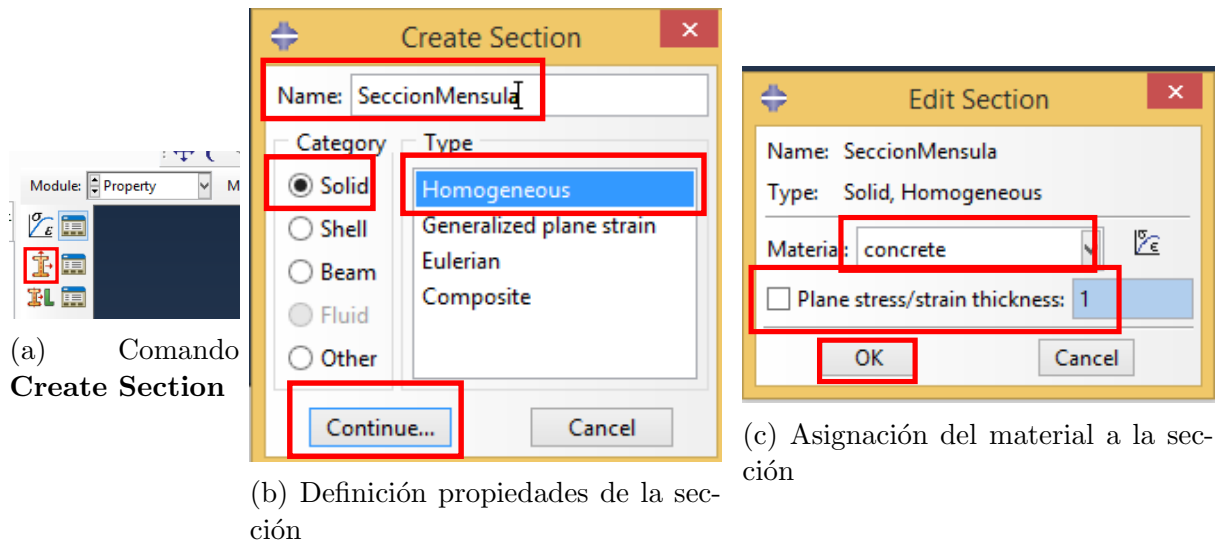


Figura 17: Definición de la sección *SeccionMensula*

3. **Asignar la sección a una part.** Finalmente, en este módulo debemos asignar la anterior sección a la *part* creada. Para ello pulsamos el icono **Assign Section** (ver Fig. 18a y seleccionamos la región a la que queremos asignar la sección (la ménsula). Le decimos que le queremos asignar la sección *SeccionMénsula* (ver Fig. 18b) y nuestra *part* deberá haber cambiado de color tal como indica la Fig. 18c

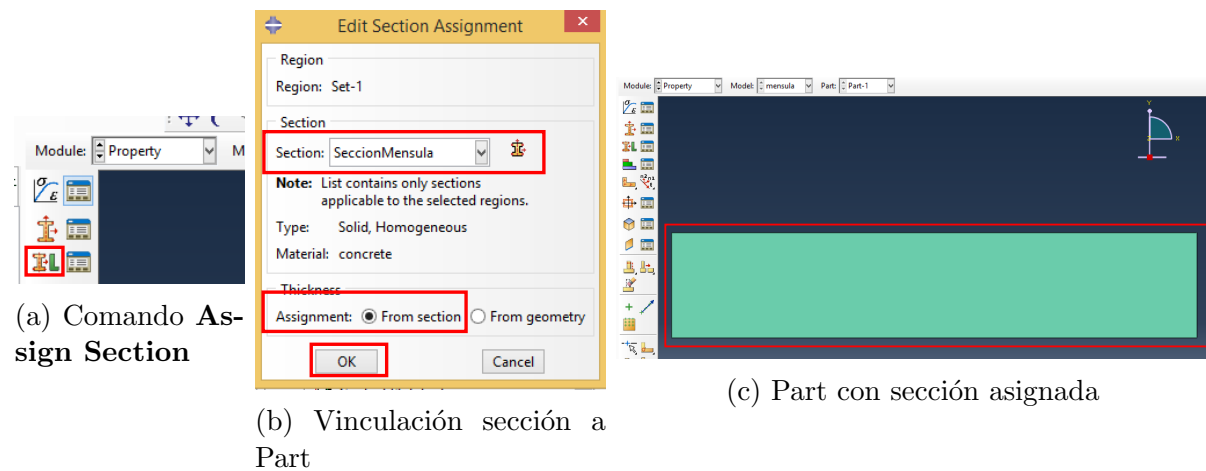


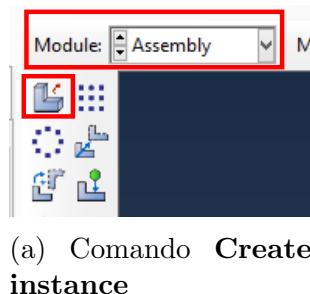
Figura 18: Asignación de la sección a una *Part*

1.4. Módulo Assembly. Ensamblar el modelo

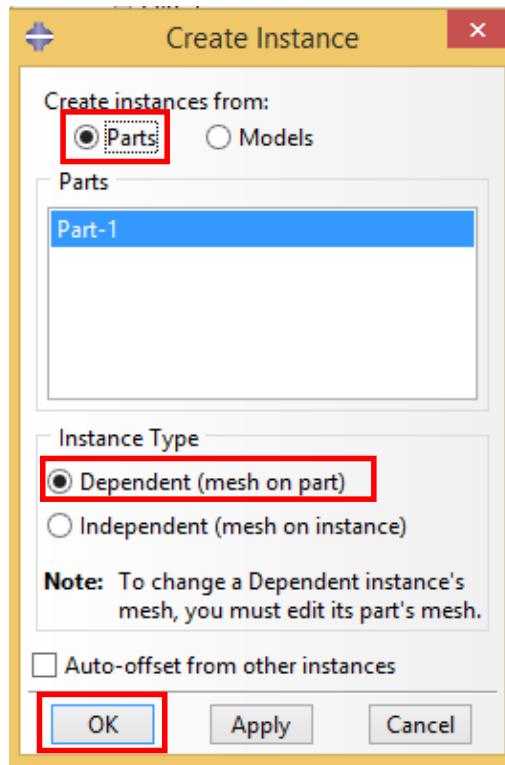
Todo modelo de Abaqus se construye como un conjunto de copias (*instances*) de las *parts* creadas. Nuestro problema es muy sencillo y simplemente debemos crear un conjunto (*Assembly*) con una única copia de nuestra *part*. Sin embargo imagina que quisiéramos modelar un coche, y que hemos ido creando *parts* de sus distintas componentes. Con la lógica de Abaqus habríamos creado una *part* definiendo una rueda, y en el momento de crear el modelo final, haríamos cuatro copias de esa *part* para cada una de las ruedas del coche.

Para montar el modelo sigue los pasos que se indican a continuación:

1. Activa el módulo **Assembly** y pulsa el icono **Create instance** tal como indica la Fig. 19a
2. En la caja de diálogo que aparece (ver Fig. 19b), selecciona la *part* de la que vamos a hacer copia (sólo hay una) e indica que la copia será de tipo **Dependent** (definiremos la malla en la *part* y ésta se replicará en la copia que estamos creando)



(a) Comando **Create instance**



(b) Creación de una copia *Dependiente*

Figura 19: Acción **Create Instance**

Para facilitarnos operaciones posteriores, Abaqus nos permite agrupar puntos nodales de entidades geométricas en elementos llamados **sets**. De esta forma cuando queramos obtener los resultados en esa entidad geométrica se lo podremos solicitar a Abaqus sin necesidad de conocer los nodos de la malla que la forman. En nuestro caso vamos a querer conocer la distribución de las fuerzas nodales en el extremo empotrado de la viga. Por ello vamos a crear un set de los futuros nodos de la malla en esta geometría:

1. Para crear un set haz doble click con el ratón sobre el elemento **Sets** en el **Model Tree** (ver Fig. 20a) o bien pulsa **Tools/Set/Create** (ver Fig. 20b).

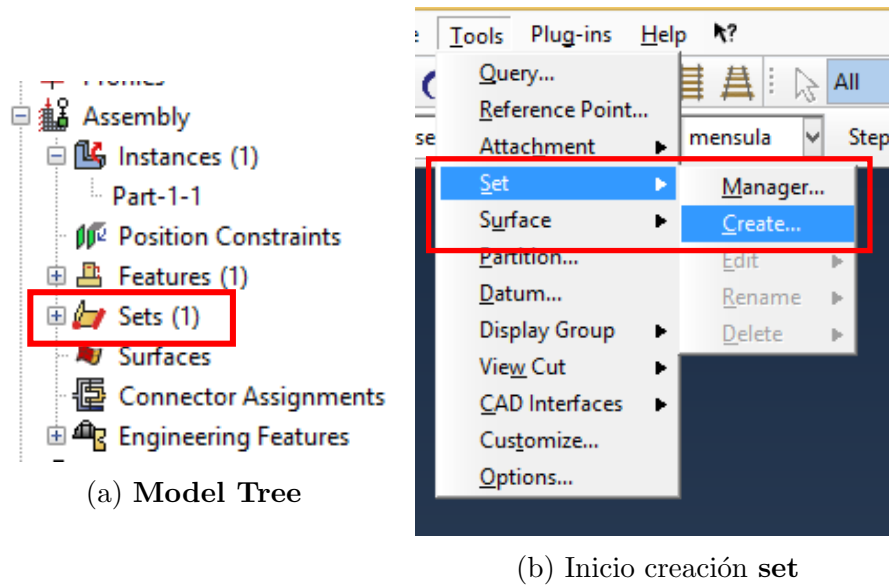


Figura 20: Creación de un set

2. Asígnale el nombre *LadoIzquierdo* en la siguiente ventana (ver Fig. 21a) y selecciona el lado izquierdo de la ménsula (ver Fig. 21b).

