



**UNIVERSIDAD DE SALAMANCA**  
**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA INDUSTRIAL**  
**BÉJAR**

# **El método de los elementos finitos aplicado al cálculo de pequeñas estructuras. Pre y post procesado**

**Autora: Laura Fuentes Calles**

**Tutor: D. José Alejandro Reveriego Martín**

**Año Académico: 2010/2011**

*Quede constancia de mi agradecimiento a D. José Alejandro Reveriego Martín, a cuya disposición constante, paciencia y rigor debe tanto el logro de este proyecto como a mí misma.*

## ÍNDICE

1.	Introducción al método de los elementos finitos .....	4
2.	Introducción al programa de elementos finitos <i>Abaqus</i> .....	12
3.	Ejemplos resueltos con <i>Abaqus</i> , comparados con la teoría clásica .....	20
3.1.	Ejemplo nº 1: Viga en voladizo con carga uniforme .....	21
3.2.	Ejemplo nº 2: <i>Bracket</i> con discontinuidad en el hombro .....	51
3.3.	Ejemplo nº 3: Semipórtico cargado puntualmente .....	74
3.4.	Ejemplo nº 4: Pórtico a dos aguas .....	114
4.	Ejercicio final: Transmisión y aislamiento del sonido en recintos .....	143
4.1.	Conceptos elementales de acústica .....	143
4.2.	Acústica arquitectónica .....	153
4.3.	Criterios para la estimación de la molestia del ruido .....	158
4.4.	Criterios y escalas para determinar la molestia del ruido en comunidades .....	163
4.5.	Sonómetro .....	167
4.6.	Simulación en <i>Abaqus</i> de la transmisión del ruido provocado por un bar a una vivienda adyacente .....	170
4.7.	Conclusiones del estudio .....	278
5.	Bibliografía .....	280

# 1. INTRODUCCIÓN AL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

## 1.1. *Introducción*

El método de los elementos finitos (MEF) ha adquirido un importante papel en la solución de problemas de ingeniería, ya que permite resolver casos que, hasta hace poco, era impensable resolver por los métodos matemáticos tradicionales de cálculo.

Una de las tareas propias del ingeniero es predecir el comportamiento de los sistemas para proceder a su diseño de la forma más eficaz. La solución adoptada, hasta hace poco, era crear prototipos del sistema, ensayarlos y modificarlos iterativamente para conseguir las mejoras necesarias. Esta técnica resultaba costosa y suponía un período largo de desarrollo del producto.

Ante la dificultad de modificar el prototipo y el elevado coste que suponía, se estudió la posibilidad de crear modelos matemáticos mediante el uso de conceptos físicos, químicos y matemáticos que definieran el comportamiento del cuerpo. Dicho modelo es un sistema de ecuaciones cuyas incógnitas representan magnitudes que permiten describir el comportamiento del cuerpo. Para poder predecir el comportamiento del cuerpo objeto de estudio, se debían resolver estas ecuaciones de manera cuantitativa. Estas ecuaciones resultaban difíciles de manejar y es aquí donde entra en juego el método de los elementos finitos.

El método de los elementos finitos permite realizar un modelo matemático de cálculo del sistema más fácil y económico de modificar que los prototipos y de una resolución matemática más sencilla que las ecuaciones tradicionales. El MEF es, sin embargo, un método aproximado de cálculo, debido a las hipótesis básicas del mismo, por lo que es necesario el uso de los prototipos tradicionales. Pero nos permite partir de un prototipo más cercano al diseño óptimo y reducir el número de modificaciones del mismo.

El método de los elementos finitos es conocido desde hace bastante tiempo, pero ha sido en los últimos años cuando ha sufrido un gran desarrollo gracias a los avances informáticos. Existen en la actualidad un gran número de programas a disposición del usuario que permiten realizar cálculos con elementos finitos. Hay que tener en cuenta que, para manejar correctamente estos programas, es necesario un profundo conocimiento, no sólo del material con el que se trabaja, sino también de los principios del MEF. Solo así se podrá garantizar que los resultados obtenidos con este método se ajustan a la realidad.

## 1.2. Historia del método de los elementos finitos

El nombre de método de los elementos finitos es reciente, pero el concepto se usa desde hace varios siglos. El concepto de método de los elementos finitos se basa en la discretización espacial y temporal de los sistemas estudiados y la aproximación numérica para encontrar soluciones a los problemas de ingeniería. El empleo de estas técnicas es conocido desde hace muchos siglos.

Se pueden encontrar muestras del empleo de estos métodos a lo largo de la historia de la humanidad. Las técnicas de aproximación mediante la división del cuerpo principal en pequeños cuerpos más fáciles de calcular, no es algo reciente. Los egipcios ya utilizaban métodos de discretizado para determinar el volumen de las pirámides que construían. Arquímedes (287-212 a. C.) utilizaba este método para hallar el volumen de los sólidos o áreas de las superficies. También en China se encuentran ejemplos de esta técnica de discretizado: el matemático Lui Hui (300 d. C.) empleaba un polígono regular de 3072 lados para calcular la longitud de las circunferencias. Lograba una aproximación al número  $\pi$  de 3,1416.

Los elementos finitos y su desarrollo han estado ligados principalmente al cálculo de estructuras en el campo aeroespacial. En los años cuarenta, Courant (*"Variational methods for the solution of problems of equilibrium and vibrations"*, citado por Carnicero) propone utilizar funciones polinómicas para formular problemas elásticos en subregiones triangulares, como un método especial del método variacional de Rayleigh-Ritz para aproximar soluciones.

Los creadores del método de los elementos finitos, tal y como se conoce hoy en día, fueron Turner, Clough, Martin y Topp (*"Stiffness and deflection analysis of complex structures"*, citado por Carnicero). Ellos introdujeron la aplicación de elementos finitos simples, como barras y placas triangulares con cargas en su plano, al análisis de estructuras aeronáuticas al utilizar los conceptos de discretizado y funciones de forma.

El trabajo de revisión de Oden (*"Some aspects of recent contributions to the mathematical theory of finite elements"*, citado por Carnicero) supone una importante contribución matemática al método de los elementos finitos. En los libros de Przemieniecki (*Theory of Matrix Structural Analysis*, Mc Graw-Hill, New York, 1968) y de Zienkiewicz y Holister (*Stress Analysis*, John Wiley, London, 1966) se utilizan los elementos finitos en el análisis estructural. Los libros de Zienkiewicz y Cheung (*The Finite Element Method in Structural and Continuum Mechanics*, Mc Graw-Hill, London, 1967) o Zienkiewicz y Taylor (*El método de los Elementos Finitos*, Mc Graw-Hill, Barcelona, 1994) presentan un amplio tratado sobre los elementos finitos y su aplicación a problemas de campos. En este último se demuestra que las ecuaciones del MEF se pueden obtener por el método de los mínimos cuadrados o el método de Galerkin. Esta interpretación del MEF suscitó un gran interés entre los matemáticos

para la solución de ecuaciones diferenciales lineales y no lineales. Tanto fue así que el MEF es considerado hoy día como una de las herramientas más potentes para la solución de problemas de ingeniería. Actualmente, este método se encuentra en una fase de gran expansión, con numerosas publicaciones cada año sobre su posible utilización en los problemas de ciencias aplicadas. Los ordenadores y su desarrollo han sido el vehículo de expansión de este método, al permitir solucionar las numerosas ecuaciones que se derivan de él en tiempos mínimos. Existe en el mercado oferta de software variado que permite el modelado y la síntesis de resultados de manera sencilla.

### *1.3. Conceptos generales del método*

La idea fundamental del método de los elementos finitos es la división de un continuo en un conjunto de elementos de pequeño tamaño unidos por una serie de puntos llamados nodos. Las ecuaciones que marcan el comportamiento del continuo marcarán también el comportamiento de los elementos. Se consigue así pasar de un sistema continuo (infinitos grados de libertad), gobernado por ecuaciones diferenciales, a un sistema con un número finito de grados de libertad, cuyo comportamiento está definido por un sistema de ecuaciones, lineales o no. Es decir, se trata de una técnica que sustituye el problema diferencial por otro algebraico para el que se conocen técnicas de resolución y que es aproximadamente equivalente.

En todo sistema objeto de análisis se puede distinguir:

- Dominio: es el espacio geométrico en el que se va a describir y analizar el sistema.
- Condiciones de contorno: variables conocidas y que marcan la respuesta del sistema, como cargas, desplazamientos, temperaturas, voltaje...
- Incógnitas: variables del sistema que deseamos conocer, teniendo en cuenta el efecto provocado por las condiciones de contorno sobre el sistema.

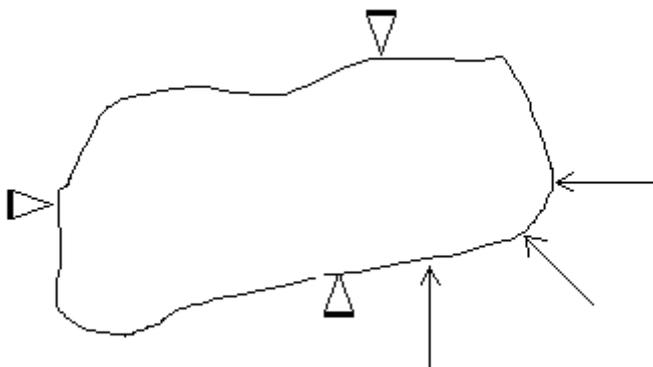
El método de los elementos finitos divide el continuo en estudio en elementos discretos. El continuo se divide mediante puntos (caso lineal), líneas (caso bidimensional) y superficies (caso tridimensional) imaginarios. De esta forma, se aproxima el dominio total en estudio mediante los elementos en los que se divide. Estos elementos constitutivos quedan definidos por una serie de puntos, o nodos, que los unen entre sí. Sobre estos nodos, se definen las incógnitas fundamentales del problema. Estas incógnitas son los grados de libertad de cada nodo, que son las variables que determinan el estado y posición del nodo. Para los elementos estructurales, estas incógnitas son los desplazamientos nodales. A partir de estas incógnitas se pueden determinar las demás incógnitas que puedan interesarnos.

Obtenido el valor de las incógnitas nodales, se puede plantear la ecuación diferencial que domina el comportamiento del continuo para el elemento. De esta forma, se obtendrán fórmulas que relacionan el comportamiento de cualquier punto del elemento con el valor que toman las incógnitas en los nodos. Estas funciones reciben el nombre de funciones de interpolación, ya que su función es interpolar el valor de las incógnitas entre los nodos que marcan un elemento para hallar los valores intermedios del mismo.

Se formula el problema mediante matrices por su fácil manipulación mediante ordenador. Una vez conocidas las matrices que marcan el comportamiento del elemento, se unen y se obtiene un sistema de ecuaciones algebraicas que ofrecen el valor de los grados de libertad en los nodos del sistema.

#### *1.4. Ecuaciones de equilibrio. Principio de los trabajos virtuales*

La gran parte de los problemas de medios continuos se expresan mediante ecuaciones diferenciales y condiciones de contorno sobre las funciones incógnita. A menudo es imposible obtener una solución cerrada y se opta por hacer una aproximación, en cuyo caso, se hace necesario expresar en forma integral el principio de los trabajos virtuales.



Se considera un continuo elástico como el mostrado en la figura. Está sometido a unas fuerzas superficiales  $\{t\} = \{t_x, t_y, t_z\}^T$  y a unas fuerzas por unidad de volumen  $\{X\} = \{X_x, X_y, X_z\}^T$ . Una fuerza por unidad de superficie es una presión y un ejemplo de fuerza por unidad de volumen podría ser el peso propio. El vector desplazamiento lo

denotamos como  $\{u\} = \{u, v, w\}^T$ . Las deformaciones que corresponden a estos desplazamientos son

$$\{\epsilon\} = \{\epsilon_{xx}, \epsilon_{yy}, \epsilon_{zz}, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}\}^T$$

Las tensiones producto de estas deformaciones son

$$\{\sigma\} = \{\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}\}$$

La ecuación de equilibrio para un elemento diferencial de volumen de ese continuo elástico es

$$\nabla\{\sigma\} + \{X\} = 0$$

En el vector  $\{X\}$  se están considerando incluidas las fuerzas de inercia por unidad de volumen,  $\{X\} = \{X\} - m \cdot \frac{\ddot{u}}{v} = \{X\} - \rho \cdot \ddot{u}$ . Si multiplicamos por la función de ponderación  $\{\delta u\}$  y la integramos en el volumen sobre el que actúa

$$\int_v \{\delta u\}^T \nabla\{\sigma\} dv + \int_v \{\delta u\}^T \{X\} dv = 0$$

si tenemos en cuenta que

- $\nabla(a \cdot b) = a \nabla b + b \nabla a$
- $\int_v \nabla a dv = \int_s a \vec{n} ds$

desarrollando esta relación se obtiene

$$\int_v \nabla a b dv = \int_v a \nabla b dv + \int_v b \nabla a dv, \int_v a \nabla b dv = \int_v \nabla a b dv - \int_v b \nabla a dv = \int_s a b \vec{n} ds - \int_v b \nabla a dv$$

Y aplicándolo a nuestro caso:

$$\int_v \{\delta u\}^T \nabla\{\sigma\} dv = \int_s \{\delta u\}^T \{\sigma\} \vec{n} ds - \int_v \{\sigma\} \nabla\{\delta u\} dv$$

$$\int_v \{\delta u\}^T \nabla\{\sigma\} dv + \int_v \{\delta u\}^T \{X\} dv = 0$$

$$\int_s \{\delta u\}^T \{\sigma\} \vec{n} \cdot ds - \int_v \{\sigma\} \nabla \{\delta u\} dv + \int_v \{\delta u\}^T \{X\} dv = 0$$

Asociando la función  $\{\delta u\}$  con un desplazamiento virtual, el operador  $\nabla$  que actúa sobre él lo convierte en una deformación virtual

$$\{\delta \epsilon\} = \nabla \{\delta u\}$$

El equilibrio de fuerzas exige que se cumpla que  $\{\sigma\} \cdot \{n\} = \{\tau\}$  y sustituyendo en la expresión antes hallada

$$\int_s \{\delta u\}^T \{\sigma\} \vec{n} \cdot ds - \int_v \{\sigma\} \nabla \{\delta u\}^T dv + \int_v \{\delta u\}^T \{X\} dv = 0$$

$$\int_s \{\delta u\}^T \{\tau\} ds - \int_v \{\sigma\} \{\delta \epsilon\}^T dv + \int_v \{\delta u\}^T \{X\} dv = 0$$

En la relación anterior se puede introducir la ley de comportamiento del material mediante la matriz elástica que exprese sus propiedades,  $[C]$ , de tal manera que

$$\{\sigma\} = [C] (\{\epsilon\} - \{\epsilon_0\}) + \{\sigma_0\}$$

donde  $\{\epsilon_0\}$  es el vector de deformaciones iniciales y  $\{\sigma_0\}$  es el vector de las tensiones iniciales. Si introducimos esta nueva relación en la expresión hallada y consideramos tensiones y deformaciones iniciales nulas, se obtiene

$$\int_s \{\delta u\}^T \{\tau\} ds - \int_v \{\sigma\} \{\delta \epsilon\}^T dv + \int_v \{\delta u\}^T \{X\} dv = 0$$

$$\int_v \{\delta \epsilon\}^T [C] \{\epsilon\} dv = \int_v \{\delta u\}^T (\{X\} - \rho \{\ddot{u}\}) dv + \int_s \{\delta u\}^T \{\tau\} ds$$

Esta ecuación es la formulación del principio de los trabajos virtuales que relaciona el sistema de cargas real y esfuerzos con el sistema virtual de desplazamientos.