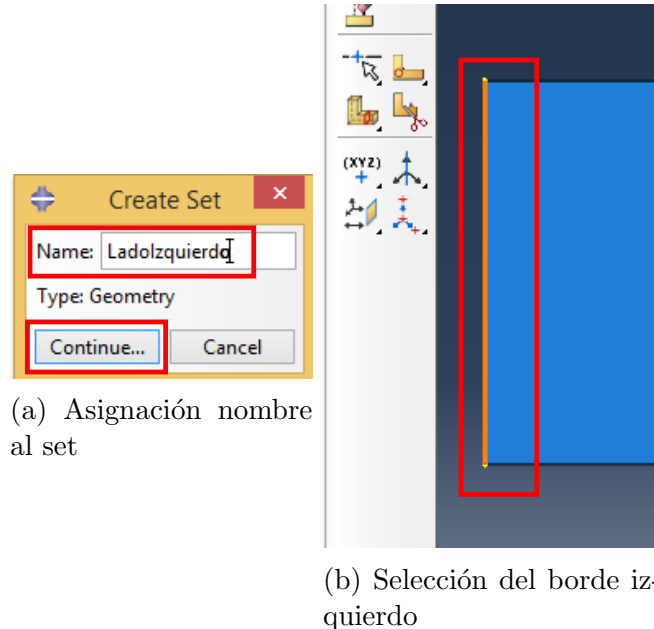


Figura 21: Creación de un set

3. Asegúrate que en el **Model Tree** se ha creado un nuevo set tal como indica la Fig. 22)

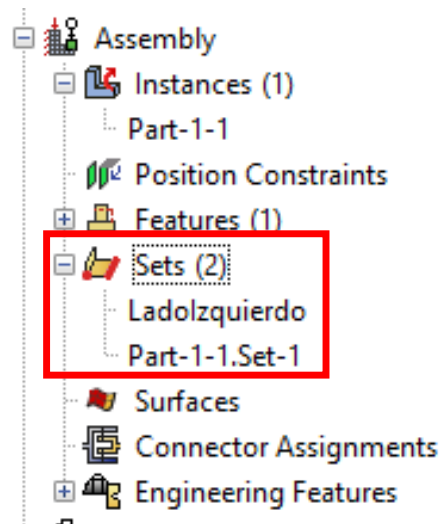
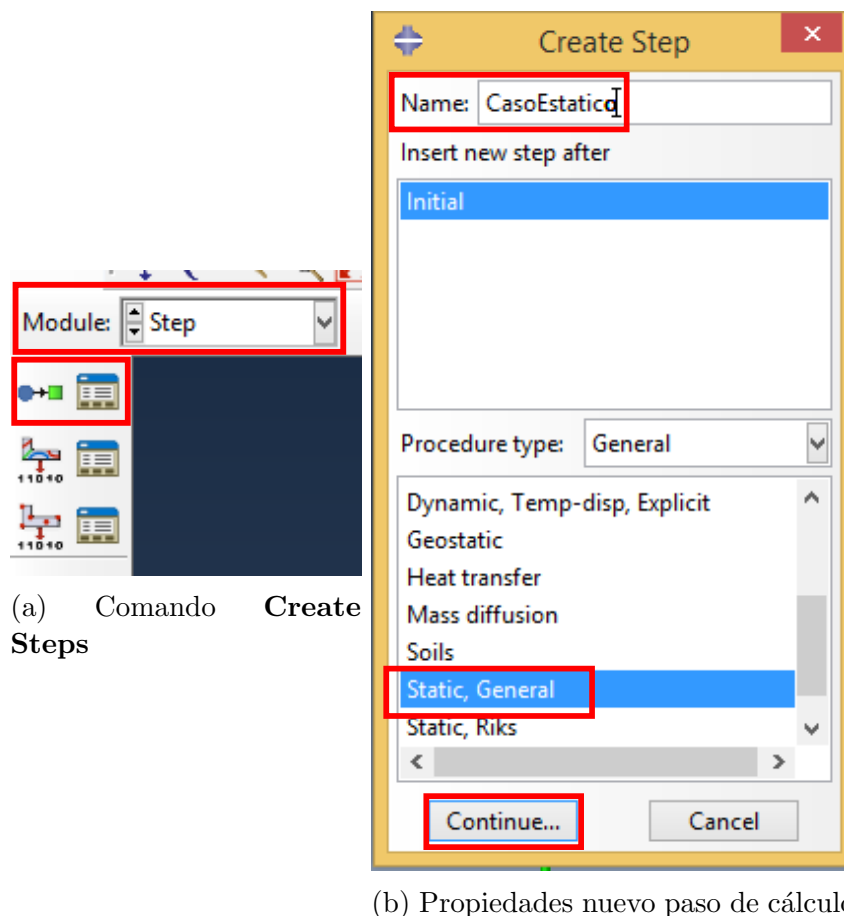


Figura 22: Model Tree con dos sets

1.5. Módulo Step. Configurar el procedimiento de análisis.

Una vez construido el modelo, debemos definir en Abaqus los pasos de cálculo (**steps**) que vamos a utilizar en nuestro análisis y qué información queremos guardar de cada uno. Abaqus define un paso de cálculo *Initial* que asumiremos es el inicio de nuestro análisis y donde aplicaremos la condición de contorno en desplazamientos (el empotramiento). Para aplicar el vector tensión impuesto definiremos un único paso de cálculo y haremos un análisis estático. Para definir el paso de cálculo (**Step**) sigue los siguientes pasos.

1. Activa el módulo **Step** y pulsa el icono **Create Steps** tal como indica la Fig. 23a. En el cuadro de diálogo que te aparece (ver Fig. 23b) nombra el caso como *CasoEstatico* e indica que el análisis es de tipo **Static, General**.



(b) Propiedades nuevo paso de cálculo

Figura 23: Creación de nuevo paso de cálculo

2. Ahora vamos a definir qué información queremos que nos guarde en el paso de cálculo creado para poder analizarla en el postproceso. Bajo el nombre **Field Output** Abaqus guarda la información de la solución en el dominio en un instante dado. Selecciona el icono **Create Field Output** (ver Fig. 24a) para crear un nuevo campo de resultados. En el siguiente diálogo nómbralo *F-Output-Nuevo* y asígnalo al intervalo que acabamos de crear *CasoEstatico* (ver Fig. 24b). De los campos disponibles para el postproceso elegiremos el tensor de tensiones (S), la tensión equivalente de von Mises (MISES), los desplazamientos (U), las fuerzas de reacción y momentos (RF) y las fuerzas y momentos concentrados (CF) tal como indica la Fig. 24c.

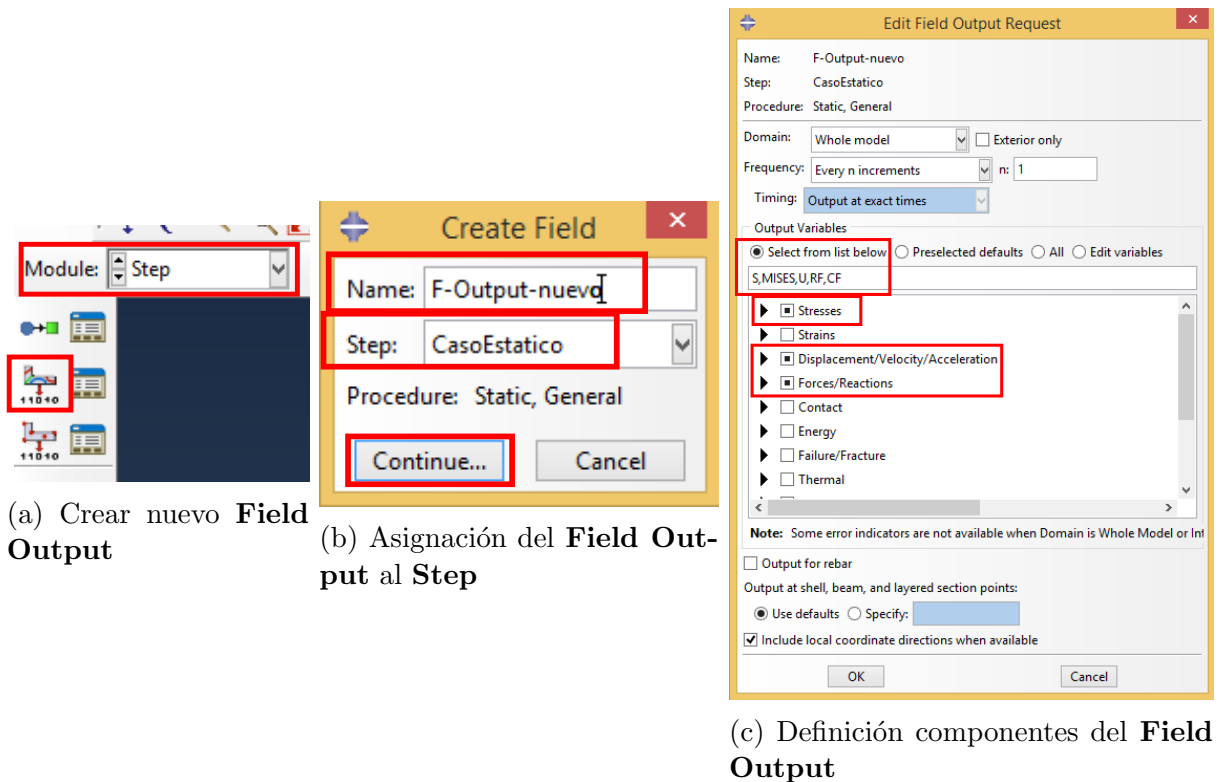


Figura 24: Definición de **Field Output**

3. Bajo el nombre **History Output** Abaqus guarda la información de la solución en un punto durante un intervalo de tiempo. Como estamos en un problema cuasi-estático no nos interesa la evolución temporal de una variable y vamos a eliminar la que Abaqus crea por defecto. Para hacerlo pulsa el botón derecho del ratón sobre el nodo **History Output Request** del **Model Tree** y selecciona **Manager** tal como indica la Fig. 25a. Nos aparecerá una ventana con el gestor de variables históricas (ver Fig. 25b), selecciona la variable **H-Output-1** y pulsa **Delete**.

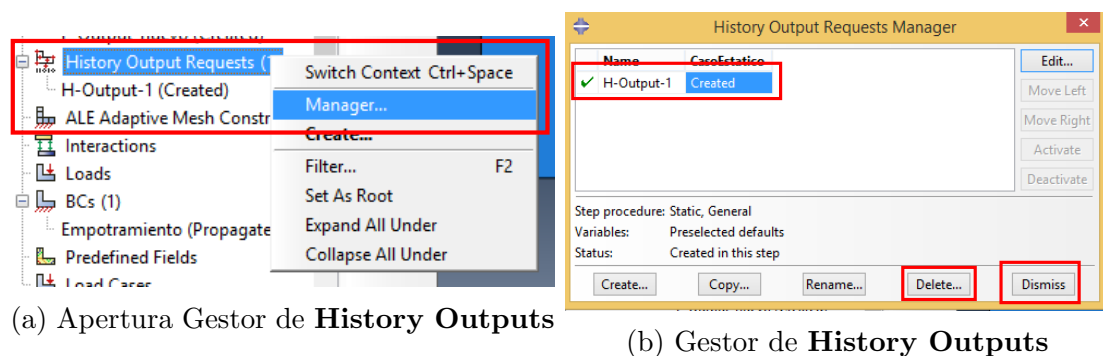


Figura 25: Eliminación de las **History Outputs**

1.6. Módulo Load. Aplicar las condiciones de contorno

Las condiciones de contorno que queremos aplicar son esenciales (imponemos que el desplazamiento es nulo en el empotramiento) y naturales (imponemos un vector tensión \mathbf{t}^* en el la mitad derecha de parte superior de la ménsula). El empotramiento lo aplicaremos en el paso de cálculo *Initial* y el vector tensión en el paso de cálculo creado *CasoEstatico*.

Para imponer la condición de contorno esencial haz como sigue:

1. Activa el módulo load y pulsa **Create Boundary Condition** (ver Fig.26).

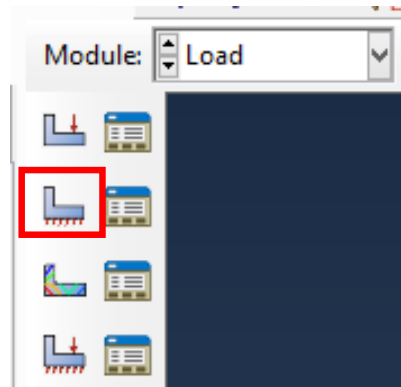
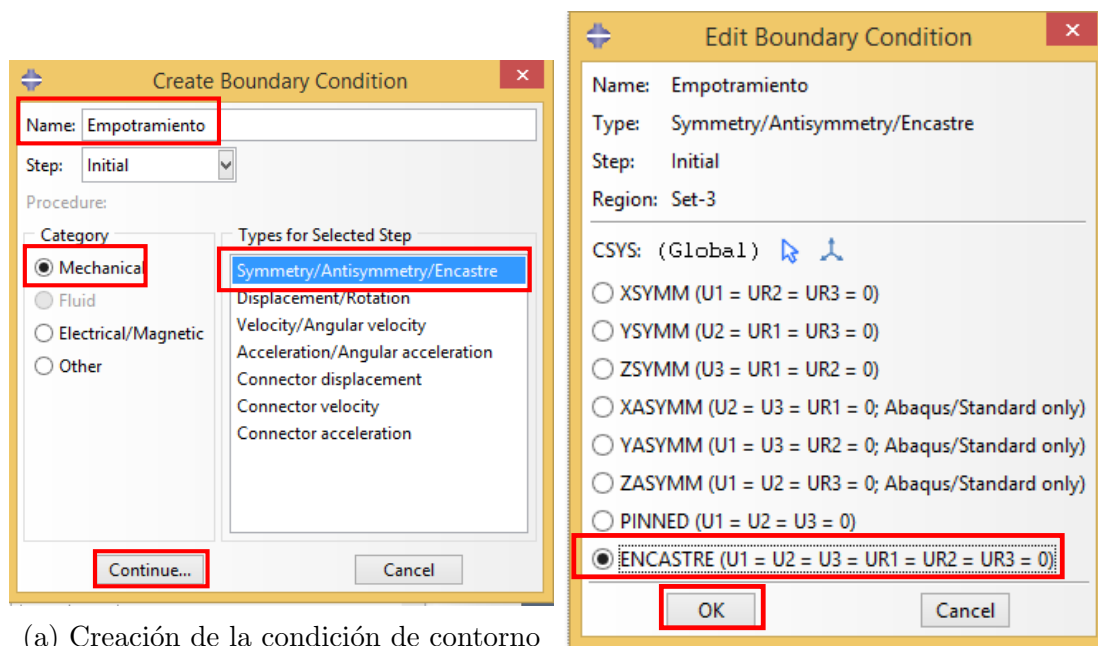


Figura 26: Comando **Create Boundary Condition**

2. En el cuadro de diálogo que aparece (ver Fig.27a), pon el nombre *Empotramiento* a la condición de contorno, asígnalo al paso de cálculo **Initial**, indica que es de la categoría **Mechanical** y que va a ser de tipo **Symmetry/Antisymmetry/Encastre**. Selecciona el lado izquierdo donde impondremos la condición de contorno. En el siguiente cuadro indica que la condición de contorno es de tipo **Encastre** (empotramiento) tal como indica la Fig. 27b.



(a) Creación de la condición de contorno

(b) Edición de la condición de contorno

Figura 27: Definición de la condición de contorno de empotramiento

- Finalmente nos tiene que aparece en la pantalla de trabajo (ver Fig.28) nuestro modelo con la representación de los grados de libertad impuestos a cero.

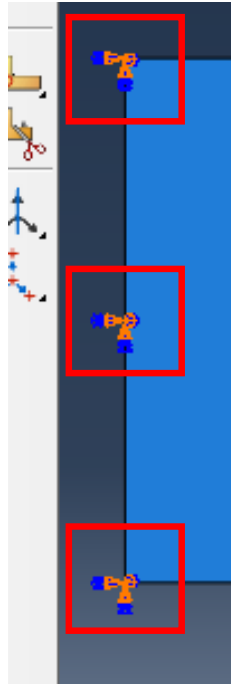


Figura 28: Detalle condición de contorno de empotramiento

Para imponer la condición de contorno natural haz como sigue:

- Pulsa el icono **Create Load** tal como indica la Fig. 29a. En el cuadro de diálogo que aparece (ver Fig. 29b) nombra la condición de contorno como *CargaRepartida*, aplícala en el paso de cálculo *CasoEstatico*, indica que su categoría es **Mechanical** y el tipo **Surface traction**. Selecciona la mitad derecha del borde superior de la ménsula tal como describe la Fig. 29c.

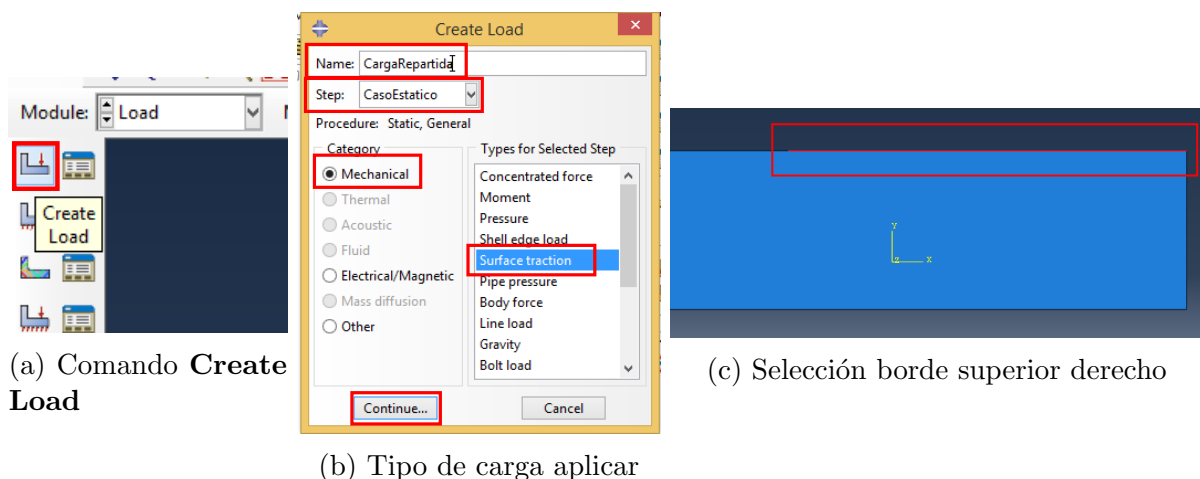
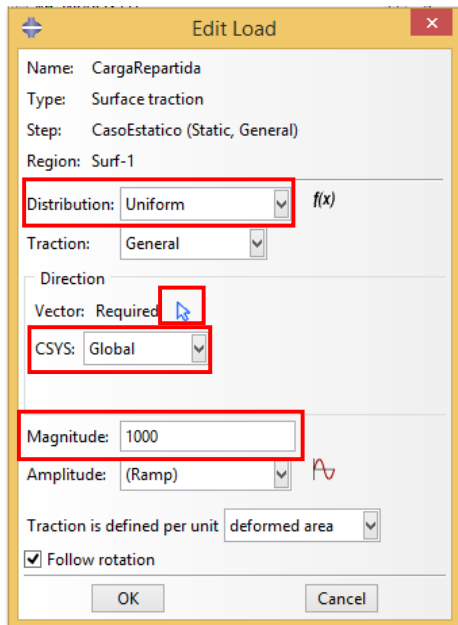


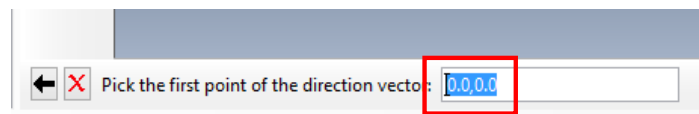
Figura 29: Definición carga repartida (I)

- El siguiente cuadro de diálogo nos permite definir el vector tensión. Indica que es de tipo **General** y de módulo 1000 Pa (ver Fig. 30a). Es necesario definir la dirección y

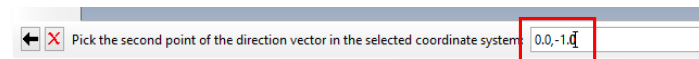
el sentido del vector tensión. Pulsa en la flecha azul junto a la palabra **Vector** para definir un vector que nos proporcione la dirección y el sentido del vector tensión (no tiene que ser unitario). Se puede hacer pulsando dos vértices de nuestra geometría o introduciendo dos pares de coordenadas. Vamos a hacerlo de la última forma. Introduce en la parte inferior izquierda las coordenadas del punto inicial (Fig. 30b, luego pulsa intro) y del punto final (Fig. 30c, luego pulsa intro).



a: Propiedades del vector tensión



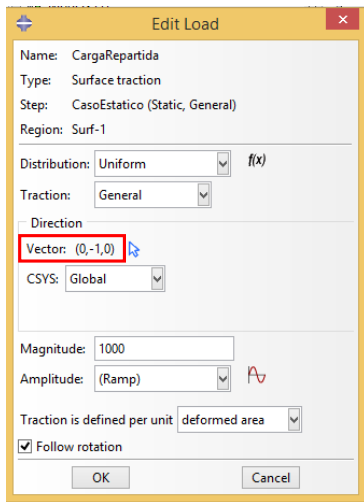
b: Inicio vector auxiliar



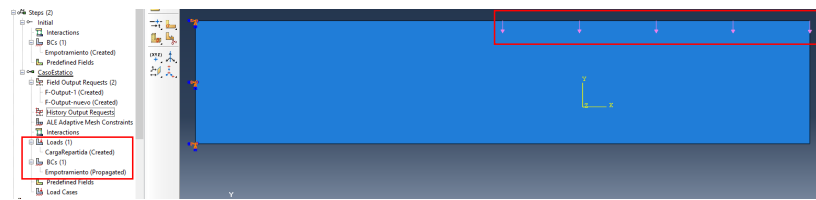
c: Final vector auxiliar

Figura 30: Definición carga repartida (II)

- Ahora nos aparece en el cuadro de diálogo anterior el vector normalizado (ver Fig. 31a) y, al aceptar la definición, nos aparece en la ventana de trabajo el esquema de distribución de cargas (ver Fig. 31b). Revisa en el **Model Tree** que se han añadido los nodos asociados a las condiciones de contorno.



(a) Propiedades del vector tensión



(b) Detalle carga aplicada

Figura 31: Definición carga repartida (III)

1.7. Módulo Mesh. Crear la malla.

Para asignar una malla a una geometría le debemos informar a Abaqus sobre:

1. la forma del elemento (si son triángulos o cuadrados en problemas bidimensionales y si son tetraedros o hexaedros en problemas tridimensionales).
2. tamaño del elemento (bien un tamaño global para la geometría o bien definir tamaños diferentes según regiones).
3. El tipo de elemento (nos lo explicarán en el resto del curso).

Abaqus distingue qué tipo de malla puede realizar según la geometría que tengamos (aunque el usuario puede dividir las *parts* manualmente para crear geometrías más regulares). Cada tipo de malla posible en cada región la identifica con un color:

Verde Se pueden generar mallas con métodos estructurados

Amarillo Se pueden generar mallas con el método de barrido

Rosa Se pueden generar mallas con el método libre

Canela Se pueden generar mallas con el método bottom-up

Naranja No se pueden generar mallas y la geometría se tiene que dividir

En nuestro caso nos aparece que la geometría está de color azul. Esto es porque hemos hecho una copia dependiente de la *part* y es ella la que tenemos que mallar (luego la malla se replica en la copia). Activa el módulo **Mesh** y cambia a que el objeto a mallar sea la *part* tal como indica la Fig. 32 y pasará a ponerse rosa.

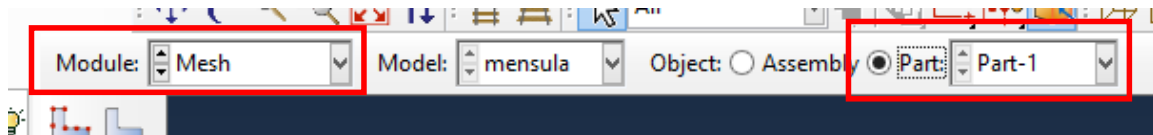


Figura 32: Inicio módulo Mesh

Para definir la malla sigue los siguientes pasos:

1. Primero definiremos la forma de los elementos. Pulsamos **Mesh/Controls** en barra superior de menús y nos aparece el cuadro de diálogo de la Fig. 33. Indiquemos que queremos usar elementos **cuadriláteros**, que la técnica sea **Free** y que el algoritmo es **Advancing front**.

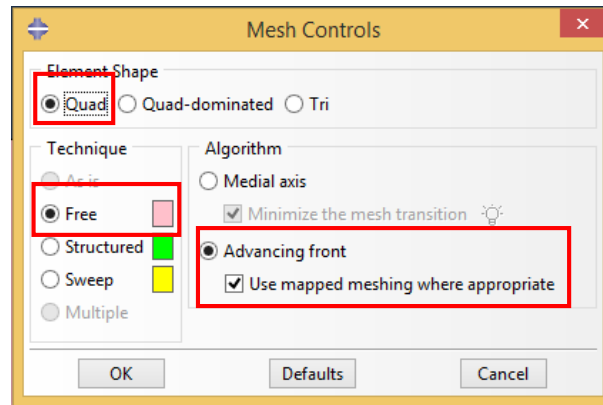


Figura 33: Definición forma de los elementos

- Definamos ahora el tamaño de los elementos. Pulsamos el icono **Seed part** (ver Fig. 34a) para asignar un tamaño global a los elementos de la geometría. Usemos un tamaño de 0.2 m tal como indica la Fig. 34b y pulsemos el botón **Aplicar**. Nos deberá aparecer una división de la frontera de nuestra geometría usando el tamaño que hemos indicado (ver Fig. 34c). Por último pulsa OK.

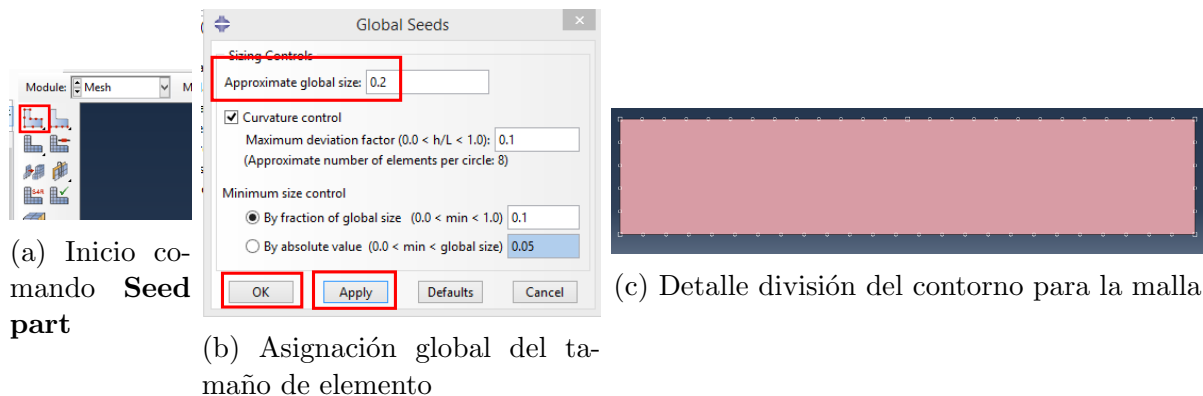


Figura 34: Asignación tamaño global de la malla

- Definamos ahora el tipo de elemento pulsando el icono **Assign Element Type** (ver Fig. 35a). Nos pedirá que seleccionemos la *Part* a la que le asignaremos el tipo de elemento. Al seleccionarle nos deberá cambiar de color tal como indica la Fig. 35b. Por último nos aparece un cuadro de diálogo con los tipos de elementos disponibles. Tal como muestra la Fig. 35c seleccionemos **Standard, Quadratic, Plane Stress** y **Reduced Integration** (ya irás aprendiendo en el resto del curso qué significan estos nombres).