### 1.5. Funciones de interpolación

Una vez que se ha discretizado el continuo en los elementos, se toma un conjunto de funciones, llamadas de interpolación, que definan de forma única el campo de desplazamientos en el elemento en función de los desplazamientos de los nodos que lo acotan:

$$\{u(x, y, z)\} = [N(x, y, z)] \{U\}$$

donde  $\{U\}$  es el vector de los desplazamientos nodales. Conocidos los desplazamientos en todos los nodos, se hallan las deformaciones:

$$\{\varepsilon\} = [D]\{u\}$$

En esta expresión,  $[D]$  es el operador diferencial de cada problema. Si se sustituye el valor del desplazamiento en esta última expresión

$$\{\varepsilon\} = [D][N]\{U\} = [B]\{U\}$$

se puede obtener el valor de las deformaciones en función de los desplazamientos nodales. Si se sustituye esta expresión en la ecuación del principio de los trabajos virtuales, se tiene

$$\int_v [B]^T [C] [B] \{U\} dv + \int_v [N]^T (\{X\} - \rho [N] \{\ddot{U}\}) dv + \int_s [N]^T \{t\} ds = 0$$

Si se reordena esta ecuación, se llega a un sistema:

$$[M] \{\ddot{U}\} + [K] \{U\} = \{P\}$$

siendo:

- Matriz de masa consistente

$$[M] = \int_v [N]^T \rho [N] dv$$

- Matriz de rigidez

$$[K] = \int_v [B]^T [C] [B] dv$$

- Matriz de cargas nodales consistentes

$$\{P\} = \int_v [N]^T \{X\} dv + \int_s [N]^T \{t\} ds$$

Con esta expresión general se pueden determinar las matrices elementales para todo tipo de discretización.

## *1.6 Síntesis de las características globales*

Las matrices descritas antes se deben calcular para cada elemento. Al hacer la transformación de coordenadas a las coordenadas unitarias del elemento, las matrices se expresan en función de parámetros geométricos para facilitar la integración. Para poder unir todas las matrices de todos los elementos, hay que hacer una segunda transformación a coordenadas globales para que todas las matrices estén expresadas respecto al mismo sistema de coordenadas y no al particular de cada elemento.

Con esta última transformación de las coordenadas, el acoplamiento en el sistema se realiza por el método directo, se suma para cada posición nodal la contribución realizada por cada elemento.

## *1.7. Imposición de condiciones de contorno. Solución*

Para poder solucionar el sistema de ecuaciones planteado, hay que imponer las condiciones de desplazamientos nodales que se conozcan. Este sistema puede subdividirse en dos términos: uno que tenga los desplazamientos impuestos y otro con los desconocidos. Cuando se resuelva este sistema, se tendrá la solución.

Con estos desplazamientos nodales se puede calcular el resto de las magnitudes, como las deformaciones o las tensiones.

## 2. INTRODUCCIÓN AL PROGRAMA DE ELEMENTOS FINITOS ABAQUS

En la actualidad, existe una gran oferta de software en el mercado que utiliza el método de los elementos finitos para resolver problemas de ciencias aplicadas e ingeniería. Para utilizar cualquiera de ellos de forma correcta, se hace necesario un profundo manejo del material con el que se trabaja y del método de los elementos finitos. Los programas actuales nos permiten trabajar con facilidad gracias al visor de diseño y de visualización de los resultados, de una forma intuitiva y sencilla.

El programa utilizado en este trabajo de fin de carrera es ABAQUS. Este software es capaz de solucionar problemas de multitud de campos de trabajo: problemas estructurales, de vibraciones, de sonido, de movimientos sísmicos, de fluidos, etc.

### 2.1. Antes de realizar un análisis por elementos finitos

Antes de empezar un análisis con cualquier programa de elementos finitos, conviene reflexionar sobre algunas cuestiones:

- **Objetivo del análisis.** Reflexionar sobre qué se pretende con el análisis (determinar tensiones, obtener distribuciones de temperatura, ver cómo evoluciona el sistema ante alguna clase de estímulo, calcular frecuencias propias...) será de utilidad a la hora de determinar el tipo de análisis del problema.
- **Geometría de análisis.** En ocasiones es mejor simplificar al máximo la geometría del problema si el análisis lo permite, ya que la mayoría de los detalles son insignificantes de cara al cálculo y lo único que conllevan es un consumo excesivo de los recursos del ordenador y de tiempo de cálculo. Por eso, es útil buscar las posibles simetrías, antisimetrías, axisimetrías, reducir a problemas de tensiones y deformaciones planas si el estudio lo permite, eliminar los detalles superfluos como las entallas de los elementos...  
Una vez estudiada la geometría se podrá decidir sobre los tipos de elementos a utilizar, sus características y tipos y características de los materiales a utilizar (módulo de elasticidad, conductividad, módulo de Poisson...).
- **Condiciones de contorno.** Al igual que en el caso de la geometría, las condiciones de contorno reales son conocidas, pero se debe analizar si son importantes e influyentes en el análisis que se quiere realizar. Por ejemplo, puede ocurrir que nuestro sistema esté sometido a un cambio brusco de temperatura en las condiciones reales del análisis, pero lo que se desee sea realizar un análisis modal para conocer su frecuencia natural, en cuyo caso no

depende del cambio de temperatura y se puede desestimar esta condición para no sobrecargar el sistema. Ya decididas las condiciones de contorno, se debe estudiar la forma de aplicarlas, si representan las condiciones reales del problema, si existe equilibrio (en caso de tratarse de un análisis estático). La elección de las condiciones de contorno adecuadas es una de las decisiones más complejas a la hora de trabajar con programas de elementos finitos.

- **Resultados.** Para saber si el análisis es correcto o si se ajusta a la realidad del problema que se quiere resolver, hay que tener unas nociones básicas sobre cómo va a responder. Por ejemplo, si se está estudiando la presión interior en una tubería y los resultados recogidos por el programa indican que, para una presión positiva, el radio de la tubería disminuye, se debe pensar que el problema no se ha realizado correctamente, ya sea por el modelado del cuerpo, por la aplicación de las cargas, por el mallado, etc.

Una vez analizados estos puntos destacados, se puede proceder a realizar el ejercicio con un programa de elementos finitos. Después del análisis y con los resultados obtenidos, conviene repasar estos puntos para detectar posibles errores.

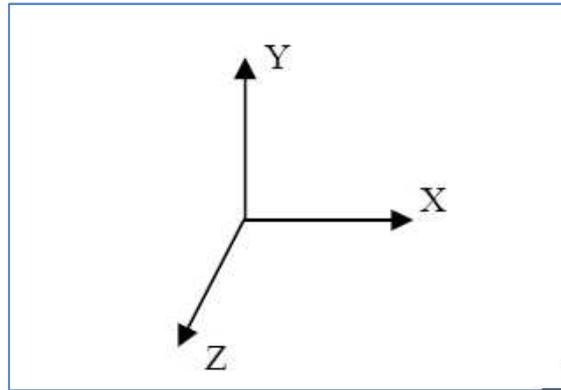
## 2.2. ABAQUS

*Abaqus* es un programa basado en el método de los elementos finitos diseñado para resolver problemas de ciencias aplicadas e ingeniería. Este software puede resolver casi todo tipo de problemas, desde los simples análisis lineales hasta complejas simulaciones no lineales. *Abaqus* pone a disposición del usuario una amplia librería de elementos finitos que posibilita modelar cualquier tipo de geometría del modelo que se pretenda analizar. También posee una gran lista de modelos que simulan el comportamiento de la mayor parte de los materiales usados en la actualidad en las distintas ramas de la ingeniería y la ciencia. Además, la empresa creadora del programa, Simulia, dispone de varios manuales de ayuda en línea y ejemplos de problemas resueltos con el programa en su página web para facilitar el manejo y aprendizaje del mismo por parte de los usuarios.

### 2.2.1. Definición del modelo en ABAQUS y su análisis

El primer paso para comenzar un análisis con el programa *Abaqus* es definir el modelo. La forma de comunicarnos con *Abaqus* es un archivo de datos de entrada, que puede ser creado usando un editor de texto o desde el preprocesador gráfico del programa, *Abaqus/Cae*. Como en todo programa informático, si se prefiere comunicarse con el programa a través de un editor de texto, hay que seguir una serie de normas de sintaxis muy rígidas. En este trabajo de fin de carrera se ha optado por usar el preprocesador gráfico del programa.

El sistema coordenado usado por el programa de elementos finitos es el sistema cartesiano, cuya convención de signos positivos es la mostrada en la figura inferior.



*Abaqus* ofrece los resultados de las componentes de esfuerzos y deformaciones en su sistema coordenado de referencia. La convención usada es:

$\sigma_{11}$	Esfuerzo en la dirección 1
$\sigma_{22}$	Esfuerzo en la dirección 2
$\sigma_{33}$	Esfuerzo en la dirección 3
$\tau_{12}$	Esfuerzo cortante en el plano 1-2
$\tau_{13}$	Esfuerzo cortante en el plano 1-3
$\tau_{23}$	Esfuerzo cortante en el plano 2-3

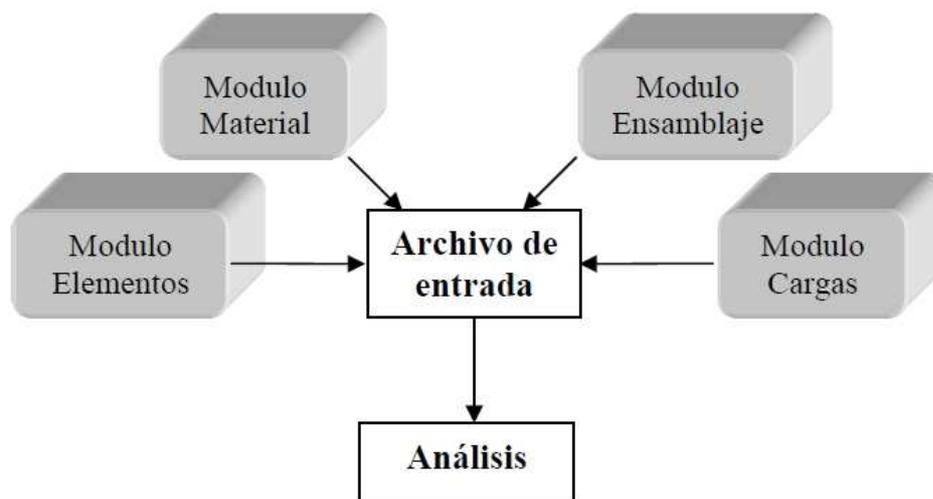
El programa no ofrece ninguna opción para especificar las unidades a utilizar. Por lo tanto, todas las unidades deben ser consistentes entre sí y pertenecer al mismo sistema de unidades. Por ejemplo, para el sistema internacional de unidades (SI), las unidades a utilizar para las dimensiones más comunes son:

Dimensión	Indicador	Unidad (SI)
Masa	M	kilogramo (kg)
Longitud	L	metro (m)
Tiempo	t	segundo (s)
Fuerza	F	Newton (N)

En *Abaqus* las rotaciones son expresadas en radianes y los ángulos en grados.

Las direcciones 1, 2 y 3 dependen del tipo de elemento finito a elegir. Para elementos sólidos, las direcciones son las direcciones espaciales globales, es decir, 1=X, 2=Y y 3=Z.

Este archivo de entrada contiene todos los datos necesarios para el análisis. Antes de comenzar el análisis, *Abaqus* comprobará todos esos datos, configurados con los distintos módulos que ofrece el programa, y nos informará de los errores existentes.

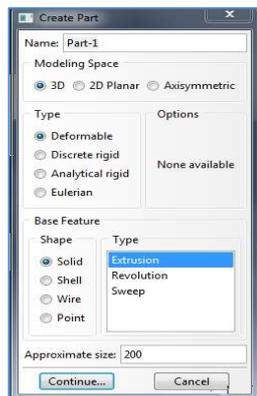


Los datos que necesita el modelo para comenzar el análisis pueden ser introducidos a través de los distintos módulos que ofrece el preprocesador. Al abrir el preprocesador gráfico del programa, aparece la siguiente pantalla:



En la parte superior, remarcado en rojo, aparece el menú desplegable de *Abaqus*. A la izquierda de la pantalla de diseño del preprocesador gráfico, en verde, está el menú propio de cada módulo. Para cambiar de módulo, basta elegir el módulo que se desee en el menú desplegable *Module* dentro del menú de *Abaqus*, remarcado en amarillo. En la parte inferior de la pantalla, en morado, se encuentra la línea de comandos del programa. A través de ella, el programa nos comunicará los pasos a seguir, los errores, órdenes en proceso y órdenes ejecutadas, etc.

Para crear el modelo, el primer paso es entrar en el módulo *Part* para crear la geometría del modelo a analizar. El preprocesador de *Abaqus* entra directamente en este módulo, como se puede ver en la imagen superior. Se crea el modelo con las opciones propias del módulo: pinchando en el menú desplegable de *Abaqus* en *Part* y después en *Create* o bien, en el botón . Así se accede a la ventana de *Create Part*, mostrada abajo, donde se deben elegir las características de nuestro modelo (espacio de trabajo, cuerpo deformable, euleriano o cualquiera de las opciones mostradas, forma de obtenerlo, tamaño del mismo, etc.). En esta ventana se debe elegir el tamaño aproximado de la ventana de trabajo. Este paso es importante porque puede deformar la manera en que el programa entiende las unidades que estamos utilizando.

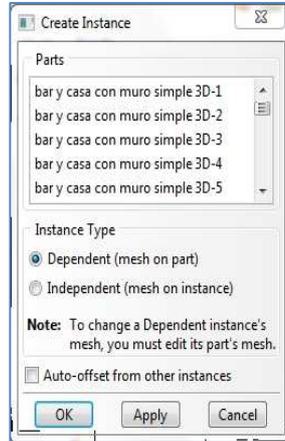


Una vez definida la geometría, se puede trabajar con los siguientes módulos que ofrece el programa.

En el módulo *Properties*, se pueden definir las características de los materiales y asignarlas al modelo. Al igual que antes, se puede hacer con el menú desplegable de *Abaqus* o con los iconos del menú propio del módulo. El botón *Create material*  nos permite definir los materiales y sus características. Con el botón *Create section*  creamos secciones que se podrán aplicar sobre las partes del modelo para adjudicarle las características de los materiales creados y con el botón *Assign section*  asignamos esas secciones a las partes del modelo.

En el módulo *Assembly* se pueden unir las distintas partes del modelo y definir las como *instances*. Para este fin, dispone del botón *instance part* , que permite crear

las *instances*, con la opción de crearlas dependientes o independientes, para mallar cada parte del modelo de forma independiente o no, como se ve en la figura inferior. También permite trasladar las instances para, en caso de haber diseñado el cuerpo de análisis por separado, poder unirlo después con el botón *Translate instance* .



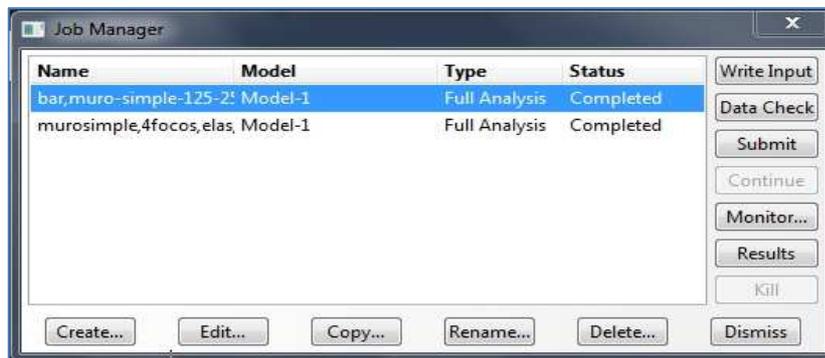
El siguiente módulo es *Step*. En este módulo se crea el paso de análisis, que debe adecuarse al análisis que se desea realizar. Con el botón *Create step*  se crea el paso y con los botones *Create field output*  y *Create history output*  le indicamos al programa las salidas que se necesitan de ese análisis, es decir, las variables incógnita que se desean conocer.

En el módulo *Interaction* se definen los contactos y uniones entre las distintas partes del modelo. Con los botones *Create interaction*  y *Create constraint*  se pueden definir esas uniones en los menús desplegables asociados a cada uno.

El siguiente módulo, *Load*, permite crear las cargas a las que va a estar sometido el sistema y las condiciones de contorno. Los botones *Create load*  y *Create boundary condition*  crean las cargas y las condiciones de contorno.