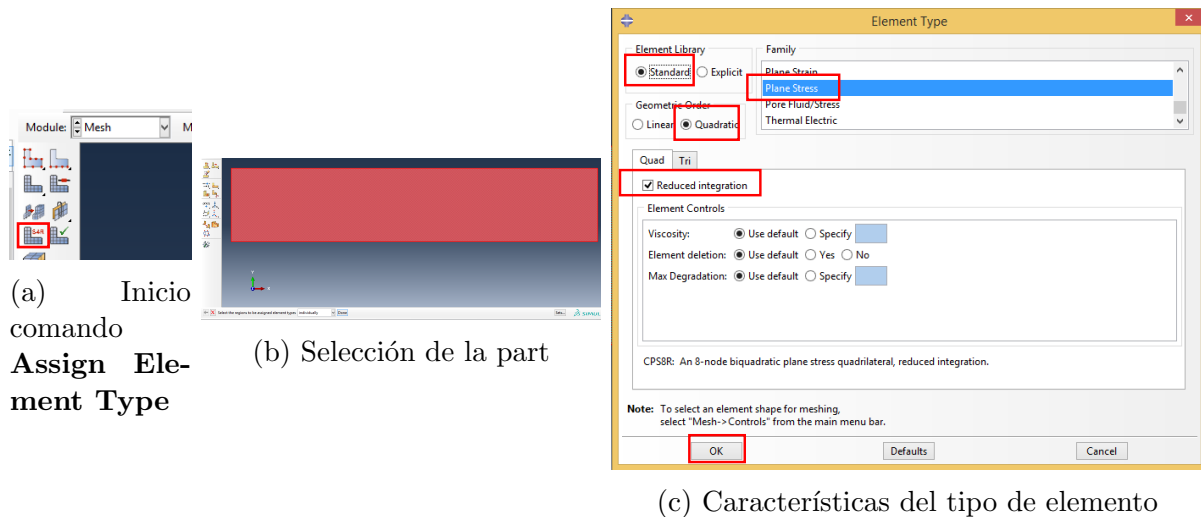


Figura 35: Definición tipo de elemento

- Una vez definida todos los parámetros de la malla solo falta generarla. Pulsamos el icono **Mesh Part** (ver Fig. 36a) y debes obtener la malla que muestra la Fig. 36b.

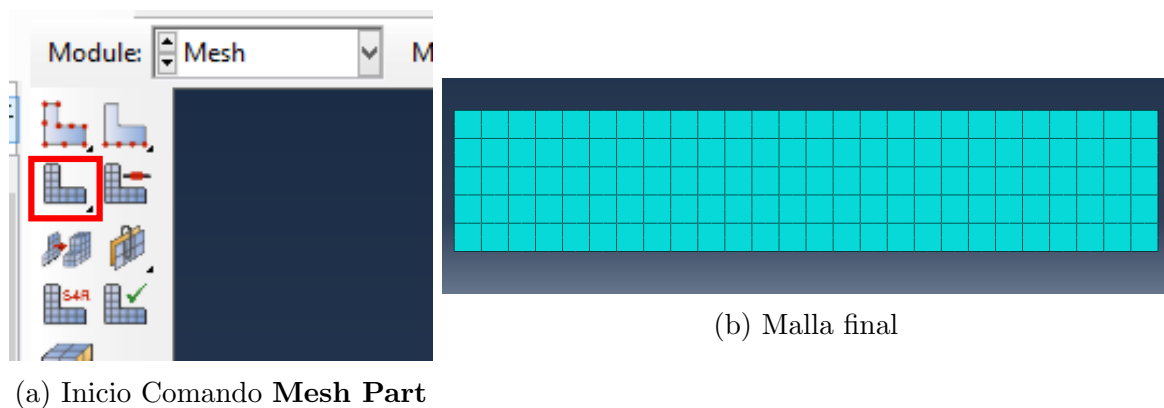


Figura 36: Generación de la malla

1.8. Módulo Job. Crear el trabajo y lanzar el análisis.

En este momento debemos tener un modelo de elementos finitos completo que puede ser ejecutado. Antes de correr la simulación en Abaqus, necesitamos crear un trabajo (**job**) y lanzarlo para que Abaqus entienda que hay un modelo de elementos finitos listo para ser simulado.

Para crear y lanzar un trabajo (**job**) sigue los siguientes pasos:

1. Activa el módulo **job** y pulsa el icono **Create job** (ver Fig. 37a). Asígnale el nombre *Caso01* e indica que los datos para el análisis debe tomarlos del Modelo que hemos creado y no de un fichero de entrada de datos *.inp* (ver Fig. 37b). Te aparecerá un cuadro de diálogo para definir el análisis (ver Fig. 37c). Incluye una descripción y deja el resto de parámetros por defecto.

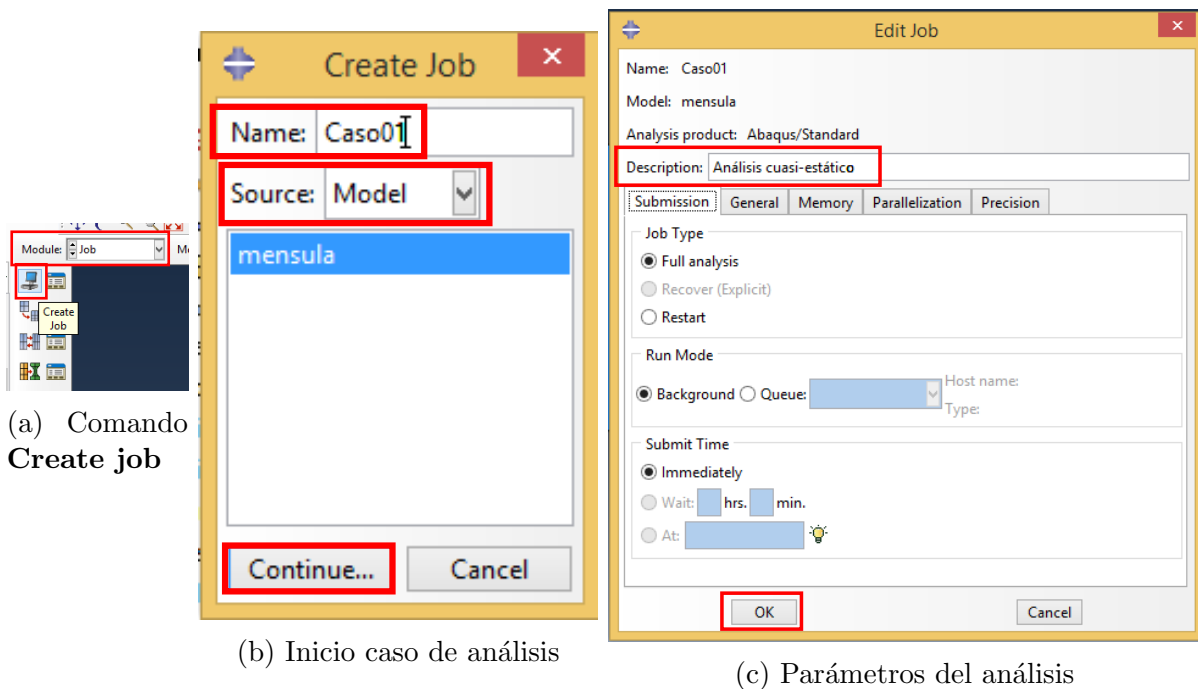


Figura 37: Creación de un nuevo análisis (**job**)

2. Vemos que se ha creado en el **Model Tree** un nuevo job (debajo de *Analysis*). Para lanzarlo activemos el gestor de trabajos pulsando con el botón derecho del ratón encima de **Jobs** y seleccionando **Manager** (ver Fig. 38a). Nos aparece un cuadro de diálogo (ver Fig. 38b) que nos permite gestionar todos los análisis que tengamos (en este caso sólo tenemos uno, *Caso01*). Pulsa **Write Input** para escribir en disco el fichero *caso01.inp* por si lo quisiéramos utilizar más adelante.

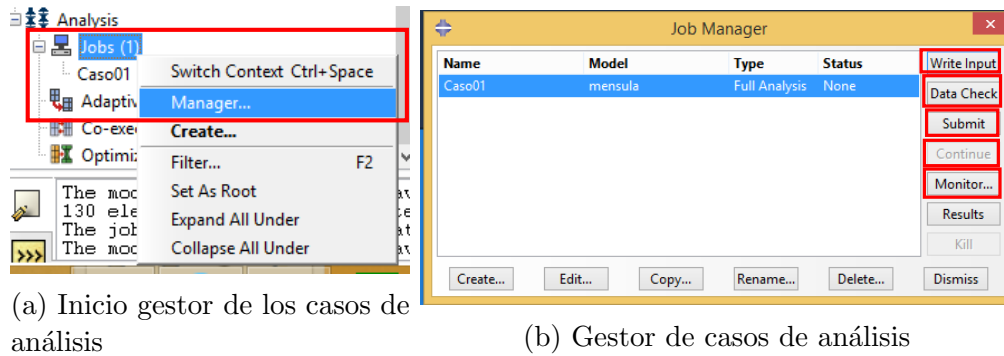


Figura 38: Ejecutar caso de análisis (I)

3. Finalmente podemos lanzar el análisis. Podemos lanzarlo directamente pulsando **Submit** o podemos primero revisar que todo está bien pulsando **Data Check** y luego **Continue**. De cualquiera de las dos formas, si todo va bien, debes generar la parte inferior de la pantalla el mensaje de la Fig. 39a y en el gestor de casos el estatus del trabajo debe haber cambiado a **Completed** (ver Fig. 39b).

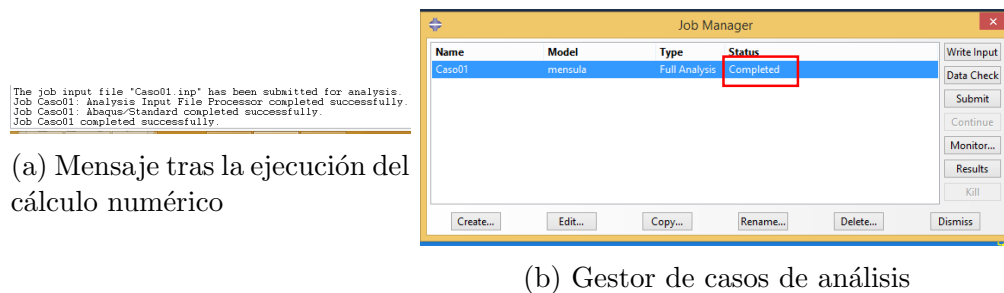


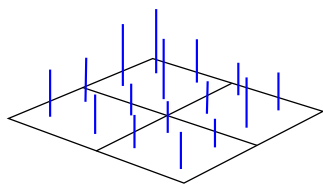
Figura 39: Ejecutar caso de análisis (II)

1.9. Módulo Visualization. Realizar el post-proceso.

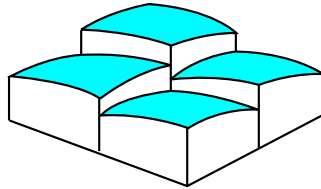
Antes de empezar la visualización recordemos qué tipos de variables tenemos y dónde se calculan. Primero veamos los tipos de variables y la información que da Abaqus sobre ellas:

- Variables escalares (Temperatura θ): 1 componente
- Variables vectoriales (Desplazamiento \mathbf{u}): 3 componentes + su módulo
- Variables tensoriales orden 2 (tensiones $\boldsymbol{\sigma}$): 6 componentes + valores invariantes respecto al sistema coordenado (von Mises, valores principales, tensión hidrostática)

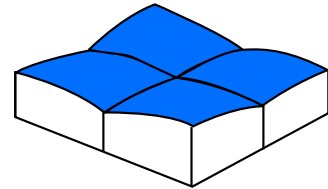
Las variables desplazamiento y temperatura se calculan en los nodos de la malla. Las variables flujo de calor, tensión y deformación se calculan en los puntos de integración de los elementos. Estos valores son luego extrapolados a los nodos de los elementos y posteriormente suavizados en los nodos de la malla (ponderando la contribución de todos los elementos que comparten un mismo nodo) tal como esquematiza la Fig. 40.