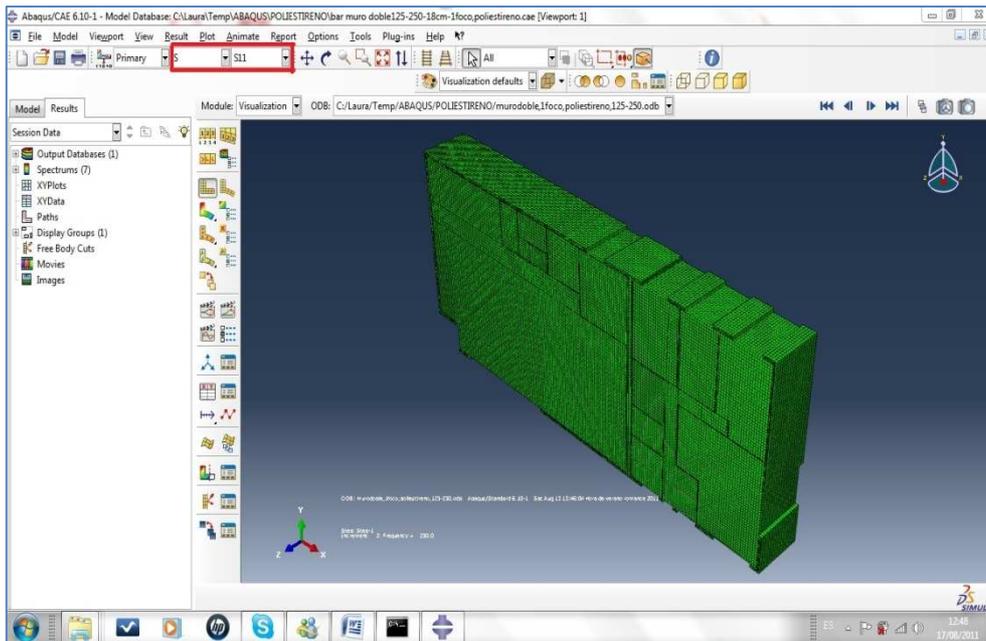
En el módulo *Mesh* se crea la malla de nodos para analizar el sistema. Con el botón *Seed part instance*  o *Seed edges*  se puede mallar el modelo por partes o por caras, respectivamente. Cuando los botones tienen una flecha en su esquina inferior derecha, como es el caso de estos dos botones, significa que es un botón desplegable y que hay más opciones ocultas. En el caso de estos dos botones, la opción oculta es borrar la malla efectuada. Con este módulo se puede elegir el tamaño de la malla, es decir, la distancia entre nodos. Con el botón *Assign mesh controls*  y *Assign element type*  se pueden definir las características de los elementos, como su forma, el tipo de integración, etc.

El siguiente módulo es el previo al análisis, el módulo *Job*. En él se debe crear el archivo de datos en el que *Abaqus* escribirá los resultados del análisis. Con el botón *Create job*  se crea ese archivo de escritura y se seleccionan las variables de ese análisis y con el botón *Job manager*  se accede a la pantalla mostrada en la imagen inferior, donde se ven los trabajos disponibles. Se puede comenzar el análisis pulsando en el botón *Submit*. Si es un paso dinámico, con varias partes en un mismo paso, se puede ver el avance del mismo pinchando en el botón *Monitor*.



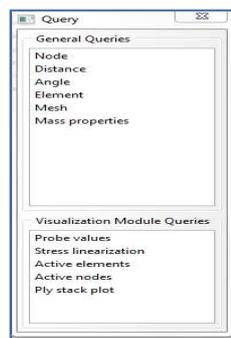
Mientras el programa esté calculando, en la columna de *Status* aparecerá el mensaje *Running*. Una vez el programa termina el análisis, lanza un mensaje en la columna de *Status* de la ventana *Job manager* y en la línea de comandos. El mensaje que debe figurar es el mostrado en la imagen superior, *Completed*. Si hay algún error, normalmente en la definición del problema, enviará un mensaje de error, *Aborted*.

Si el programa ha terminado el análisis sin errores y ofrece el mensaje *Completed*, se pueden ver los resultados pulsando el botón *Results* o bien cambiando el módulo a *Visualization*. Dentro de este módulo, el aspecto del visualizador del programa es el de la imagen inferior. En el menú del programa, remarcado en rojo en la imagen, se debe elegir la variable que queremos ver representada. Como ocurre en el caso de la imagen, esa variable puede tener subvariables. En este caso en concreto, la variable *S* (*Strain*) se subdivide en otras variables, como lo son los esfuerzos en las distintas direcciones o el esfuerzo *Misses* y *Tresca*, por ejemplo.



Para poder ver la representación gráfica por colores de la variable elegida, se debe pinchar en el botón *Plot contours* en su opción deformada  o sin deformación .

Para obtener el valor de la variable de un nodo en concreto, se debe hacer clic en el botón *Query information* , que despliega la ventana mostrada abajo. Seleccionando la opción *Probe values*, se puede elegir el nodo deseado por coordenadas o directamente sobre la imagen. También ofrece otras opciones, como escribir un archivo de datos con los valores nodales de una línea trazada sobre el dibujo, *Stress linealization*.



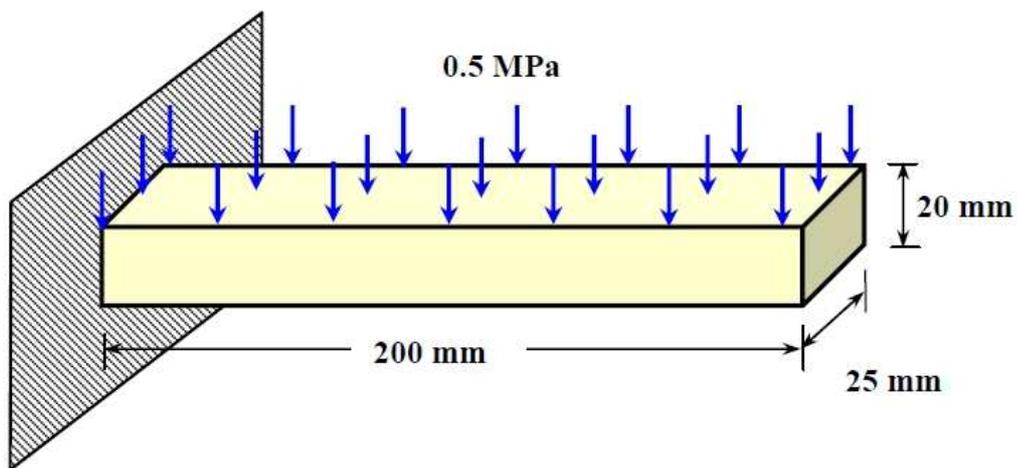
El programa ofrece múltiples posibilidades que no han sido descritas en este escueto resumen. A lo largo del trabajo, con los ejemplos desarrollados, se verán algunas de estas posibilidades, aunque tratándose de un programa de estas características, la variedad de problemas que se podría resolver es muy extensa y sería imposible describir cabalmente toda la oferta de *Abaqus*.

### 3. EJEMPLOS RESUELTOS CON *ABAQUS*, COMPARADOS CON LA TEORÍA CLÁSICA

A continuación, se procederá a resolver varios problemas de mecánica general para aprender a utilizar algunas de las herramientas que *Abaqus* ofrece. En estos ejemplos genéricos, se comprobará la diferencia existente entre los resultados ofrecidos por el programa de elementos finitos y la teoría tradicional utilizada para resolver analíticamente estos ejercicios. Esta diferencia se debe al método de análisis del programa, basado en los elementos finitos. Este método no ofrece resultados exactos como la teoría clásica, ofrece una aproximación de pequeño error. La diferencia se debe a que el método de los elementos finitos aproxima las ecuaciones reales a otras más rápidas y sencillas de resolver, como ya se vio en la introducción al método de los elementos finitos de este trabajo.

### 3.1. EJEMPLO Nº 1: VIGA EN VOLADIZO CON CARGA UNIFORME

El presente ejemplo pretende mostrar el proceso de modelado con *Abaqus/CAE*. Se describirá cada uno de los pasos dados a través de los módulos del programa de elementos finitos para crear y analizar un modelo simple. Para ilustrar estos pasos, se creará un modelo de una viga en voladizo cargada uniformemente en su superficie superior, como se muestra en la figura inferior. El material tiene un módulo de Young  $E=209 \times 10^3$  MPa y un coeficiente de Poisson  $\nu=0,3$ . Se pretende hallar la tensión máxima en la pieza.



#### 3.1.1. Creación de una parte

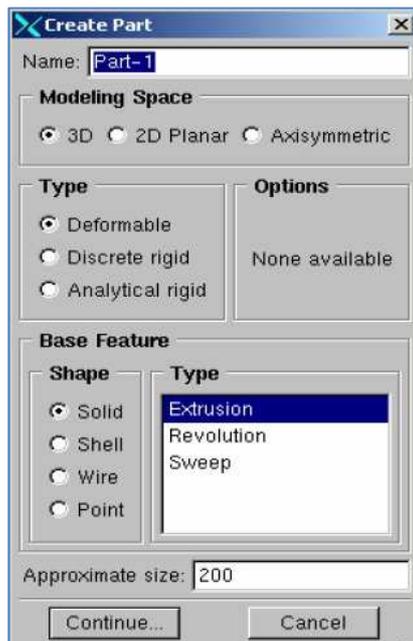
- Se abre *Abaqus/CAE* para comenzar el modelado de la viga en voladizo. El módulo *Part* se carga automáticamente. Si no fuera así, la forma de acceder a los distintos módulos es a través de la lista situada debajo del menú de *Abaqus*, como ya se destacó en la introducción al programa de elementos finitos de este trabajo.

Al abrir el módulo *Part*, se despliega el menú del módulo en el lado izquierdo de la ventana o *viewport* de *Abaqus/CAE*. Con los botones de este menú se puede acceder a las opciones del módulo rápidamente sin necesidad de utilizar el menú desplegable de *Abaqus*. Cada módulo despliega su propio grupo de herramientas. En este ejemplo se manejarán las dos formas de acceder a las herramientas: por el menú propio de cada módulo o por el menú desplegable de *Abaqus*.

- En la barra de menú se selecciona *Part* → *Create* o en el menú del módulo se selecciona el icono  para crear la viga.

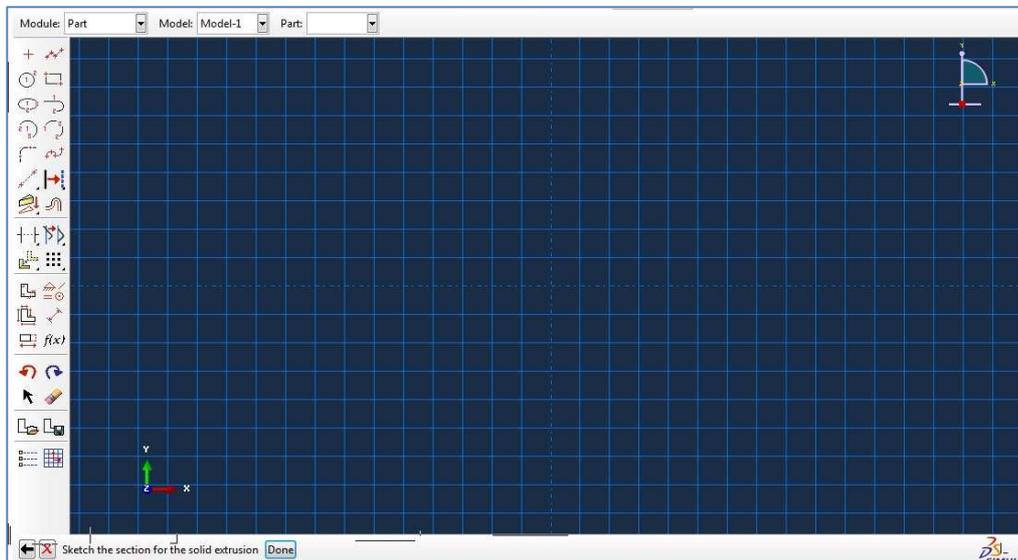


Aparece el cuadro de diálogo *Create part*. En este cuadro se debe dar un nombre a la parte que se va a crear, seleccionar el espacio de trabajo, el tipo de modelado y la forma y tipo de la base característica. También se debe aproximar el tamaño del *Sketcher*. Después de crear la parte, se puede editar y reescribir, pero no se puede cambiar su espacio de modelado, tipo o base característica.



- Para este ejemplo, vamos a crear un cuerpo sólido tridimensional deformable. Se creará el perfil de la viga en dos dimensiones y se extruirá para obtener el cuerpo deseado. Las opciones a elegir son las siguientes:
  - Name: Viga
  - Modeling Space: 3D
  - Type: Deformable
  - Base Feature Shape: Solid
  - Base Feature Type: Extrusion
  - Aproximate Size: 250

- Se hace clic en *continue* para cerrar la caja de diálogo y acceder al *Sketcher*. *Abaqus/CAE* entra automáticamente en el *Sketcher*, que es la ventana cuadriculada donde se dibujarán los perfiles de las partes a extruir. Como se puede ver en la imagen inferior, a la izquierda de la ventana cuadriculada de diseño aparece el menú del *Sketcher*. Con los iconos que aparecen en él, se puede diseñar el perfil deseado en dos dimensiones. *Abaqus/CAE* entra automáticamente en el *Sketcher* cada vez que se crea o edita una parte. Cuando se haya terminado de dibujar el perfil, se puede salir del *Sketcher* haciendo clic con el botón derecho del ratón en la ventana y cancelar el procedimiento, *Cancel procedure*, para después volver a presionar el botón derecho del ratón y hacer clic en *Done*.



Las características de esta ventana cuadriculada son útiles a la hora de dibujar los perfiles:

- Las líneas de la cuadrícula ayudan a colocar el cursor y alinear objetos en la ventana.
- Las líneas discontinuas marcan los ejes "X" e "Y", que se cortan en el origen de coordenadas del *Sketcher*.
- Al seleccionar una herramienta del *Sketcher*, las coordenadas del cursor aparecen en la esquina superior izquierda de la ventana.

El sistema de coordenadas de referencia de la esquina inferior izquierda indica la relación entre el plano de dibujo y la orientación de la parte dibujada.

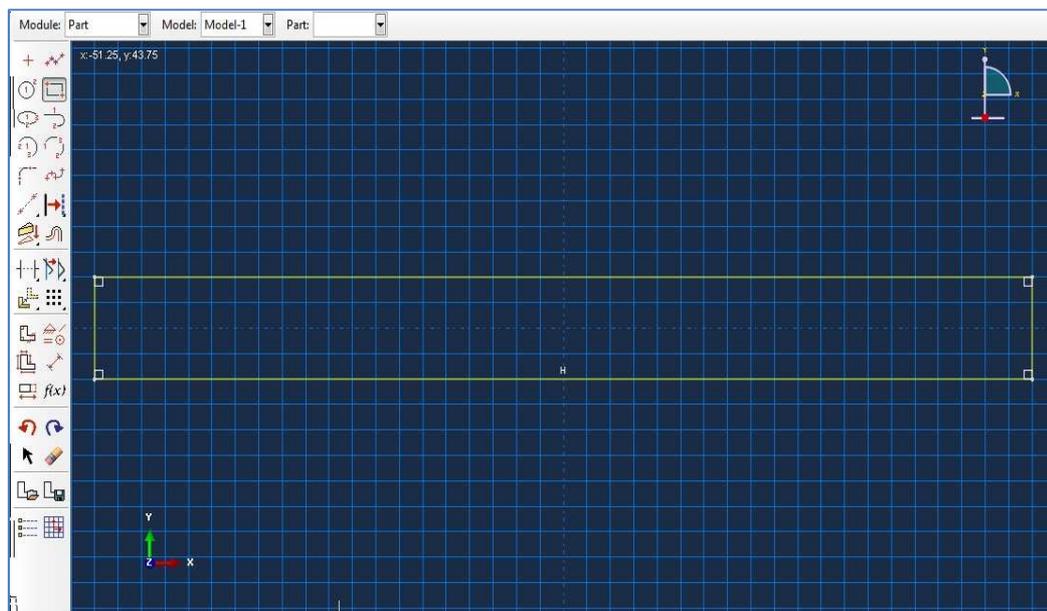
- Para obtener el perfil de la viga en voladizo, se dibuja un rectángulo en el *Sketcher*: se hace clic en el icono  o a través del menú, se selecciona *Add*→*Line*→*Rectangle*.