Valores de las tensiones
en los puntos de integración



Valores de las tensiones extra-
polados a los nodos del elemento



Valores de las tensiones suavi-
zados en los nodos de la malla

Figura 40: Proceso de suavizado de las variables definidas en puntos de integración

Para activar el postproceso del análisis que acabamos de realizar pulsa con el botón derecho del ratón sobre el job completado *Caso01* y selecciona **Results** tal como indica la Fig. 41.

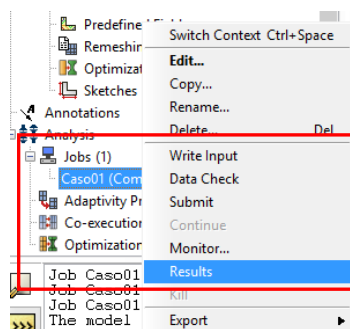


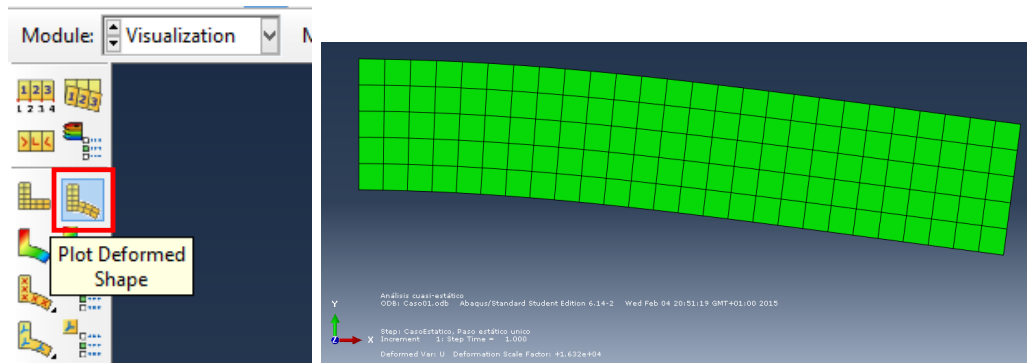
Figura 41: Inicio postproceso de resultados

A continuación vamos a describir alguna de las acciones más comunes que se realizan en el postproceso de resultados:

1. Dibujar la deformada de la malla.

Con el módulo **Visualization** activado pulsa el icono **Plot Deformed Shape** (ver Fig. 42a) para obtener la deformada. Obtendrás la deformada que se muestra en la

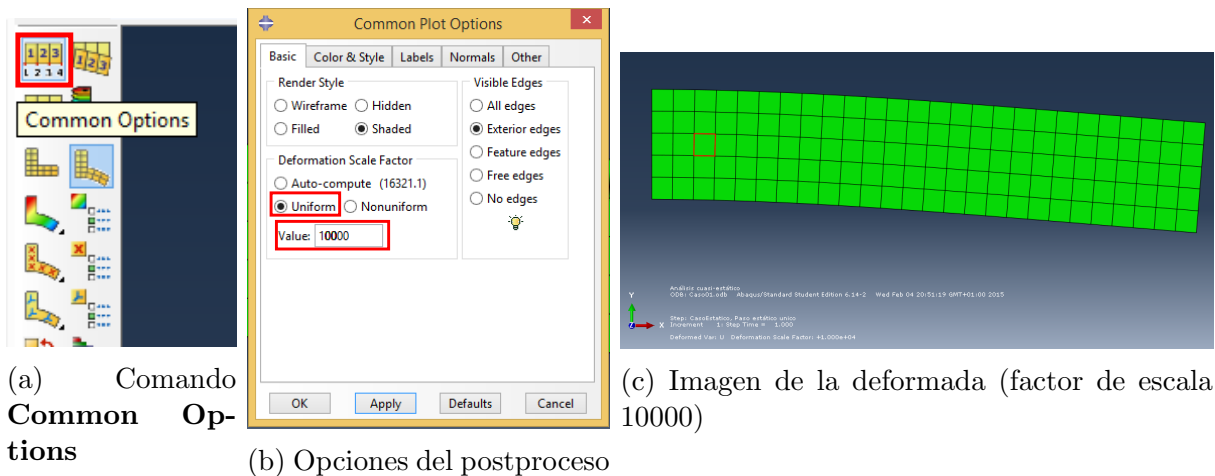
Fig. 42b en la que los desplazamientos se han multiplicado por un factor de escala de $1.633e4$.



(a) Comando **Plot De-** (b) Imagen de la deformada (factor de escala automático)
formed Shape

Figura 42: Representación de la deformada (I)

Para usar un factor de escala no automático pulsa el icono **Common Options** (ver Fig. 43a) Te aparecerá el cuadro de diálogo de la Fig. 43b en el que debes cambiar el **Deformation Scale Factor** a **Uniform** e indicar un valor de 10000. Al final obtendrás la deformada que muestra la Fig. 43c.



(a) Comando **Common Op-**
tions

(b) Opciones del postproceso

(c) Imagen de la deformada (factor de escala 10000)

Figura 43: Representación de la deformada (II)

2. Obtener la distribución de un escalar (una variable escalar o una componente de una variable vectorial o tensorial) en la geometría

Pulsa el icono **Plot Contours on Deformed Shape** o **Plot Contours on Undeformed Shape** (ver Fig. 44a). Nos aparecerá (bien en la geometría deformada o bien sin deformar) la distribución de un campo de la solución tal como muestra la Fig. 44b (en este caso es la componente σ_{xx} del tensor de tensiones). Para cambiar qué variable deseas mostrar, selecciona la variable que desees dibujar en los menús desplegables en la barra de herramientas superior (ver Fig. 44c).

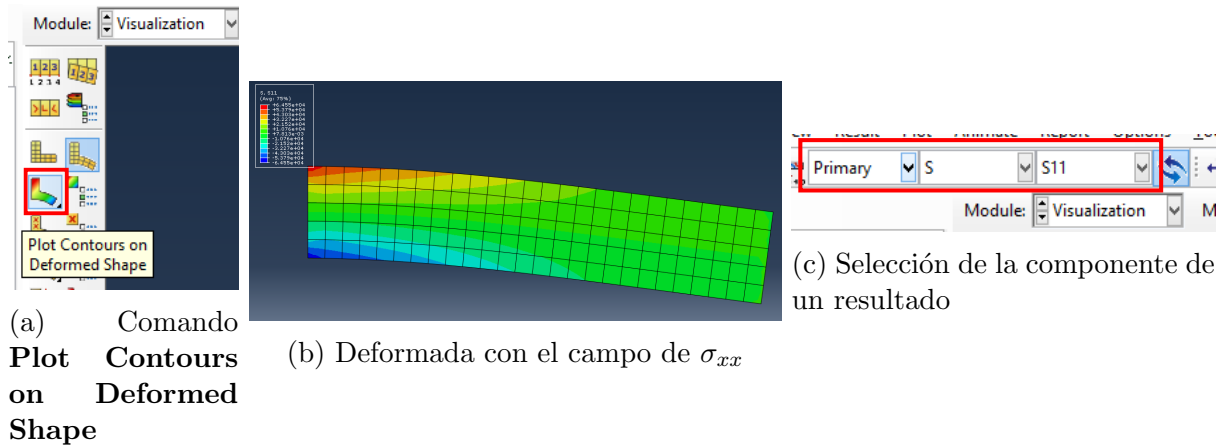


Figura 44: Distribución de un campo escalar en la geometría (I)

Podemos modificar cómo se presentan estos campos de la solución. Pulsa el icono **Contour Options** (ver Fig. 45a) y en cuadro de diálogo resultante selecciona el tipo de contorno **Line** y los intervalos del contorno **Discrete** igual a 20 tal como muestra la Fig. 45b. Deberás obtener (para la variable que estés pintando) una distribución similar a la que muestra la Fig. 45c. Finalmente puedes guardar un archivo gráfico con los datos de la pantalla de trabajo pulsando **File/Print** para guardar un archivo .pdf, o pulsar CTRL+C para guardar la imagen en tu clipboard.

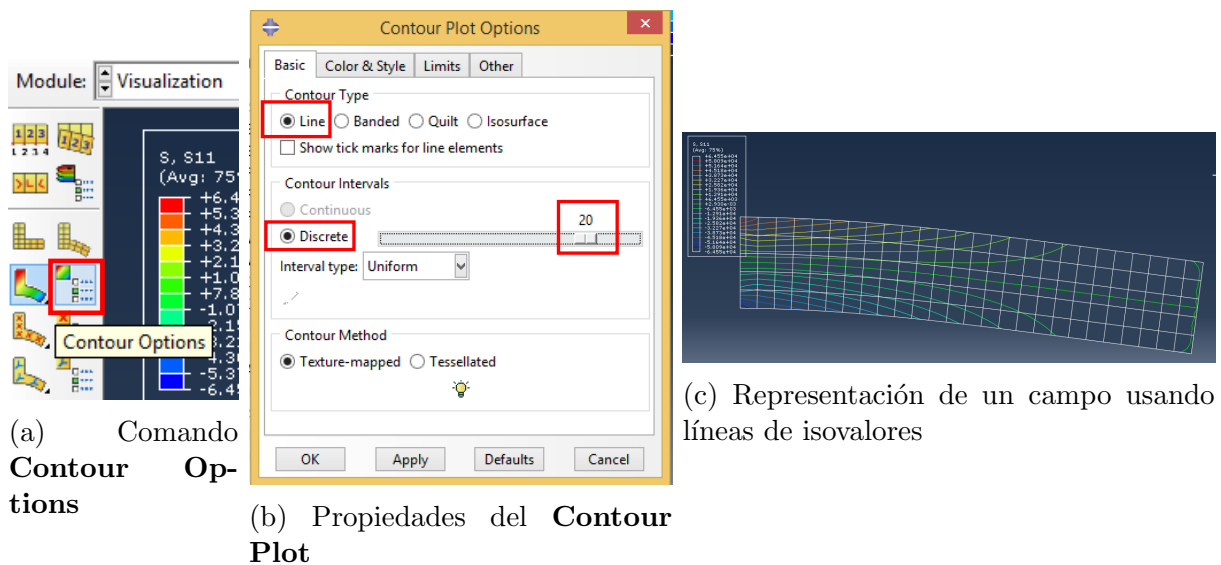


Figura 45: Distribución de un campo escalar en la geometría (II)

3. Dibujar vectores o componentes principales de tensores en la geometría

Pulsa el icono **Plot Symbols on Deformed Shape** o **Plot Symbols on Undeformed Shape** (ver Fig. 46a). Te aparecerá una distribución de vectores tal como muestra la Fig. 46b (en este caso es la distribución de las componentes principales del tensor de tensiones en los puntos de integración de los elementos).

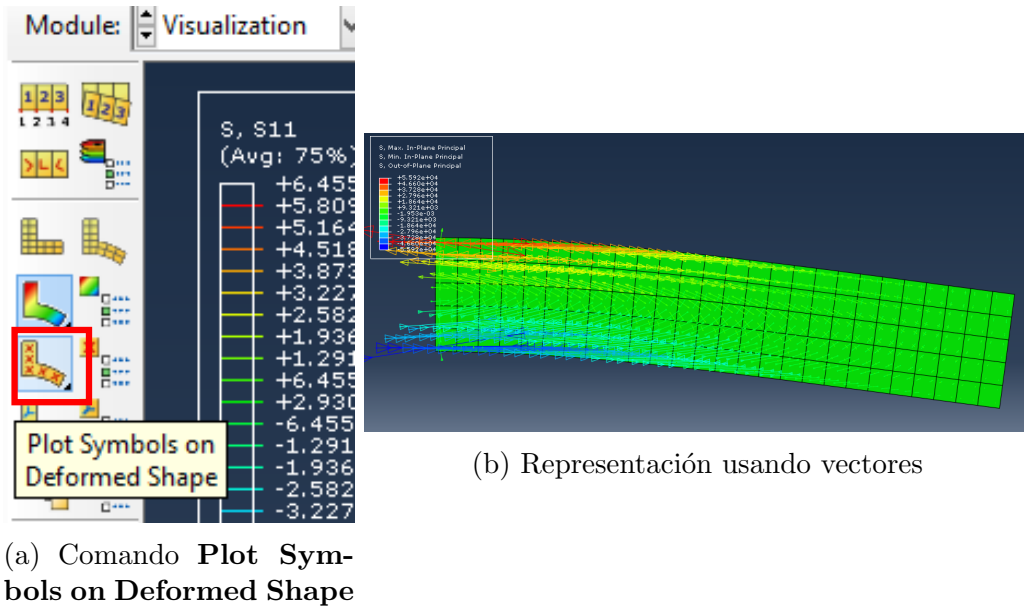


Figura 46: Distribución mediante vectores de una magnitud vectorial/tensorial (I)

Podemos modificar el formato de los vectores. En nuestro caso sería útil reducir un poco el tamaño para que se puedan ver mejor. Para hacerlo pulsa el icono **Symbol Options** (ver Fig. 47a) y en el siguiente cuadro de texto (ver Fig. 47b) cambia el tamaño a 2. Deberías obtener una distribución similar a la que muestra la Fig. 47c.