*Abaqus/CAE* envía mensajes al usuario desde la línea de comandos para guiar el procedimiento. En este caso, el mensaje es el mostrado en la imagen inferior.



Los botones de la izquierda, nos permiten anular la acción o volver al paso anterior.

- Se dibuja el rectángulo en la ventana de dibujo. Se puede obtener el rectángulo deseado, de 200 mm de base y 20 de altura, introduciendo las coordenadas (-100,10) y (100,-10) o seleccionándolas con el cursor directamente sobre la pantalla. Cuando se termina el dibujo, se debe hacer clic con el botón derecho del ratón y presionar *Cancel procedure* o simplemente pinchar una segunda vez sobre la herramienta del menú  para desactivarla. Si se pincha sobre el icono , la pantalla se ajusta al tamaño del objeto y se obtiene esta imagen:



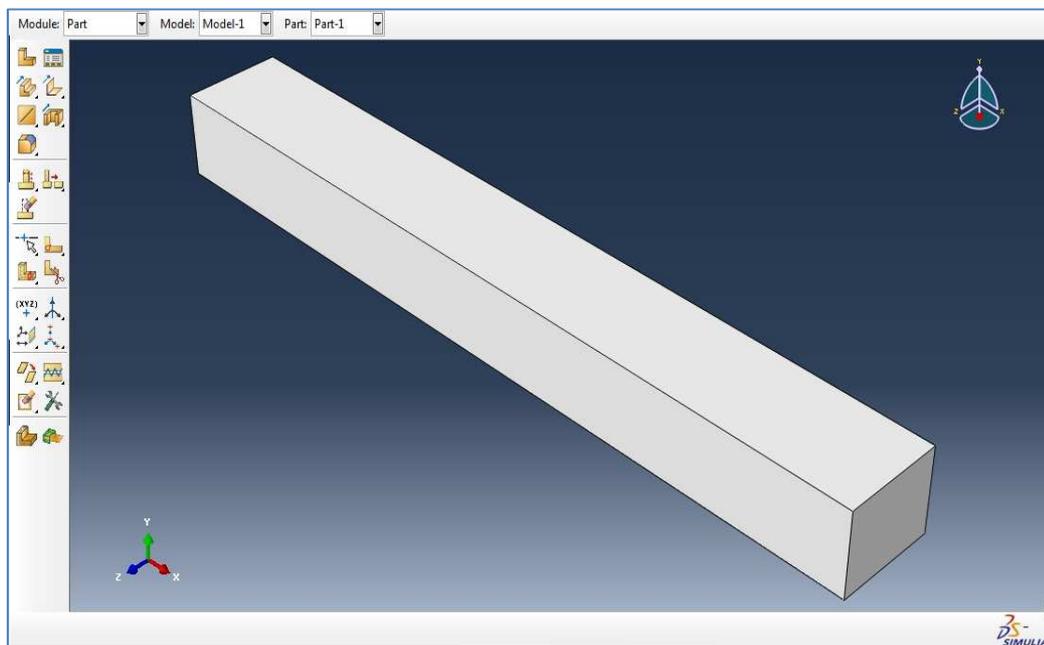
- Si se comete algún error al dibujar el modelo, se puede hacer clic en el botón  y seleccionar la línea que se desea borrar o seleccionar, a través de la

barra de menú, *Edit*→*Delete Entities*. Para borrarlas, hay que hacer clic con el botón derecho del ratón en la ventana y presionar *Done* o hacer clic en el área de avisos en *Done*. Si no se realiza esta última acción, aunque las líneas estén seleccionadas, no se borrarán. Para terminar de utilizar la herramienta *Delete*, se debe pulsar con el botón derecho del ratón en el área de dibujo y seleccionar *Cancel procedure* o desactivar el icono de la herramienta en el menú del *Sketcher*.

También se puede actuar sobre la última acción realizada con los botones  y .

- En el área de avisos o haciendo clic en el botón derecho del ratón, se presiona sobre *Done* para confirmar que el perfil dibujado en pantalla es el que se extruirá y salir del *Sketcher*.
- Al haber seleccionado en la ventana *Create part* el procedimiento de extrusión para la creación de la parte, *Abaqus/CAE* muestra ahora la caja de diálogo *Edit Base Extrusion*, donde se pide la distancia a extruir en el dibujo del perfil creado. Para nuestro caso, se escribirá en *Depth* 25 y se elegirán los parámetros por defecto de *Options*, ya que estos valores son para cuerpos obtenidos por extrusión con revolución y no es nuestro caso. Se presiona *OK* para salir de esta ventana de diálogo.

*Abaqus/CAE* muestra una vista isométrica de la pieza creada, como se ve en la figura inferior.



- Se guarda el modelo en la base de datos del modelo del programa. En la barra del menú, pinchar en *File* → *Save*. Aparece la ventana *Save Model Database As*. Se pone un nombre en *File Name* y se guarda. No es necesario escribir la extensión del archivo, el programa lo hace automáticamente. Con este paso,

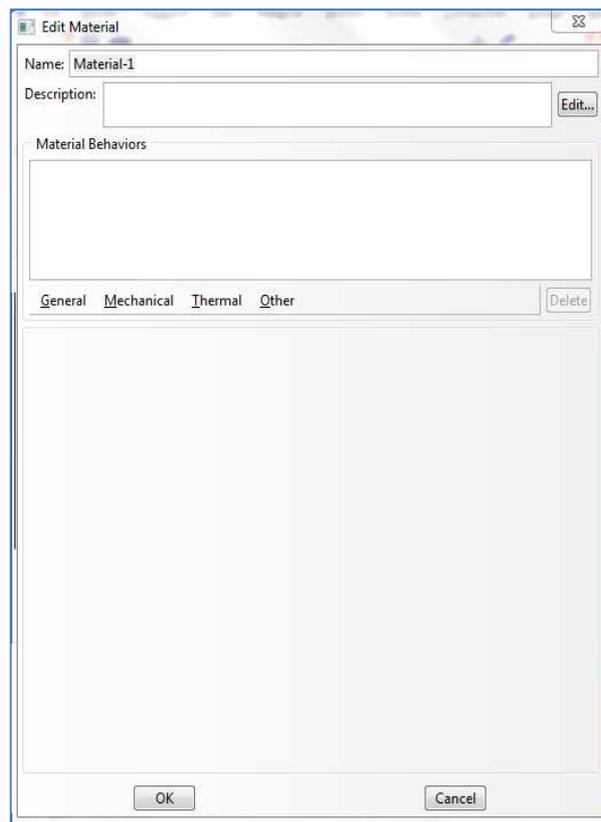
*Abaqus/CAE* ha almacenado la base de datos del modelo en un archivo nuevo y vuelve al módulo *Part*. Ahora la barra de título de la ventana de *Abaqus/CAE* muestra la dirección y el nombre de la base de datos del modelo creado.

### 3.1.2. Creación de un material

Para crear un material y definir sus propiedades se utilizar el módulo *Property*. Para este ejercicio, se creará un material elástico lineal con módulo de Young  $E = 209 \times 10^3$  MPa y una relación de Poisson  $\nu = 0,3$ .

Para definir el material, los pasos a seguir son los siguientes:

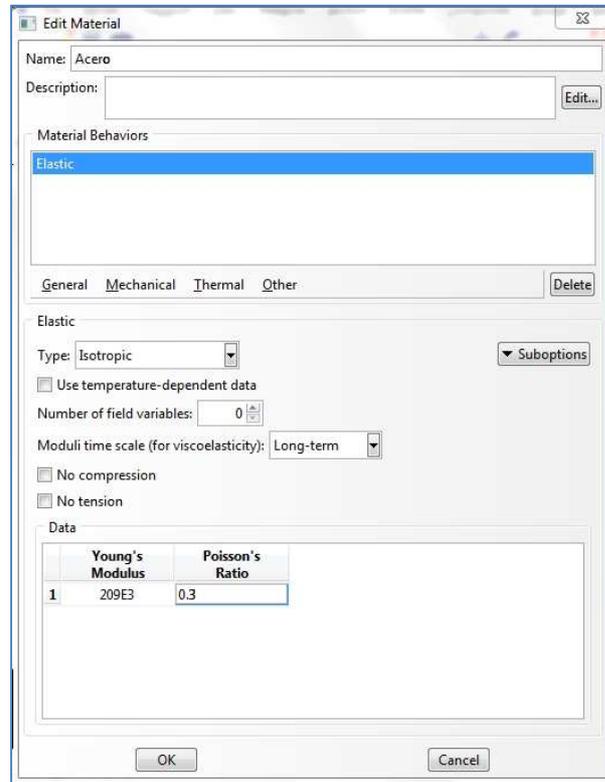
1. Se selecciona el módulo *Property* en el menú desplegable de módulos.
2. En la barra de menú de *Abaqus*, se selecciona *Material* → *Create* o, en el menú del módulo, se hace clic en  para crear el material nuevo. Aparece la ventana *Edit Material*.



Los datos a incluir en esta ventana son los siguientes:

- Nombrar al material como *Acero*.

- En la barra de menú del editor del material, seleccionar *Mechanical*→*Elasticity*→*Elastic*. Esta acción despliega el menú de los datos elásticos.
- Escribir el valor del módulo de Young y el del coeficiente de Poisson en sus campos. Las demás opciones dejarlas por defecto porque no se desea ninguna clase de dependencia de la temperatura ni se trata de un material viscoelástico.



- Se hace clic en *OK* para crear el material y salir del editor de materiales.

### 3.1.3. Creación de una sección

Para asignar las características de un material a un modelo, se debe crear una sección de ese material. Para ello, se utilizar el módulo *Property*. Creada la sección deseada, se puede usar uno de estos dos métodos para asignar la sección a la parte creada:

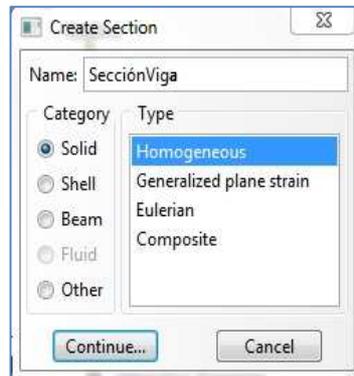
- Se puede seleccionar una región de la parte creada y asignar la sección a la región tomada.
- Se pueden utilizar las herramientas del módulo para crear un grupo homogéneo que contenga la región y asignar la sección al grupo.

En este caso, se va a crear una sola sección sólida homogénea que se asignará a la viga seleccionándola desde la ventana. Una sección sólida homogénea es la sección

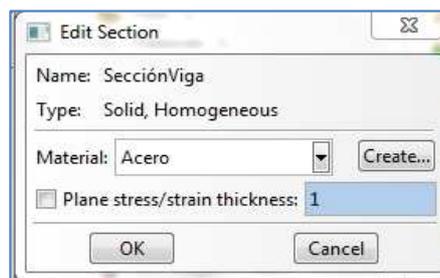
más simple que se puede definir. Solo incluye una referencia al material y un espesor del plano esfuerzo/deformación.

Los pasos a seguir son los siguientes:

- En el menú de *Abaqus*, seleccionar *Section*→*Create* o del menú del módulo, hacer clic en el icono . Aparece la ventana *Create Section*.



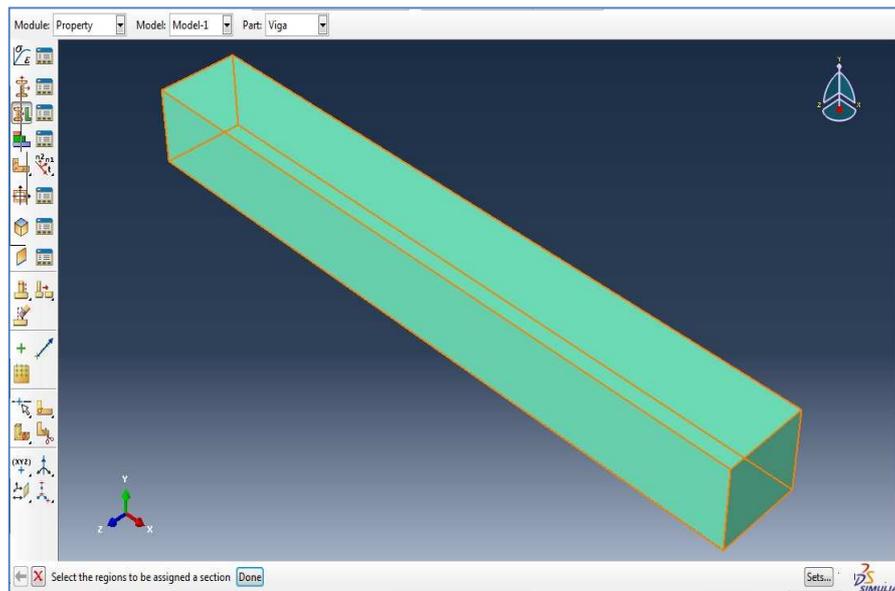
- En la ventana *Create Section*:
  - Se nombra la sección, por ejemplo *SecciónViga*.
  - En la lista *Category* se acepta *Solid*.
  - En la lista *Type* se acepta *Homogeneous*.
  - Se hace clic en *Continue*.
  - Aparece la ventana *Edit Section*.



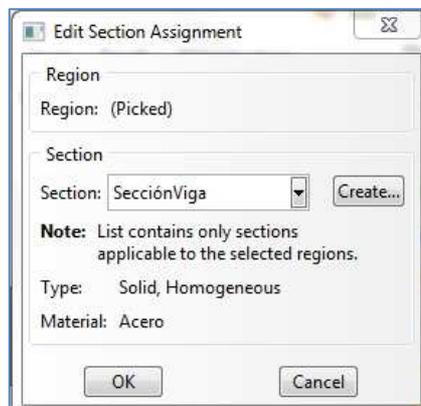
- En la ventana *Edit Section*:
  - Se aceptan el material *Acero* y el valor de *1* para el espesor del plano de esfuerzo/deformación
  - Se hace clic sobre *OK*.

Una vez creada la sección deseada, se debe asignar esta sección al cuerpo que comparta las características de esa sección, en este caso, la viga. Los pasos a seguir para hacerlo son:

- En el módulo *Property*, se selecciona del menú desplegable *Assign*→*Section* o del menú propio del módulo se hace clic en el icono .
- Se hace clic en cualquier lugar sobre la viga para seleccionarla como la región a la que se asignará la sección. *Abaqus/CAE* resalta la viga para mostrar la parte que ha sido seleccionada.



- Se hace clic en *Done* del área de avisos o se hace clic con el botón derecho del ratón en la ventana y se selecciona *Done*.
- Aparece la ventana *Assign Section* con una lista de las secciones existentes. En este caso, hay una única sección.
- Se acepta la sección *SecciónViga* y se hace clic en *OK*.



- Con este último paso, *Abaqus* asigna *SecciónViga* al cuerpo y cierra el cuadro de diálogo.

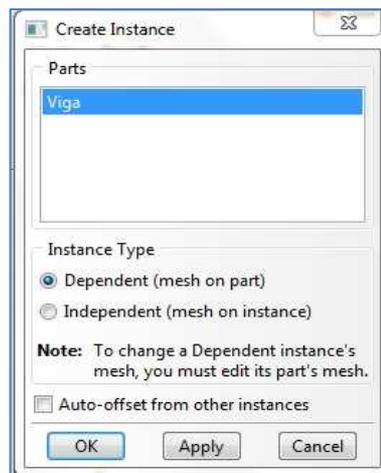
### 3.1.4. Ensamblado del modelo

El modelo creado para el análisis suele ser más complejo que la viga de este ejemplo y se hace necesario crearlo en varias partes. Cada parte que se crea está orientada en su propio sistema coordenado y es independiente de las otras partes del modelo. Con el módulo *Assembly* se puede definir la geometría del modelo finalizado con la creación de instancias, *Instances*, de cada parte y con la posterior ubicación relativa de cada una respecto a las otras, ensamblándolas en un sistema global de coordenadas. *Abaqus/CAE* coloca la instancia de manera que el origen del dibujo que definió el perfil rectangular de la viga coincida con el sistema de coordenadas global.