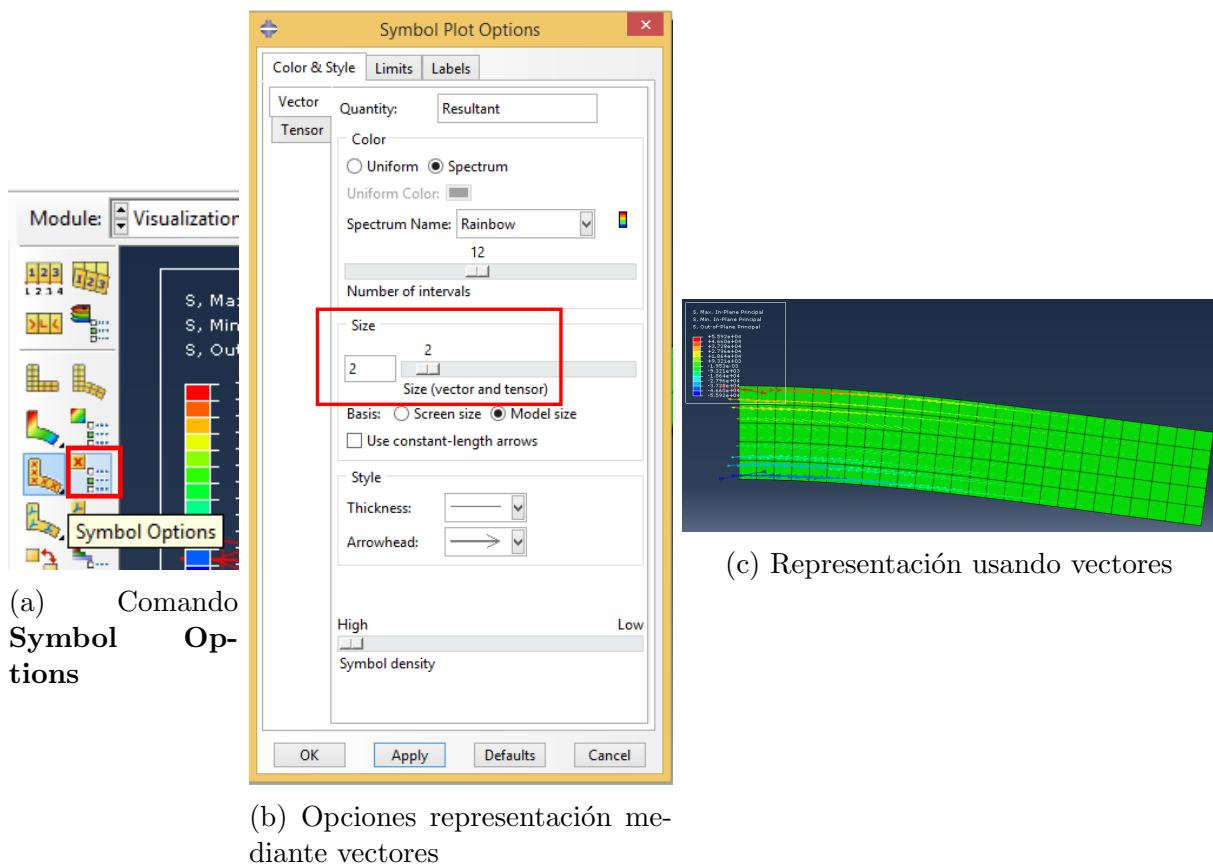


Figura 47: Distribución mediante vectores de una magnitud vectorial/tensorial (II)

4. Obtener valores en nodos o en elementos

Hay veces que nos interesa saber valores de la solución en elementos o nodos específicos. Vamos a obtener primero la solución en elementos. Para hacerlo, primero debemos activar el **Plot Contour** con el campo que queramos conocer. Dibuja, como en la Fig. 48a, el campo de la componente σ_{xx} del tensor de tensiones. Después pulsa **tools/Query** (ver Fig. 48b) y selecciona **Probe values** (ver Fig. 48c)

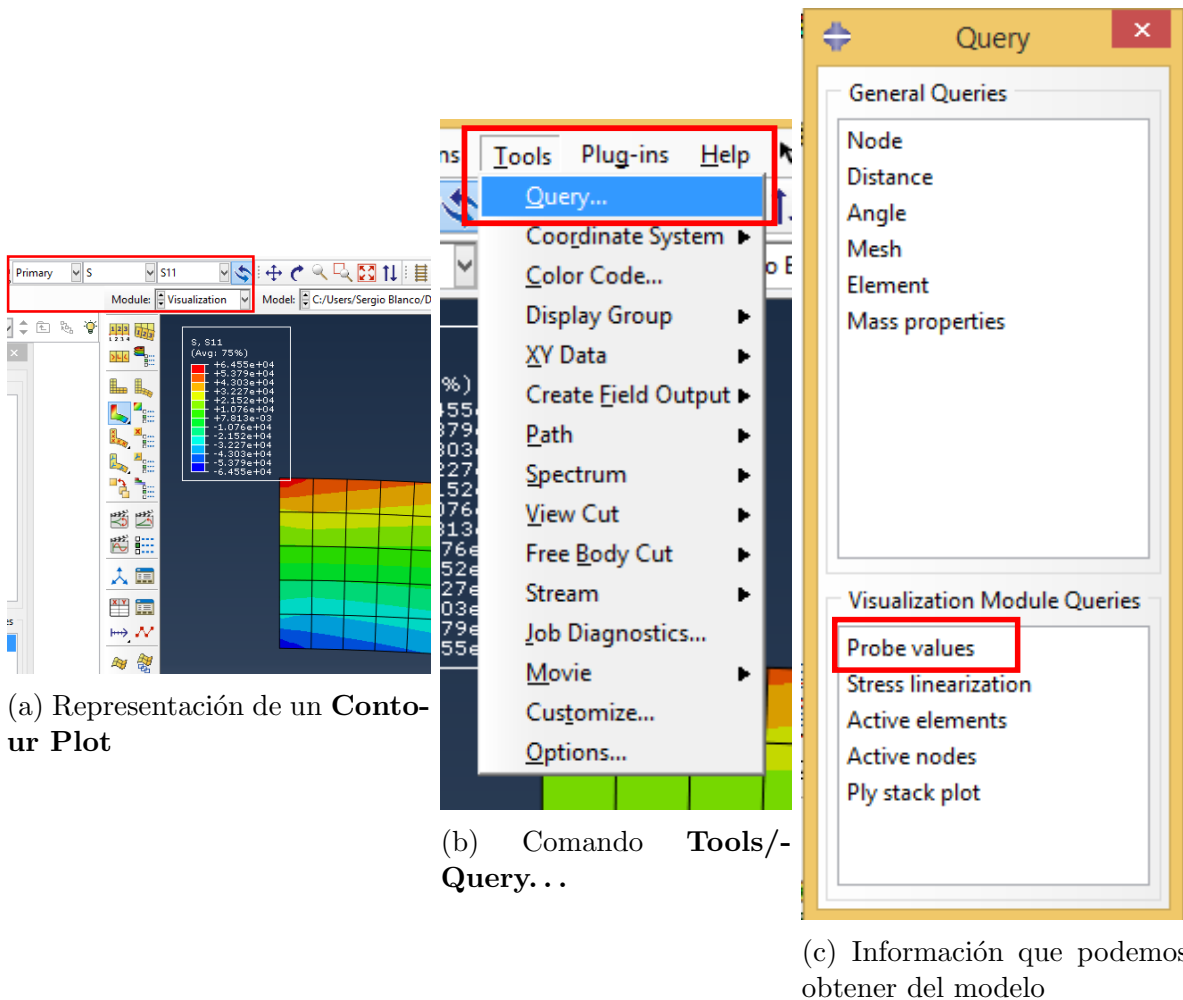


Figura 48: Obtención valores en elementos (I)

Nos aparece un cuadro de diálogo en el que le vamos a indicar que queremos extraer valores de los **Elements**, que del campo seleccionado en el **Plot Contours** queremos **All Directions** y que queremos los valores en los **Integration Points** tal como indica la Fig. 49a. Seleccionamos uno a uno los elementos que están en contacto con el borde izquierdo de la ménsula (ver Fig. 49b)

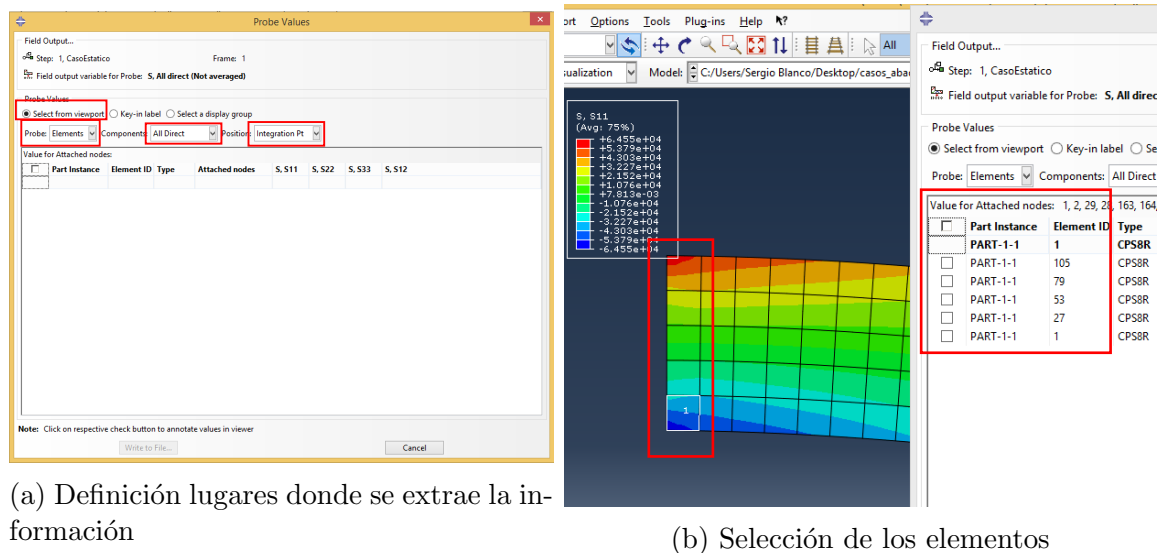


Figura 49: Obtención valores en elementos (II)

Una vez seleccionado los elementos pulsamos **Write to File** (ver Fig. 50a) y escribimos los resultados en un archivo **tensiones.rpt** (ver Fig. 50b). Si abrimos el fichero **tensiones.rpt** con un programa de textos ver cómo nos ha guardado los valores de las componentes del tensor de tensiones en los cuatro puntos de integración de cada uno de los elementos seleccionados (ver Fig. 50c).