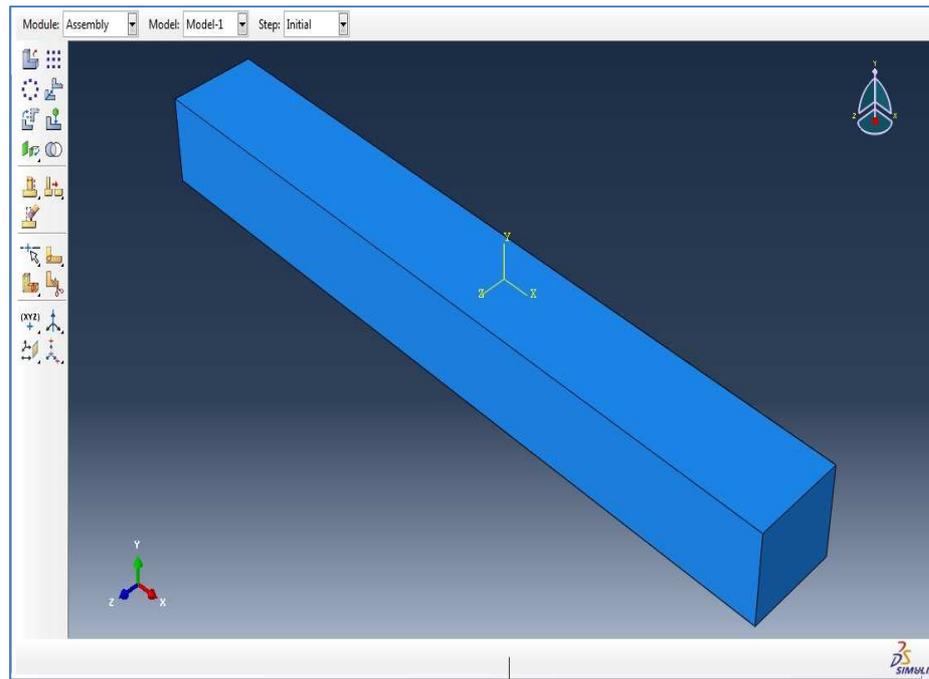
Para ensamblar el modelo se siguen los siguientes pasos:

- Se selecciona el módulo *Assembly* de la lista de módulos.
- Se selecciona *Instance/Create* en el menú desplegable de *Abaqus* o se

hace clic en el icono  en el menú propio del módulo. Aparece la ventana *Create Instance*.



- Se acepta en *Parts* la única opción *Viga*, se selecciona *Dependent* por las razones ya explicadas en la introducción al programa y se hace clic en *OK*.
- *Abaqus/CAE* crea una instancia de la viga en voladizo y la muestra usando una perspectiva isométrica, con el sistema de referencia de la instancia. Un segundo sistema de referencia, ubicado en la parte inferior izquierda, indica el origen y orientación del sistema coordenado global.



En la barra de herramientas del menú de *Abaqus/CAE* existen algunas herramientas disponibles para ayudar a examinar el modelo.

				
Auto-Fit View	Pan-View	Rotate View	Magnify View	Box Zoom View

Por ejemplo, si pulsamos sobre el icono  , dentro de la ventana de diseño aparece un círculo. Teniendo pulsado el botón izquierdo del ratón y arrastrándolo sobre la ventana, se puede rotar el modelo y observarlo desde todas sus vistas. Si se hace clic con el botón derecho en la ventana y se presiona *Cancel Procedure* o pinchando una segunda vez sobre el icono, se desactiva la herramienta.

### 3.1.5. Configuración del análisis

Con el modelo ya creado, se puede iniciar el módulo *Step* para configurar el análisis. Para la viga de este ejemplo, el análisis estará constituido por dos pasos:

- Un paso inicial en el que se aplicará una condición de borde que restringe uno de los extremos de la viga.
- Un paso estático general en el que se aplicará la carga de presión en la cara superior de la viga.

*Abaqus* genera el paso inicial automáticamente. Para crear el resto de los pasos del análisis, se debe utilizar el módulo *Step*. Con este módulo también se puede configurar la salida de datos para cualquier paso en el análisis.

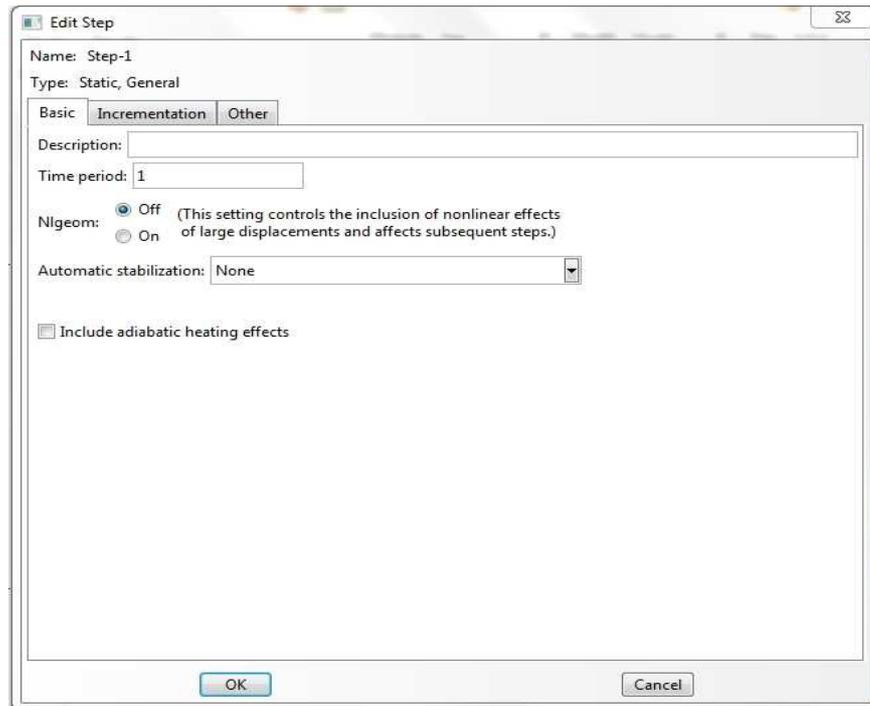
Para crear un paso estático general:

- Se selecciona el módulo *Step* en la lista de módulos.
- En la barra del menú de *Abaqus* se selecciona *Step*→*Create* o, en el menú propio del módulo, se hace clic en el icono .
- Aparece la ventana *Create Step* con una lista de todos los procedimientos generales y el nombre del paso por defecto *Initial*. Los procedimientos de análisis general son aquellos que pueden ser usados en análisis de respuesta lineal y no lineal.

Dentro de esta ventana, se debe nombrar el nuevo paso (*PasoViga*) y seleccionar *Static General* dentro de los tipos de paso que ofrece. Se hace clic en *Continue* para continuar con el análisis.



- Aparece la ventana *Edit Step* con las opciones por defecto para un paso estático general. La pestaña *Basic* está seleccionada por defecto. Se escribe una pequeña descripción en el campo *Description*. Para este ejemplo no es necesario hacer una descripción porque el análisis consta de un solo paso, pero en otros análisis puede haber varios pasos y es conveniente identificar cada uno con una mínima descripción del objeto del paso.



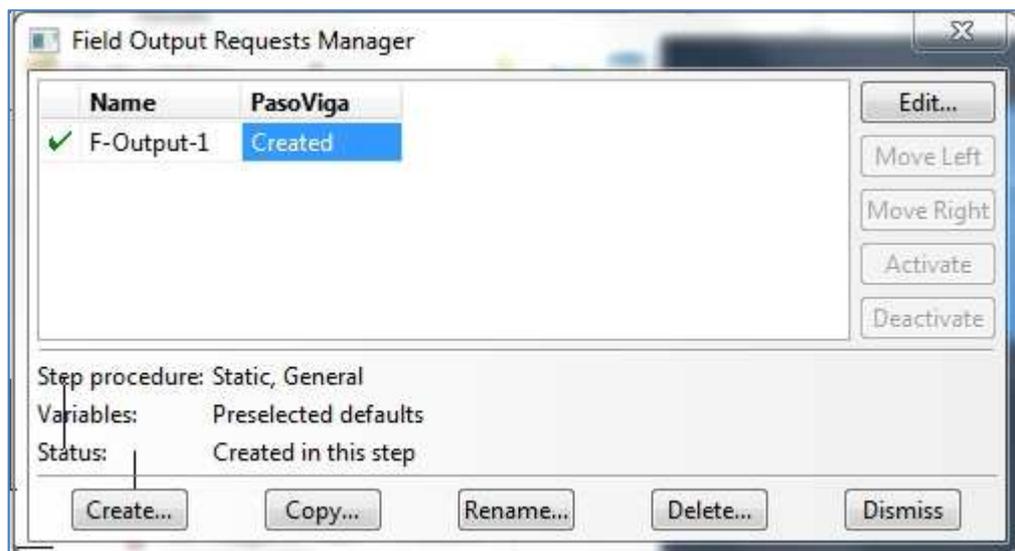
Si se hace clic sobre la pestaña *Incrementation* se podría variar la forma de aplicar la carga. En otros ejemplos se utilizará esta opción para aplicar la carga de forma gradual. En este ejercicio no será necesario. Con la pestaña *Other* se puede actuar sobre la forma de resolver matemáticamente el ejercicio. En este ejercicio se utilizarán los valores por defecto del programa. Se hace clic sobre *OK* para crear el paso y salir de esta ventana.

Cuando el modelo se somete a análisis, *Abaqus/Standard* o *Abaqus/Explicit* escribe los resultados del análisis en una base de datos de salida. Si se crea otro paso adicional, el programa genera automáticamente unas salidas por defecto, pero pueden no coincidir con las salidas deseadas por el usuario del programa. Para poder modificar las salidas creadas por el programa, se puede usar el *Field Output Request Manager* y el *History Output Request Manager*. Lo que se consigue con estas dos herramientas es:

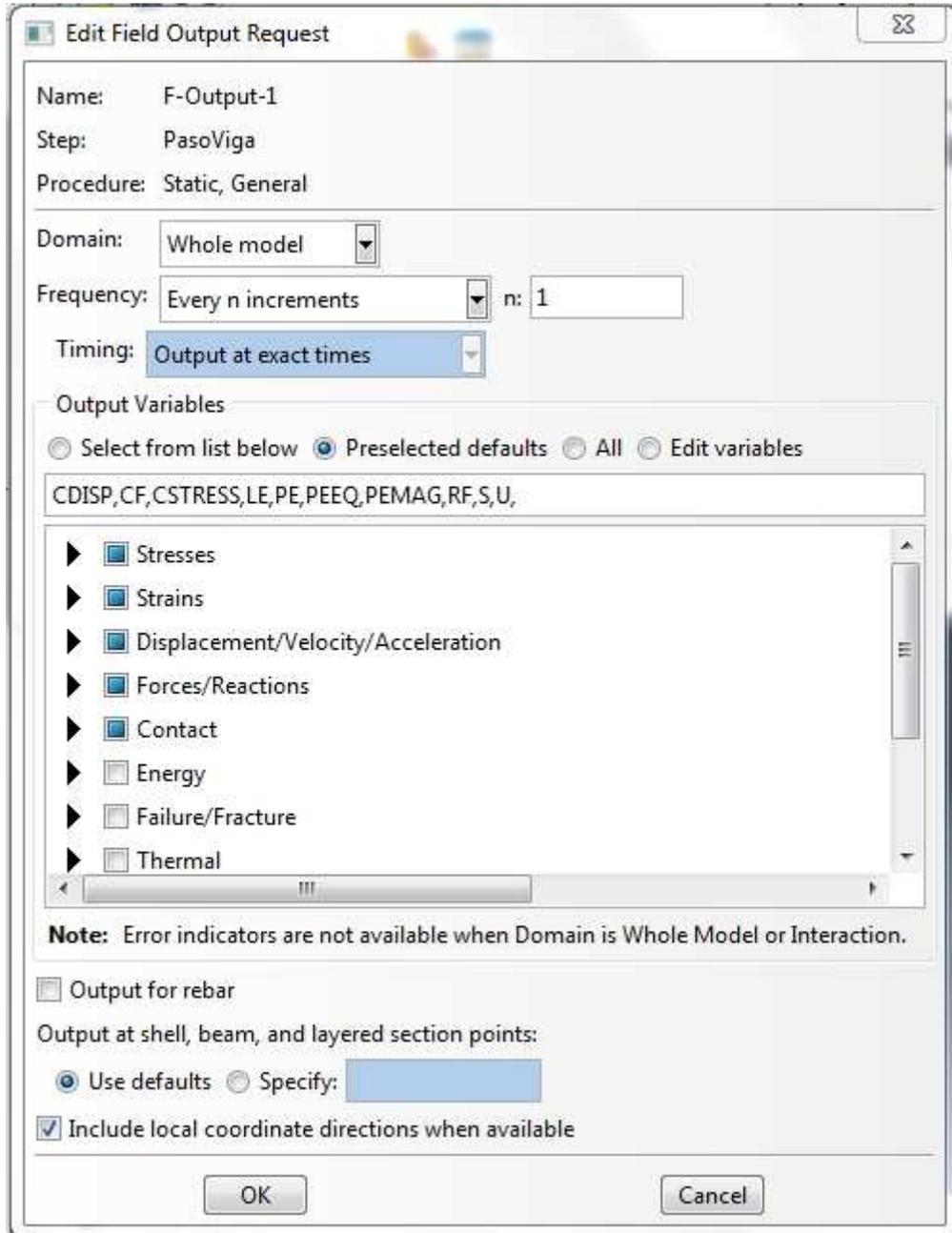
- Seleccionar las variables que *Abaqus* escribe en el archivo de salida.
- Seleccionar los puntos de la sección del elemento para los que *Abaqus* genera los datos.
- Seleccionar la región del modelo para la que se generan los datos.
- Modificar la frecuencia con la que el programa escribirá la data en la base de datos.

Para el ejemplo de la viga no es necesario modificar las salidas que genera automáticamente el programa. Simplemente, se examinarán las salidas requeridas y se aceptará la configuración por defecto:

- En la barra del menú de *Abaqus*, se selecciona *Output*→*Field Output Request*→*Manager* o en el menú propio del módulo, se hace clic en , al lado de  para examinar las salidas.
- *Abaqus/CAE* despliega el *Field Output Request Manager*. Este administrador tiene una lista alfabética de las salidas requeridas a la izquierda de la caja de diálogo. Los nombres de todos los pasos en el análisis aparecen a lo ancho de la parte superior de la caja de diálogo en el orden de ejecución. Esta tabla presenta el estado de cada salida requerida en cada paso.



- Si se hace clic en la celda de la tabla que dice *Created*, debajo del nombre del paso, aparece la información relacionada con ese paso en la parte inferior del *Manager*. La información ofrecida es:
  - *Step procedure*. El tipo de procedimiento del análisis realizado en el paso en esa columna.
  - *Variables*. Las variables de salida.
  - *Status*. El estado de la salida requerida.
- Si se hace clic en *Edit*, se puede ver información más detallada sobre las salidas. Aparece la ventana de la imagen inferior. Aparece una lista de todas las variables que serán salida. Si se cambia alguna de las opciones de salida, siempre se podrá retornar a las que se presentan por defecto haciendo clic en *Preselect Default*.
- Haciendo clic sobre los triángulos que aparecen al lado de cada categoría, se puede ver cuáles son las variables solicitadas.
- Según las opciones restantes que aparecen en el cuadro de diálogo, la data será generada por defecto en cada punto de la sección por defecto en el modelo y será escrita en la base de datos de salida después de cada incremento durante el análisis.



- Se hace clic sobre *Dismiss* para cerrar la ventana.
- Se puede revisar la historia de salidas requeridas de forma parecida, seleccionando *Output*→*History Output Request*→*Manager* desde el menú de *Abaqus* o desde el menú propio del módulo, si se hace clic en el icono , al lado del icono .

### 3.1.6. Condiciones de borde y aplicación de cargas

Para aplicar una condición de borde y las cargas, hay que determinar el paso porque estas dependen de él. Se debe indicar en qué paso o pasos estarán activas las cargas y condiciones de contorno.

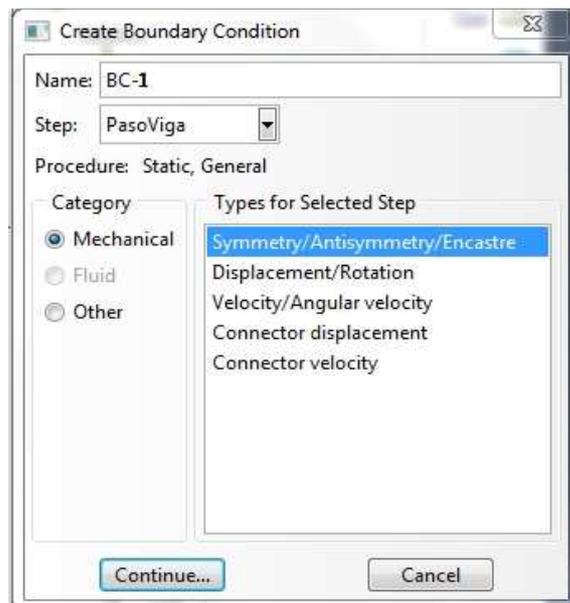
Una vez definidos los pasos del análisis, se puede utilizar el módulo *Load* para definir las condiciones prescritas en el problema:

- Una condición de borde que restringe uno de los extremos de la viga en voladizo en las direcciones X, Y y Z. Esta condición se aplica en el paso inicial.
- Una carga aplicada en la cara superior de la viga. Esta carga se aplica durante el paso de análisis general.

#### 3.1.6.1. Condición de borde

Para aplicar la condición de borde, se selecciona el módulo *Load* y se siguen los pasos siguientes:

- Se usa la opción *BC→Create* del menú de *Abaqus* o, dentro del menú del módulo, se utiliza la herramienta . Aparece la ventana *Create Boundary Condition*.



- En la ventana *Create Boundary Condition*:
  - Se nombra la condición de borde como *Empotramiento*.
  - Se selecciona el paso *Initial* como el paso en el que se aplicará la condición de contorno.

- Se acepta *Mechanical* como la opción válida de la lista *Category*.
- Se acepta *Symetry/Antisymetry/Encastre* como el tipo de condición de borde y se hace clic en *Continue*.

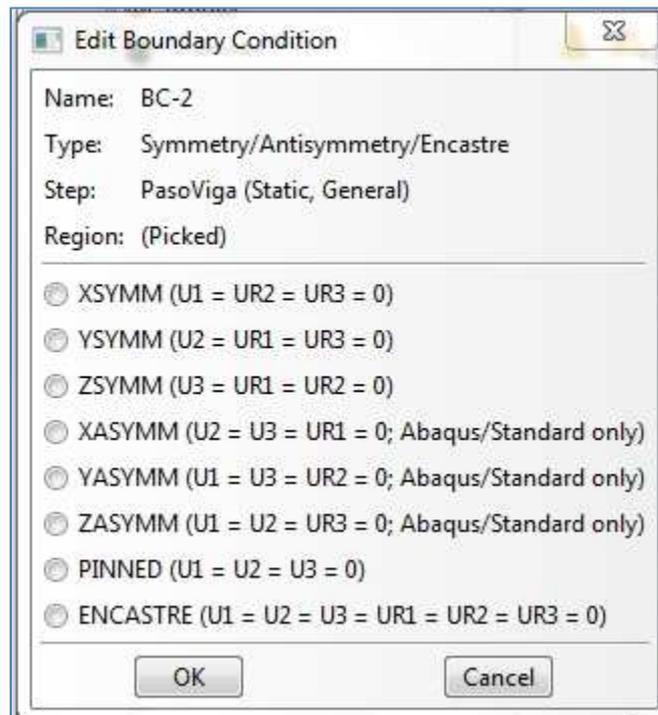
*Abaqus* manda mensajes en el área de avisos para guiar al usuario.

- Hacer clic sobre la cara del extremo izquierdo de la viga para seleccionar la región a la que se aplicarán las restricciones. La cara seleccionada se destaca. Si *Abaqus* no selecciona la superficie correcta es porque el icono

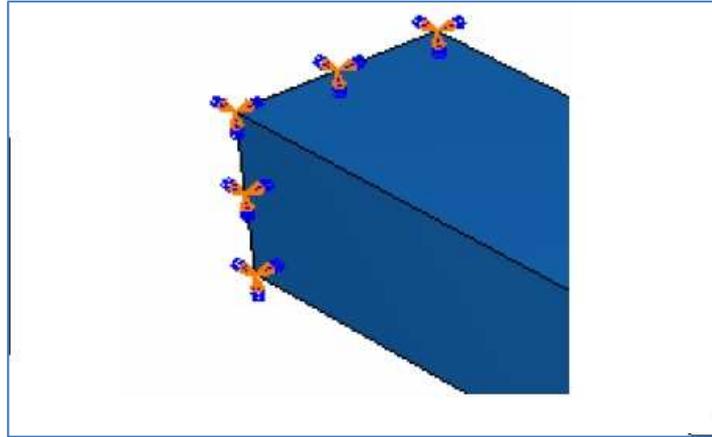


*Select the Entity Closest to the Screen* está activo. Se debe hacer clic sobre él para anular la selección y, a continuación, pinchar en los botones *Next* o *Previous* hasta que aparezca la superficie deseada. Después, se pincha en *OK*.

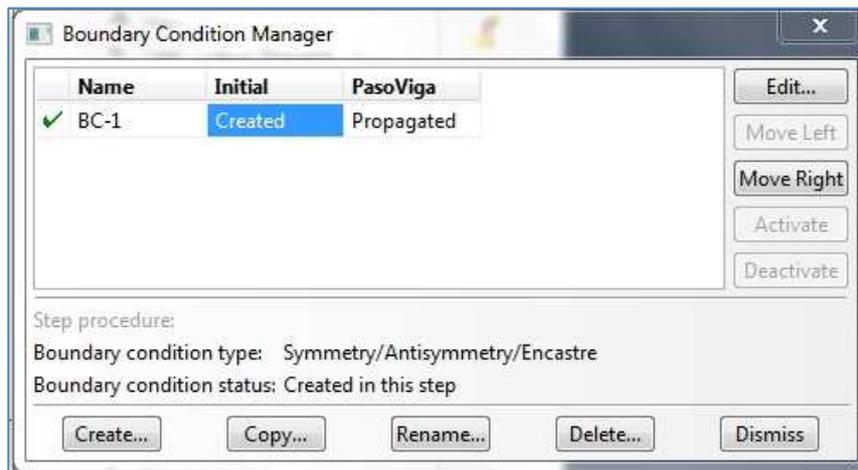
- Se hace clic con el botón derecho del ratón y se selecciona *Done* o se pincha en *Done* en el área de avisos para indicar que se ha acabado la selección. Aparece la ventana *Edit Boundary Condition*.



- En esta ventana, especifica el nombre de la condición de contorno, el tipo de condición y el paso en el que ocurre. Se debe especificar que es una condición de *ENCASTRE* para que el cuerpo no pueda desplazarse ni girar,  $U1=U2=U3=UR1=UR2=UR3=0$ .
- Hacer clic en *OK* para crear la condición. *Abaqus/CAE* crea flechas en cada esquina y los puntos medios sobre la cara seleccionada para la condición para indicar los grados de libertad impedidos. La condición de borde del problema está impidiendo los seis grados de libertad.



- En el menú de *Abaqus* seleccionar *BC*→*Manager* o en el menú del módulo  junto a , para ver el administrador de la condición de borde, *Boundary Condition Manager*.



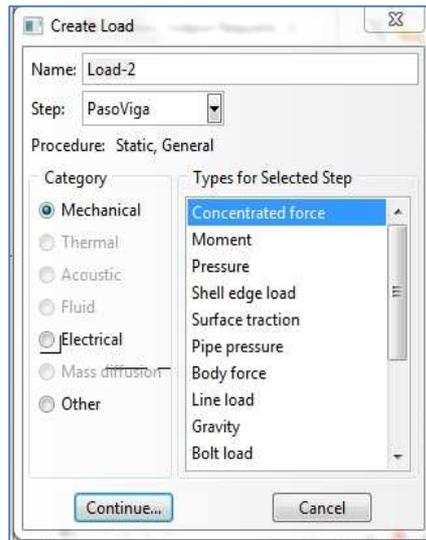
En esta ventana se indica que la condición de borde se crea en el paso *Initial* y se propaga en el paso estático general *PasoViga*. Si se hace clic sobre *Dismiss* se cierra la ventana.

### 3.1.6.2. Carga en la cara superior de la viga

Con la viga ya restringida en todos los grados de libertad por uno de sus extremos, se puede ya aplicar la carga distribuida sobre la cara superior de misma. La carga se aplica durante el paso estático general creado antes. De hecho, el programa no nos permite crear cargas fuera de este paso.

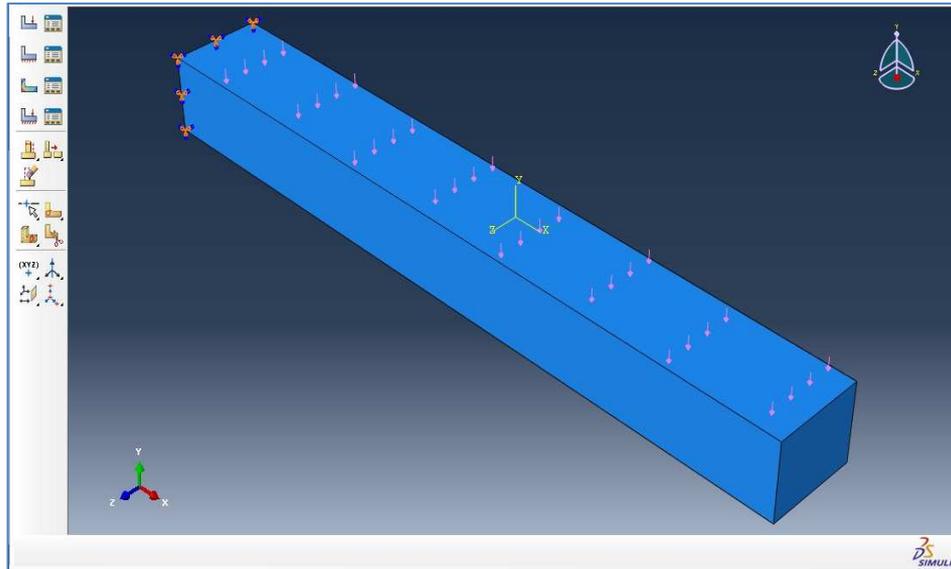
Los pasos a seguir son:

- De la barra del menú de *Abaqus*, se selecciona *Load*→*Create* o del menú propio del módulo, se hace clic en .
- Aparece la ventana *Create Load*.

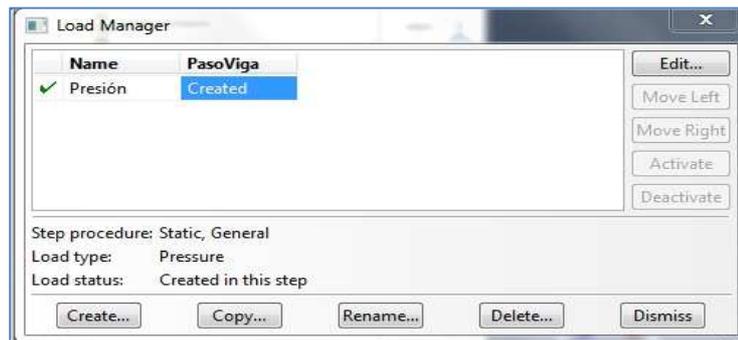


Dentro de esta ventana:

- Se nombra la carga como *Presión*.
- Se selecciona el paso *PasoViga* como el paso en el que se aplicará la carga.
- En la lista *Category*, se acepta *Mechanical* como la categoría por defecto.
- En la lista *Type for Selected Step*, se selecciona *Pressure* para el tipo de carga y se hace clic en *Continue*.
- Como en el caso de la condición de borde, se selecciona la cara sobre la que será aplicada.
- Se hace clic en *Done* para indicar que se ha terminado la selección.
- Aparece la ventana *Edit Load*. Dentro de ella:
  - Se introduce el valor de 0.5 en *Magnitude*.
  - Se acepta la selección de *Amplitude* por defecto.
  - Se hace clic en *OK* para crear la carga y cerrar la ventana.
- *Abaqus* crea flechas indicando la dirección y posición de la carga.



- Si se examina el *Load Manager* seleccionando *Load* → *Manager* o pinchando sobre , junto a , se observa que la carga se crea en el paso estático general.



### 3.1.7. Mallado del modelo

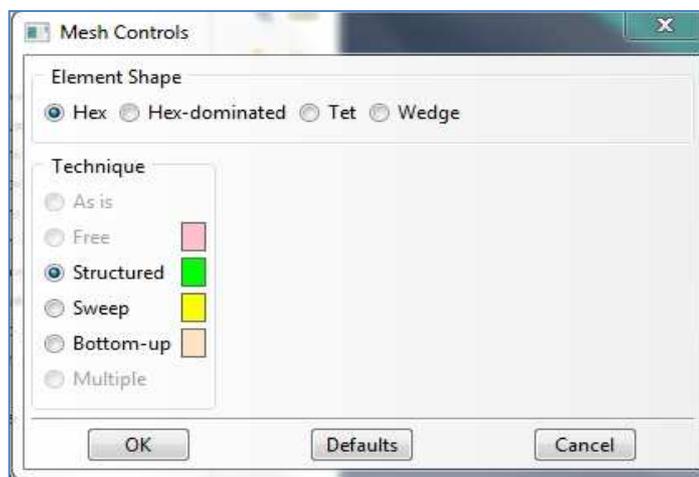
Para mallar el modelo, se utilizará el módulo *Mesh*. Con este módulo, se puede seleccionar la técnica de mallado que debe usar el programa para crear la malla, la forma del elemento y el tipo de elemento.

El programa puede usar diferentes técnicas para hacer el mallado. La técnica aplicada al modelo está indicada por el color del modelo cuando se entra en el módulo *Mesh*; si *Abaqus/CAE* muestra el modelo en color naranja, este no podrá ser mallado sin la ayuda del usuario.

#### 3.1.7.1. Controles del mallado

Los pasos a seguir para asignar los controles del mallado son los siguientes:

- Entrar en el módulo *Mesh* para acceder a las herramientas de mallado.
- En la barra del menú, seleccionar *Mesh*→*Controls* o en el menú del módulo, hacer clic en  para que aparezca la ventana *Mesh Controls*. *Abaqus/CAE* colorea las distintas partes del modelo para indicar qué técnica se usará para mallar cada región. En este ejemplo, el programa usará el mallado estructural para discretizar la viga y la muestra en color verde. Para *Element shape*, aceptar *Hex* como selección. Para *Technique*, aceptar *Structured*. Esta es la técnica de mallado que más se aproxima a los elementos hexagonales estudiados por la teoría clásica. Es con esta técnica con la que más se aproximarán los resultados a la teoría clásica.