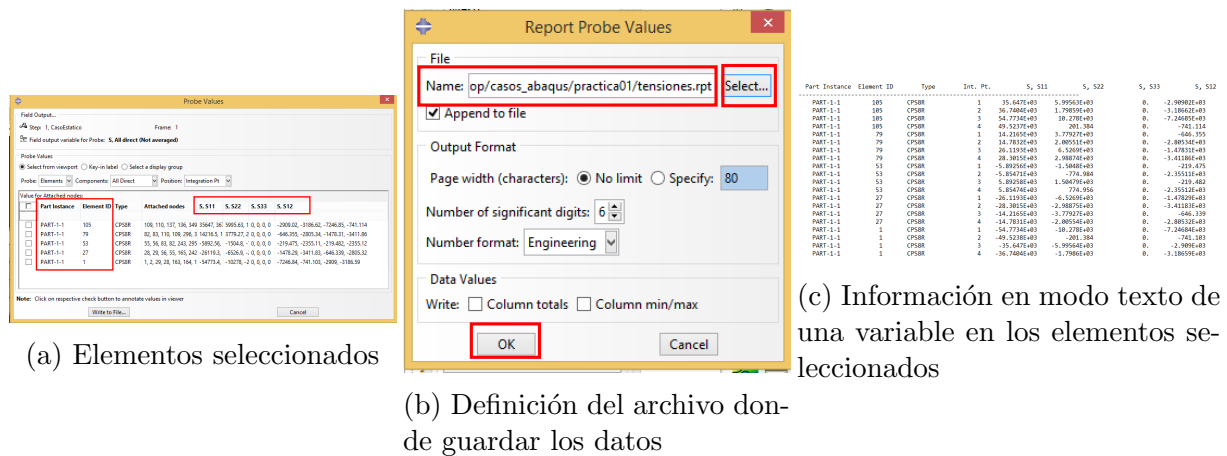


Figura 50: Obtención valores en elementos (III)

Vamos a obtener ahora la solución en nodos. Igual que antes activemos el **Plot Contour** con el campo que queramos conocer. Dibuja ahora, como en la Fig. 51a, el campo de la componente R_x de las fuerzas de reacción. Recuerda que para activar el cuadro de diálogo **Probe Values** hay que pulsar **tools/Query** (ver Fig. 48b) y seleccionar **Probe values** (ver Fig. 48c). Indica que queremos obtener la solución en los **Nodes** y que queremos todas las componentes. Finalmente selecciona todos los nodos del borde izquierdo (ver Fig. 51b). Una vez seleccionados pulsa **Write to File** y guarda los datos en un fichero llamado **Reacciones**. Abre finalmente el fichero y comprueba que se han guardado los valores de las reacciones en los nodos seleccionados (ver Fig. 51c).

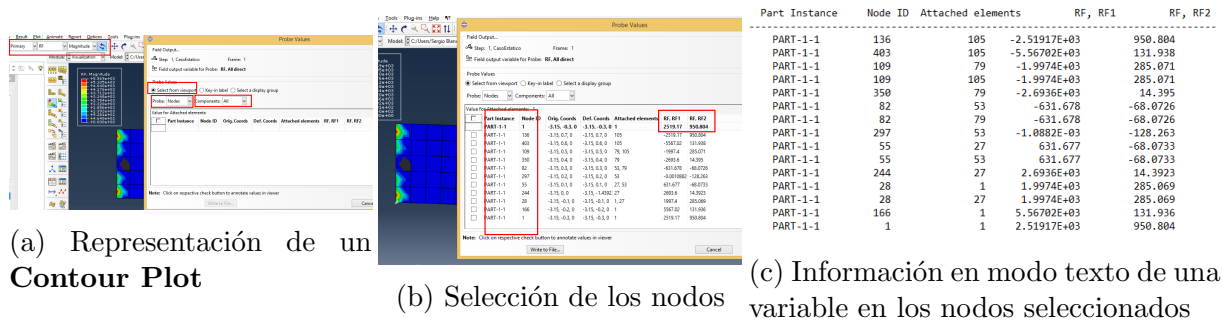


Figura 51: Obtención valores en nodos (I)

5. Obtener curvas

Finalmente vamos a dibujar la distribución de una variable de la solución siguiendo un camino en la geometría. Para eso primero tenemos que definir un camino (**Path**) dentro del modelo y luego obtener una curva X-Y en el que la abscisa X sea la distancia de un punto siguiendo el camino y la ordenada Y el valor en dicho punto de la variable.

Dibujamos de nuevo el campo de la componente R_x de las fuerzas de reacción (ver Fig. 52a) y pulsamos **Path/Create** (ver Fig. 52b). En el siguiente cuadro de diálogo asignamos el nombre *Path-empotramiento* al **path** e indicamos que es un **Node list** como indica la Fig. 52c.

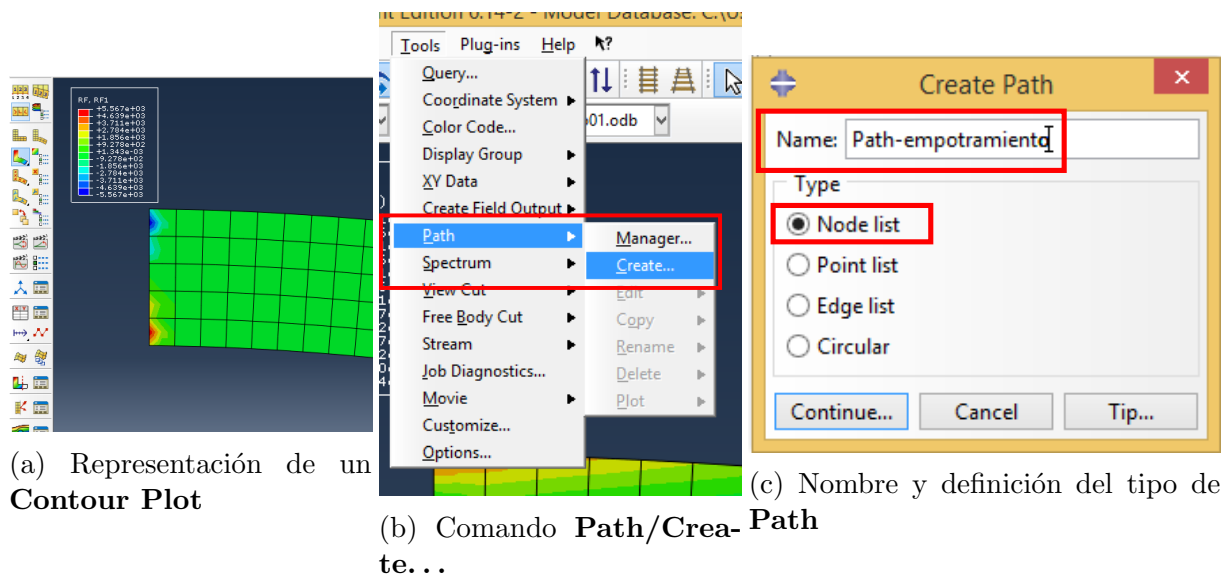


Figura 52: Definición de un Path (I)

En el siguiente cuadro de diálogo debemos empezar asignar los nodos. Seleccionamos **Add After** (aunque en este caso daría igual **Add Before** porque no tenemos una selección previa) como indica la Fig. 53a. Marca el punto inicial (extremo superior del empotramiento) y el punto final (extremo inferior del empotramiento) para definir el camino (ver Fig. 53b). Finalmente deberías obtener el cuadro de diálogo de la Fig. 53c.

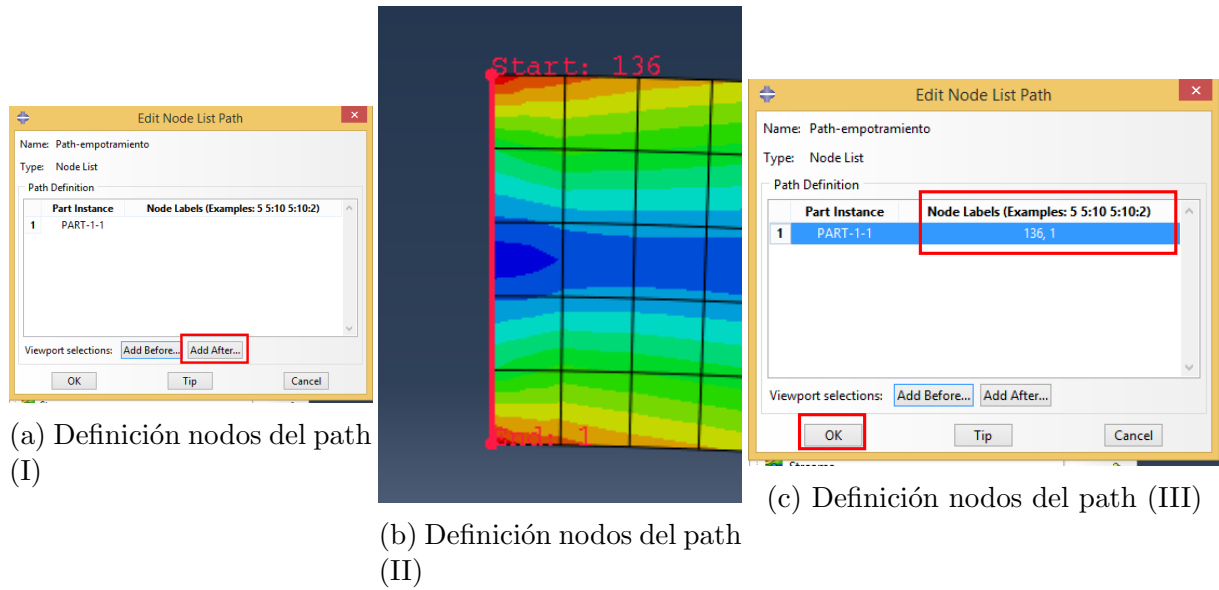
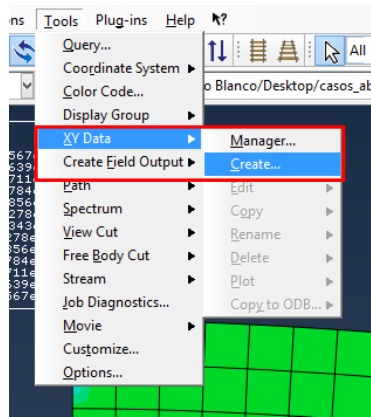
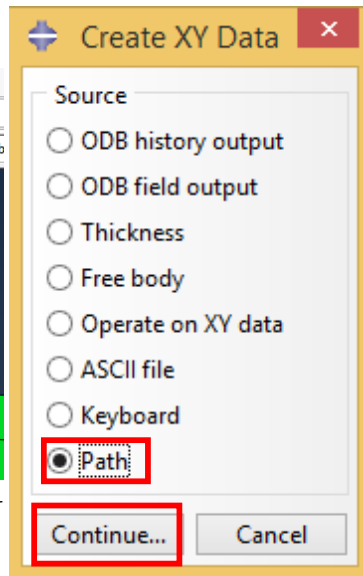


Figura 53: Definición de un **Path** (II)

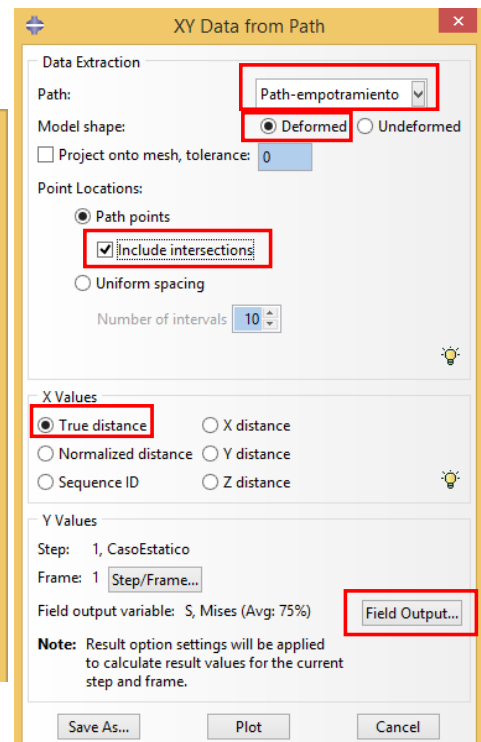
Una vez definido el **path** podemos definir el gráfico X-Y. Pulsa **Tools/XY Data/Create** tal como indica la Fig. 54a e indica que la fuente para las abscisas va a ser **Path** (ver Fig. 54b). En el siguiente cuadro de diálogo para definir el gráfico indica que el path es el que hemos creado *Path-empotramiento*, que seguiremos la deformada (**Deformed**, que queremos que incluya las intersecciones y que el valor de la abscisa es la distancia verdadera siguiendo el camino (revisa la Fig. 54c). Para seleccionar la variable que queremos que nos dibuje pulsa **Field Output...** (ver Fig. 54c).