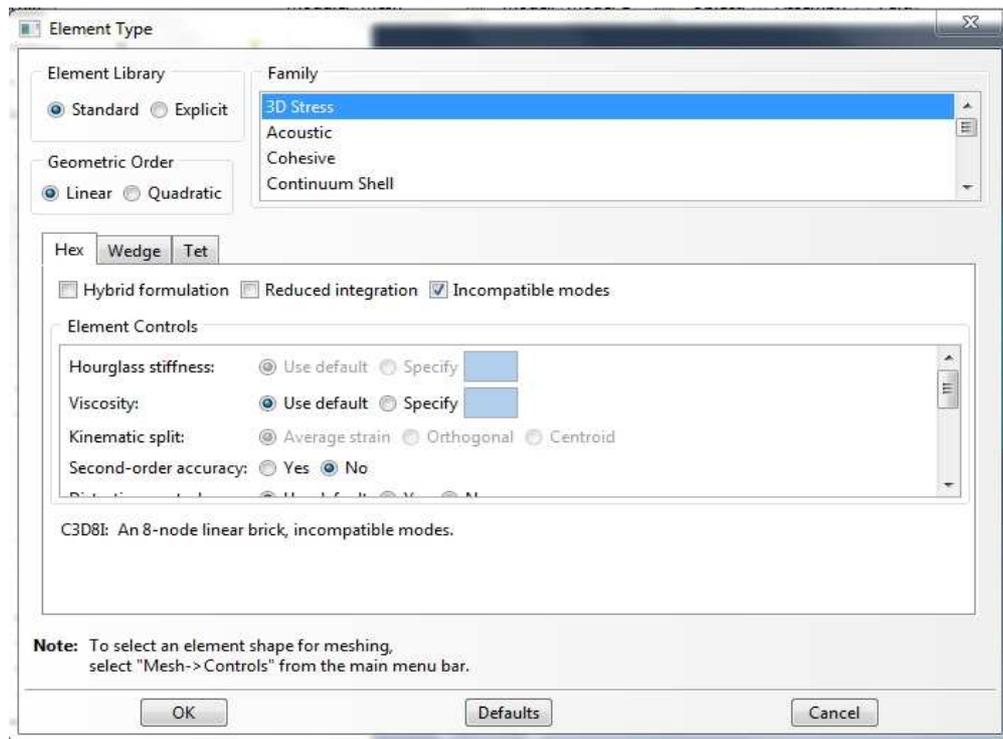


- Hacer clic en *OK* para asignar los controles del mallado y cerrar la ventana.

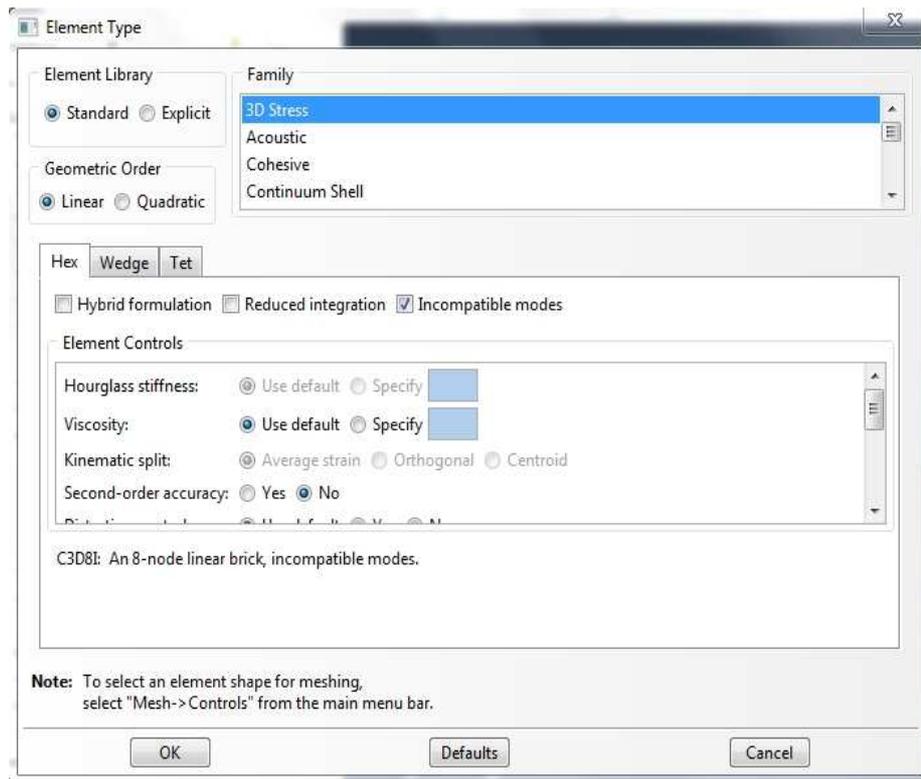
### 3.1.7.2. Elementos del mallado

Los pasos a seguir para asignar el tipo de elemento son:

- En la barra del menú, seleccionar *Mesh*→*Element Type* o, desde el menú propio del módulo, hacer clic en el icono .
- Aparece la ventana *Element Type*.



- En esta ventana, aceptar las siguientes selecciones por omisión:
  - *Element Library*: *Standard* como la librería de elementos a usar.
  - *Geometric Order*: *Linear* como el orden geométrico a aplicar en el elemento.
  - *Family*: *3D Stress* como la familia de elementos a emplear en el modelo.
- En la parte más baja de la ventana, se pueden ver las opciones de la forma del elemento. Se incluye una pequeña descripción del elemento seleccionado. De esta forma, sólo los tipos de elementos sólidos tridimensionales (Hexaédrico sobre la pestaña *Hex*, prisma triangular en *Wedge* y tetraédrico en la pestaña *Tet*) se muestran.
- En la pestaña *Hex*, se selecciona *Incompatible modes* de la lista de *Element Controls*. Aparece una descripción del tipo de elemento C3D8I.
- Se hace clic en *OK* para asignar el tipo de elemento y cerrar la ventana.

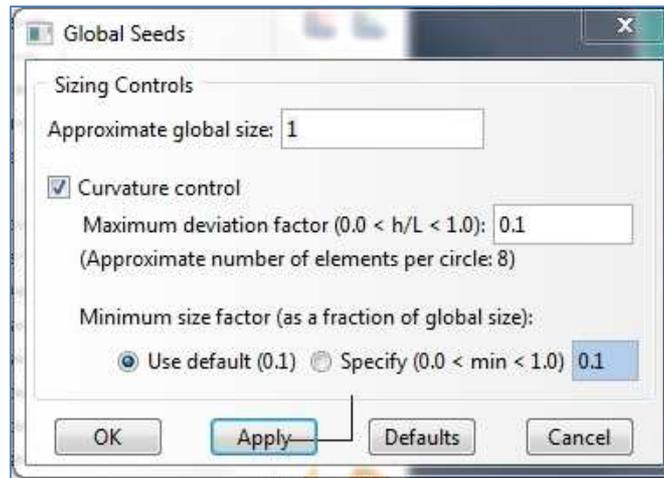


### 3.1.7.3. Mallado del modelo

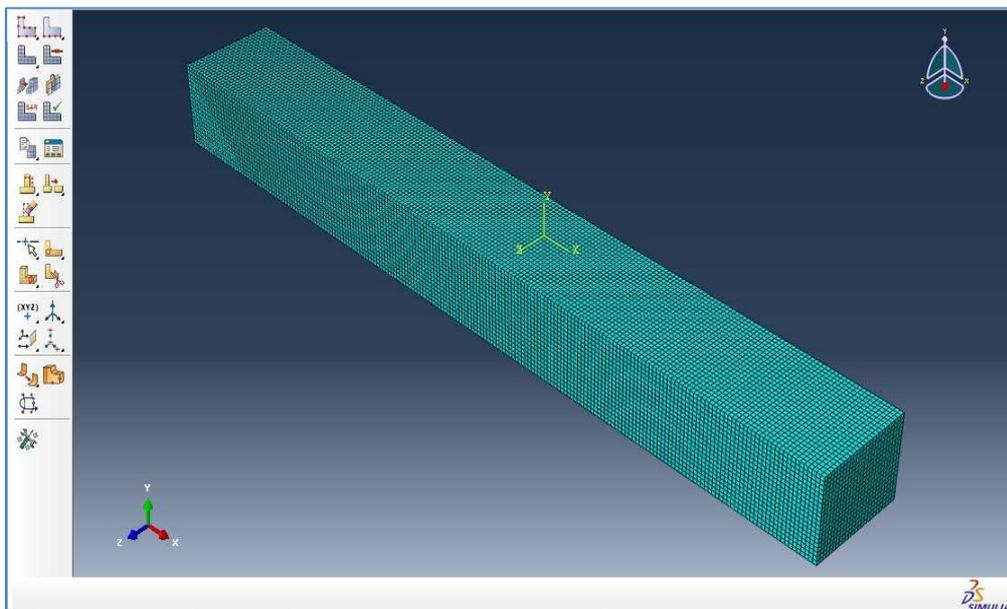
El mallado del modelo se produce en dos pasos: primero se dividen los bordes de la parte (*Seeding*) y, después, se malla esa parte. Se elige el número de divisiones según el tamaño del elemento con el que se quiera trabajar o según el número de elementos que se quieran a lo largo de los bordes. *Abaqus* configura los nodos de la malla en las divisiones siempre que sea posible. En este ejercicio, la división por defecto generará una malla con elementos hexaédricos.

Para mallar el modelo:

- Se selecciona *Seed*→*Instance* de la barra del menú de *Abaqus* o se pincha en el icono  del menú propio del módulo.
- Aparece la ventana *Global Seeds* con el tamaño del elemento por defecto que el programa usará para dividir la parte. Ese tamaño de elemento por defecto está basado en el tamaño de la parte y, a menudo, es la mejor opción.
- Se borra el tamaño por defecto y se escribe 1. Se presiona *OK* para que *Abaqus* cree los nodos.



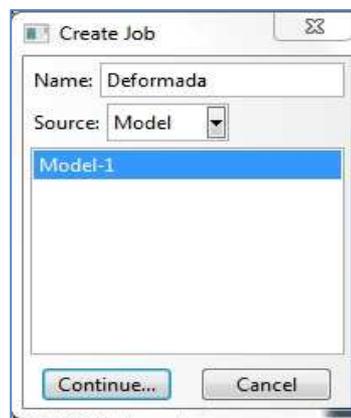
- *Abaqus/CAE* aplica las divisiones a la parte, como se muestra en la imagen inferior. Se gana mayor control sobre el mallado si se divide cada borde de las partes de forma individual con el botón , o, en el menú de *Abaqus*, en *Seed*→*Edges*.
- Se hace clic con el botón de la derecha del ratón sobre la ventana y se selecciona *Cancel procedure* o se desactiva la herramienta para aceptar las divisiones creadas.
- Se selecciona *Mesh*→*Instance* o en el menú del módulo se pincha sobre el botón  y se pincha sobre *OK* en el área de avisos para mallar la parte. *Abaqus* muestra la malla resultante, como en la imagen inferior.



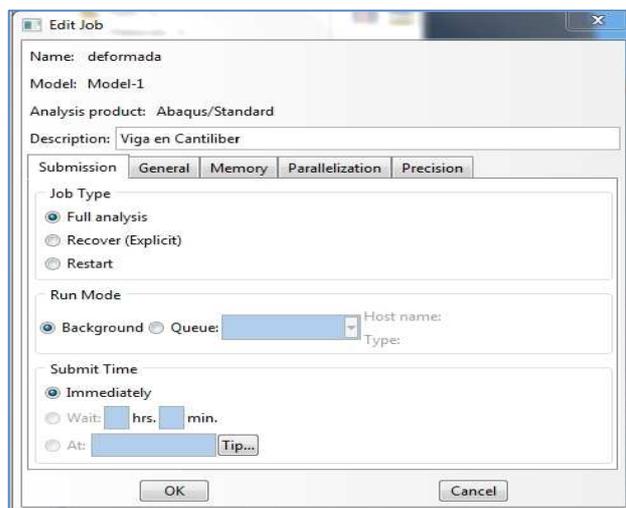
### 3.1.8. Creación del trabajo de análisis

Una vez configurado el análisis, se abre el módulo *Job* para crear un trabajo que esté asociado con el modelo y someter ese trabajo a análisis. Los pasos para crear un trabajo de análisis son:

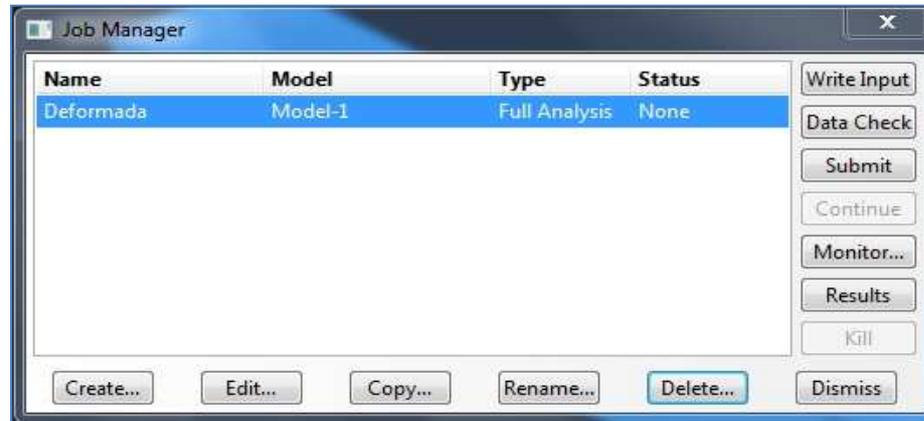
- Entrar en el módulo *Job* y seleccionar de la barra de menú *Job*→*Create* o, en el menú del módulo, pinchar en el icono . Aparece la ventana *Create Job* con la lista de los modelos que están disponibles en la base de datos de modelos.
- Nombrar al trabajo *Deformada*.



- Se hace clic en *Continue* para crear el trabajo.
- Aparece la ventana *Edit job*.
  - *Description: Viga en Cantiliber*
  - *Job type: Full analysis*
  - *Run mode: Background*
  - *Submit time: Immediately*



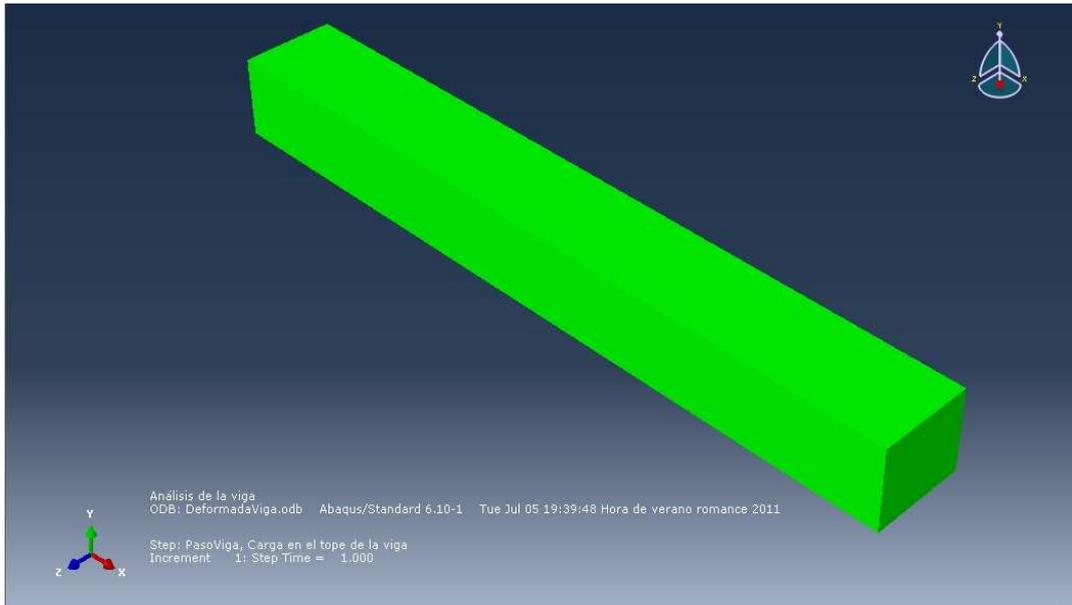
- Se hace clic en *OK* para crear el trabajo.
- Se pincha sobre el icono , junto al icono  para abrir el *Job manager*.



- Se hace clic en el botón *Submit* para comenzar el análisis. Ahora el programa crea el archivo de entrada .inp y se somete a análisis.
- En la columna *Status* se puede ver el estado del análisis. Esta columna puede mostrar alguno de los siguientes mensajes:
  - *Submitted* mientras se está generando el archivo de entrada .inp.
  - *Running* mientras *Abaqus* analiza el modelo.
  - *Completed* cuando el análisis se ha completado y la salida ha sido escrita en la base de datos de salida.
  - *Aborted* si *Abaqus/CAE* ha encontrado algún error en el archivo de entrada o en el análisis. El programa también da aviso de este error en el área de mensajes.
- Cuando se completa el análisis, se pueden ver los resultados del análisis con el módulo *Visualization*. Para entrar en él, basta con pulsar el botón *Results* de la ventana *Job manager*.
- *Abaqus/CAE* abre el módulo *Visualization*, carga la base de datos de salida creada por el trabajo y muestra una representación gráfica del modelo.