(a) Comando **Tools/XY Data/Create**



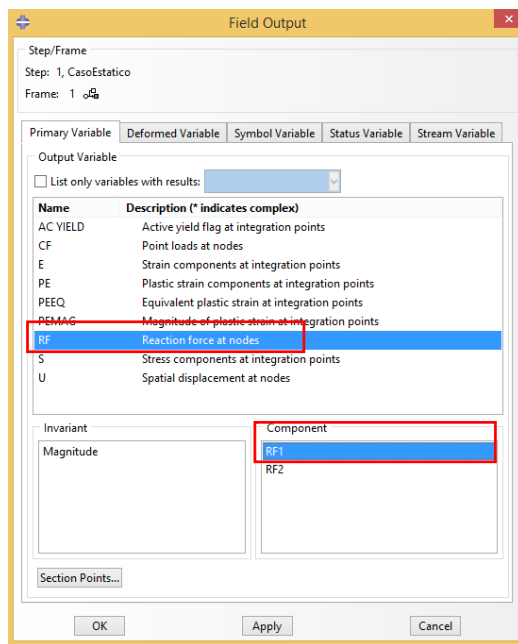
(b) Origen de los datos



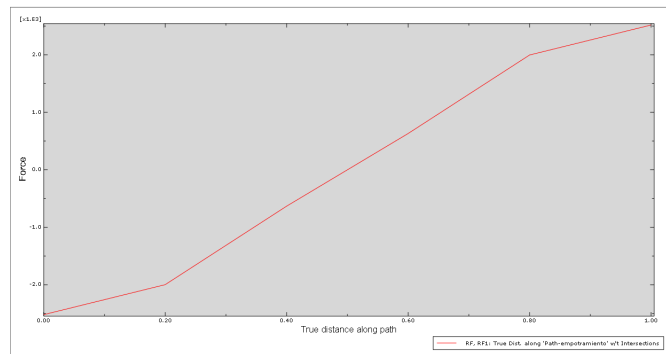
(c) Cuadro de características del gráfico X-Y

Figura 54: Definición curva X-Y (I)

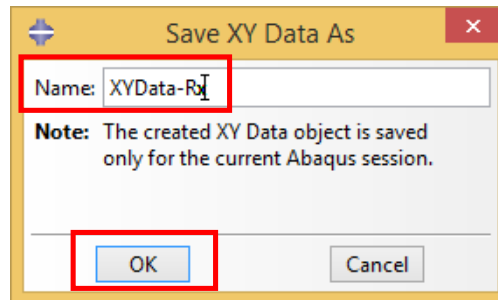
De las opciones que nos ofrece la siguiente ventana (ver Fig. 55a) elegimos la componente **RF1** de las fuerzas de reacción en los nodos (**RF**). De nuevo en el cuadro de diálogo **XY Data from Path** pulsamos **Plot** y debemos obtener la curva que muestra la Fig. 55b. Finalmente pulsamos **Save as...** y guardamos el gráfico con el nombre *XYData-Rx* (ver Fig. 55c).



a: Selección de la variable a dibujar



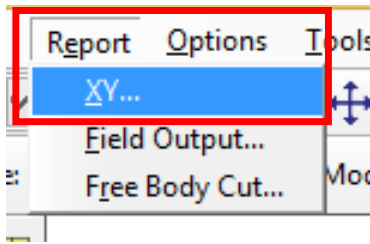
b: Valores de Rx en el lado del empotramiento



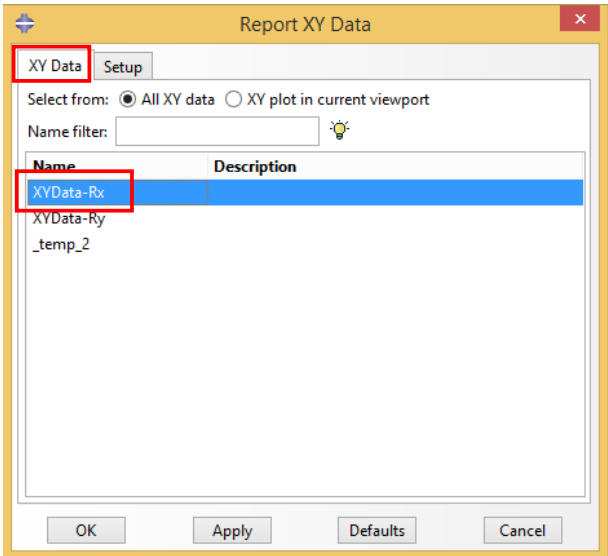
c: Nombre del gráfico (se guarda sólo para la sesión)

Figura 55: Definición curva X-Y (II)

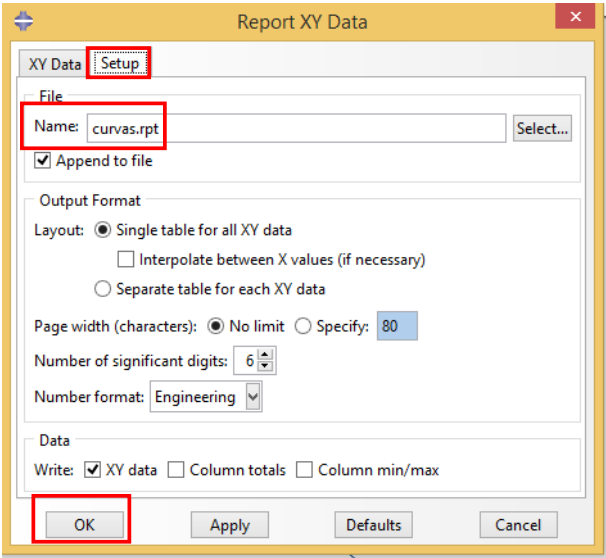
Finalmente buscamos guardar los datos de la curva que hemos creado en un fichero de texto para poder usarla en otro programa. Selecciona **Report/XY ...** (ver Fig. 56a) y, en la siguiente ventana selecciona la gráfica que hemos creado *XYData-Rx* en la pestaña **XY Data** (ver Fig. 56b) y el nombre de fichero **curvas.rpt** en la pestaña **Setup** (ver Fig. 56c). Si abres un fichero de texto deberías obtener algo parecido a los datos de la Fig. 56d.



(a) Comando **Report/XY**
...



(b) Escritura datos gráfico X-Y (I)



(c) Escritura datos gráfico X-Y (II)

X	XYData-Rx
0.	-2.51917E+03
200.E-03	-1.9974E+03
400.E-03	-631.678
600.E-03	631.677
800.E-03	1.9974E+03
1000.E-03	2.51917E+03

(d) Datos curva X-Y en formato texto

Figura 56: Definición curva X-Y (III)

2. Ejercicios propuestos

2.1. Ejercicio 1

En este ejercicio se pide modelizar el ejemplo clásico de la Membrana de Cook, describiéndose su geometría en la Fig. 57 (en mm). La membrana está empotrada en un extremo y sometido a esfuerzo cortante en el opuesto. El esfuerzo aplicado es $F = 1,8 \text{ kN}$, repartido a lo largo del lado derecho. Las propiedades elásticas del material son $E = 70 \text{ GPa}$ y $\nu = 0,33$, y su espesor es 1 mm. Trabajaremos bajo la hipótesis de tensión plana. La malla será de tipo estructurada, subdividiendo en 16 partes cada lado del contorno. Se utilizarán el mismo tipo de elemento que en la práctica principal.

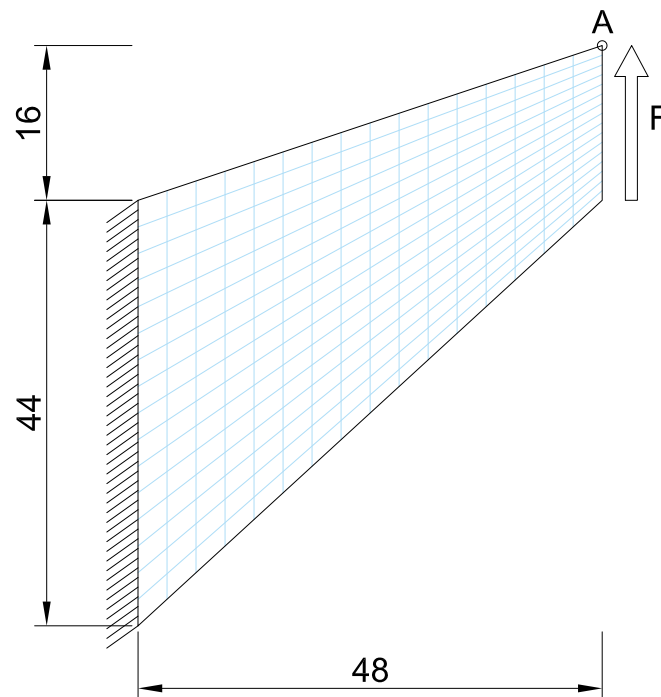


Figura 57: Descripción del modelo

1. ¿Cuál es el módulo del desplazamiento del punto A?

A: 0.807 mm

B: 1.125 mm

C: 0.689 mm

D: 1.333 mm

2. El valor máximo de la reacción en el empotramiento es:

A: 1203.0 N

B: 857.6 N

C: 560.3 N

D: 251.6 N

3. El valor máximo de la tensión de Von Mises es:

A: 1321.0 MPa

B: 854.2 MPa

C: 1598.3 MPa

D: 381.6 MPa

2.2. Ejercicio 2

A continuación se muestra un ejemplo que formalmente es muy similar al ejercicio resuelto en la sección anterior. Se trata de una pieza en L que está empotrada en uno de sus extremos y hay una fuerza repartida en la mitad de su borde superior. La Fig. 58 resume el ejemplo.

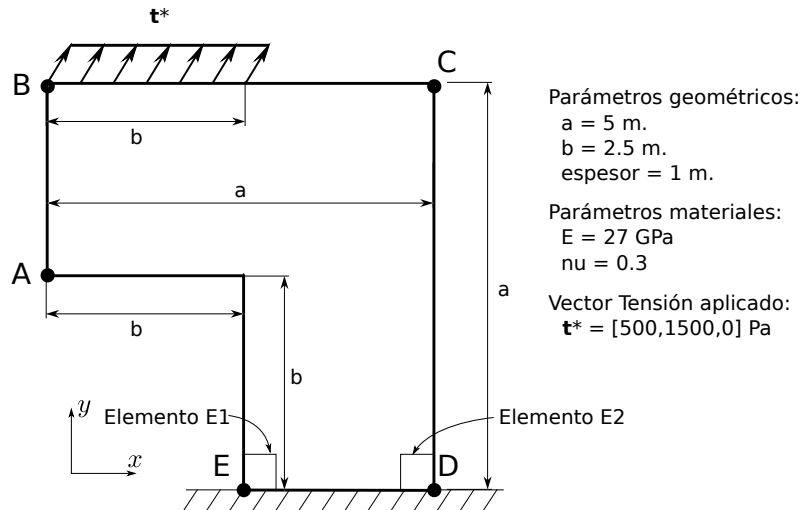


Figura 58: Descripción del modelo

Para este modelo, siguiendo el esquema de trabajo de la Sección 1, utilizando el mismo tipo de elemento cuadrilátero y un tamaño global de elemento de valor 0,3 metros, responde las siguientes preguntas:

1. ¿Cuál es el desplazamiento vertical del punto B?

A: $2.821 \cdot 10^{-6}$ m. B: $6.024 \cdot 10^{-6}$ m. C: $2.123 \cdot 10^{-5}$ m. D: $3.254 \cdot 10^{-9}$ m.

2. ¿Cuál es el desplazamiento horizontal del punto C?

A: $1.627 \cdot 10^{-6}$ m. B: $4.741 \cdot 10^{-6}$ m. C: $2.321 \cdot 10^{-5}$ m. D: $5.237 \cdot 10^{-9}$ m.

3. ¿Cuál es la componente σ_{22} del tensor de tensiones en el centroide del elemento E1?

A: 1782 Pa. B: 17413 Pa. C: 7174 Pa. D: 14904 Pa.

4. ¿Cuál es el valor máximo (en valor absoluto) de la tensión principal mínima σ_3 en el camino EC?

A: -851 Pa. B: -8801 Pa. C: -1984 Pa. D: -3366 Pa.

A: 710 Pa.

B: 1412 Pa.

C: 172 Pa.

D: 904 Pa.

4. Cuál es el valor máximo de la tensión principal máxima en el camino AF ?

A: 51 Pa.

B: 894 Pa.

C: 1384 Pa.

D: 323 Pa.

5. Cuál es la suma de las fuerzas de reacción horizontales en la base AB ?

A: -231.75 N.

B: -124.87 N.

C: -13 N.

D: -323 N.