### 3.1.9. Visualización de los resultados del análisis

Al abrir la base de datos de salida generada durante el análisis, *Abaqus* muestra en pantalla una representación del modelo que es similar a un dibujo de la viga sin deformación.

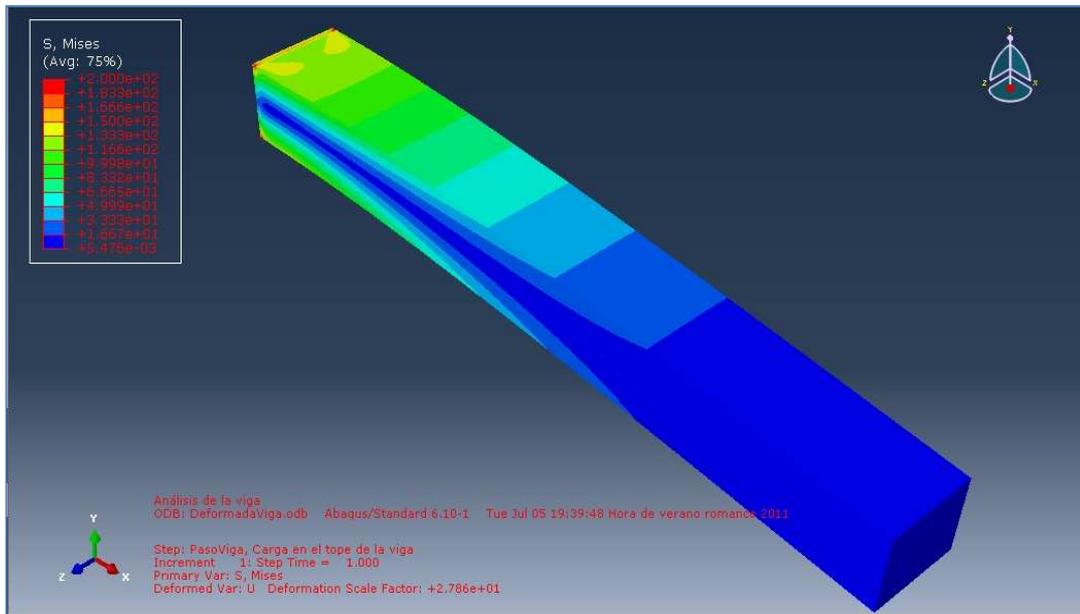


Las funciones de este módulo permiten varias opciones:

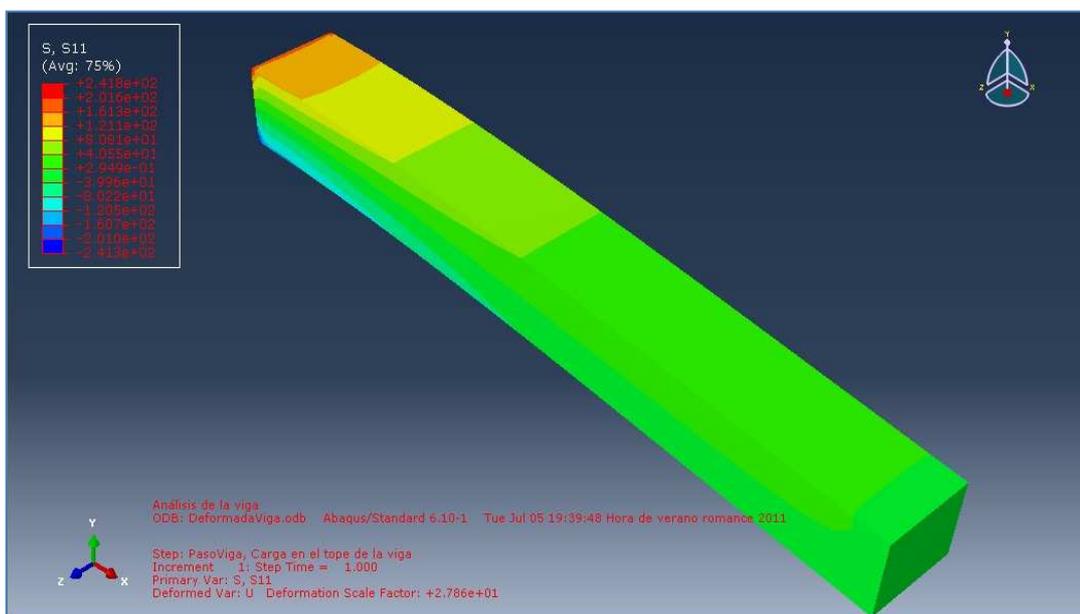
- Si se selecciona *Plot*→*Undeformed Shape* o se pincha en , se puede ver el modelo sin la deformación.
- Al pinchar en *Plot*→*Deformed Shape* o en el icono , se puede ver el modelo deformado.
- Si se quiere ver el dibujo con los esfuerzos, se puede pinchar en *Plot*→*Contour* o bien, pinchar en el icono  para ver, en este caso, los esfuerzos de Von Mises.
- Como se puede ver en la imagen superior, el módulo *Visualization* ofrece información en el margen inferior izquierdo, en dos bloques:
  - El primer bloque es un bloque de título que indica la descripción del trabajo, la base de datos de salida desde la que *Abaqus* lee la data, la versión de *Abaqus* que se usó para generar la base de datos de salida y la fecha en que la base de datos de salida se generó.
  - El segundo bloque indica el nombre del paso y su descripción, el incremento dentro del paso, el tiempo del paso y, cuando se está visualizando una forma deformada, la variable deformada y el factor de escala de deformación.

Es importante saber que *Abaqus* muestra en la imagen el último paso y el último marco de análisis.

La visualización correspondiente a los esfuerzos de Von Mises es la siguiente:



Para la comparación con la teoría clásica, nos interesa calcular los esfuerzos en la dirección del eje X, ya que la viga está sometida a flexión y los esfuerzos generados por esa flexión serán en la dirección del eje X, según el sistema coordenado del programa. La imagen que se obtiene para los esfuerzos S11 es:

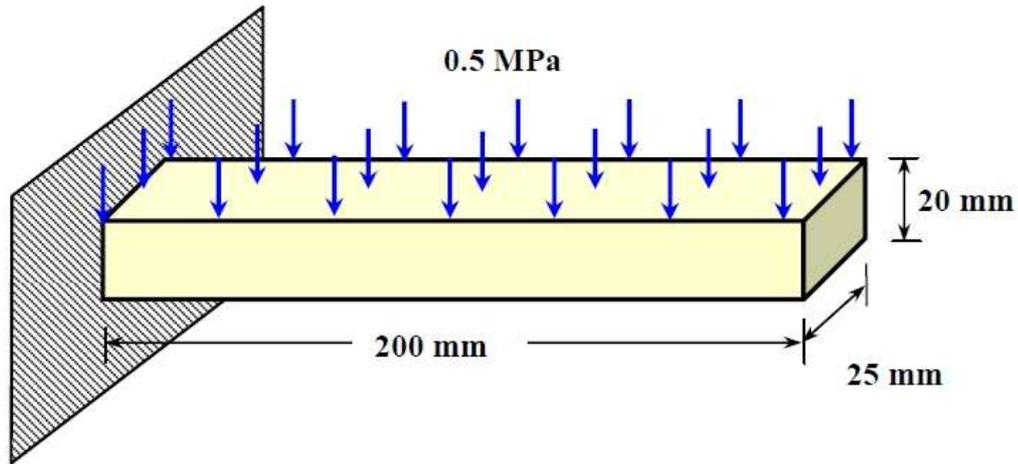


Como se puede ver en la leyenda que estratifica los esfuerzos por colores, el esfuerzo máximo es de  $241.8 \text{ N/mm}^2$  y es positivo y máximo en la cara superior del borde empotrado y negativo y máximo en la cara inferior del borde empotrado,  $241.3$

$\text{N/mm}^2$ . La diferencia entre ellos, de  $0.5 \text{ N/mm}^2$ , se debe al sistema de cálculo, por elementos finitos, que ofrece una aproximación del resultado real.

### 3.1.10. Comparación con la teoría clásica de cálculo

Ahora se calcularán los esfuerzos en la dirección normal a la sección para el empotramiento de la viga por la teoría clásica de cálculo.



Se tiene una viga empotrada con una carga superficial de  $0.5 \text{ MPa}$ . El momento provocado en el empotramiento por dicha carga es:

$$M = F \cdot d$$

Sobre la viga se ha aplicado una fuerza superficial de  $0.5 \text{ N/mm}^2$ , que es equivalente a una presión de  $0.5 \text{ N/mm}^2$  aplicada sobre una superficie de  $20\text{mm} \times 200\text{mm}$ . Por lo tanto, la fuerza será

$$P = \frac{F}{S} \Rightarrow F = P \cdot S = (0.5 \text{ N/mm}^2)(200\text{mm})(25\text{mm}) = 2500\text{N}$$

La presión dada es equivalente a una fuerza de  $2500 \text{ N}$  aplicada a  $100 \text{ mm}$  del empotramiento, es decir, en el centro geométrico de la superficie sobre la que está aplicada la presión.

El momento provocado en el empotramiento será:

$$M = (2500 \text{ N})(0.1\text{m}) = 250 \text{ N}\cdot\text{m}$$

La tensión de la sección es equivalente a

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{M \cdot Z}{I}$$

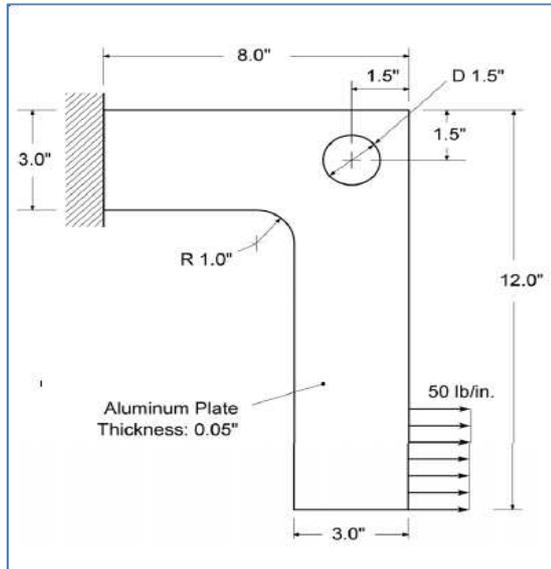
donde Z es la altura de la sección, e I es el momento de inercia de la sección, que para una sección rectangular es  $I = \frac{b \cdot h^3}{12}$ . Por lo tanto,

$$\sigma = \frac{M \cdot h}{b \cdot h^3} = \frac{M}{b \cdot h^2} = \frac{250 \text{ N} \cdot \text{m}}{\frac{0.025 \text{ m} \cdot (0.02 \text{ m})^2}{12}} = 3 \cdot 10^8 \text{ N} / \text{m}^2 = 300 \text{ N} / \text{mm}^2$$

El programa ofrece un resultado de 241.8 N/mm<sup>2</sup>. Como se puede ver en la leyenda del ejercicio (AVG: 75%), el error tiene que ser igual o menor al 25%. Si se divide el resultado del programa entre el resultado de la teoría clásica, se obtiene:

$$\frac{241.8}{300} = 0,806 \Rightarrow \text{Error} = 1 - 0,806 = 0,194 < 0,25$$

## 3.2. EJEMPLO Nº 2: BRACKET CON DISCONTINUIDAD EN EL HOMBRO

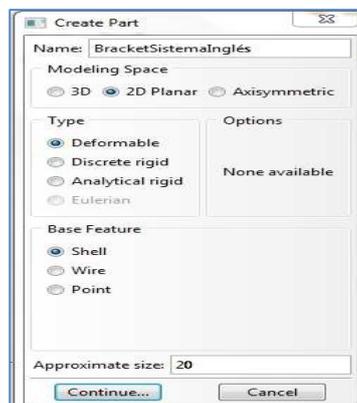


Para el siguiente ejemplo, se hallarán las tensiones máximas en la pieza de la imagen mediante el programa de elementos finitos *Abaqus* y mediante la teoría clásica. En este nuevo ejemplo se utilizará la herramienta para crear circunferencias, arcos y la herramienta que permite crear puntos en el cuerpo para posicionar la carga. Además, en esta ocasión el cuerpo se creará en 2D.

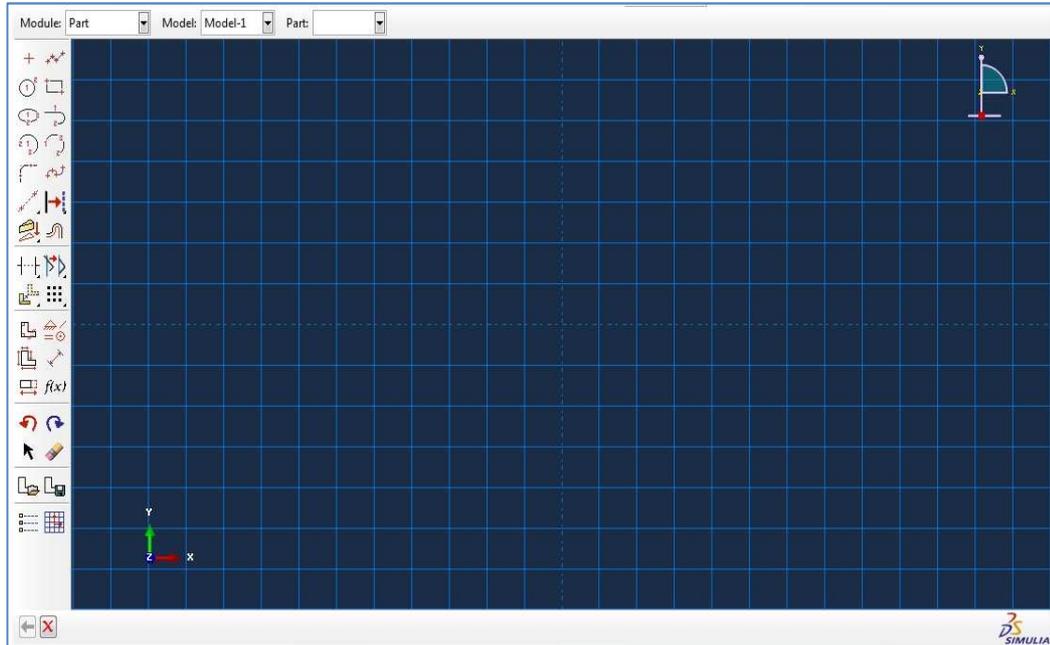
### 3.2.1. Creación de una parte

Se inicia el programa *Abaqus/CAE*. El programa carga automáticamente el módulo *Part*. Con este módulo se dibujará la geometría del modelo:

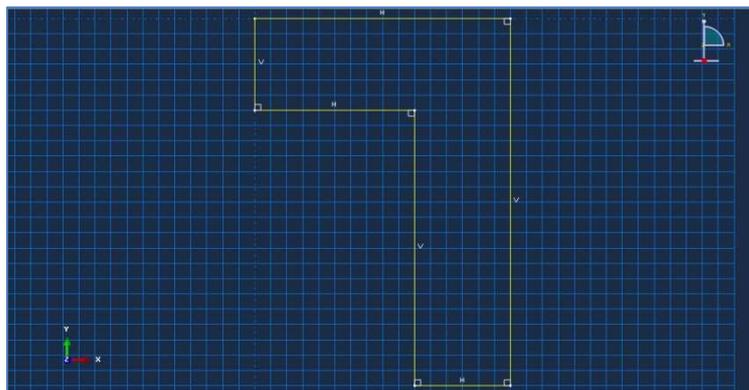
- Se hace clic en el icono  del menú del módulo.
- Aparece la ventana *Create part*.
  - *Name: BracketSistemaInglés*
  - *Modeling Space: 2D Planar*
  - *Type: Deformable*
  - *Base Feature: Shell*
  - *Approximate Size: 20*



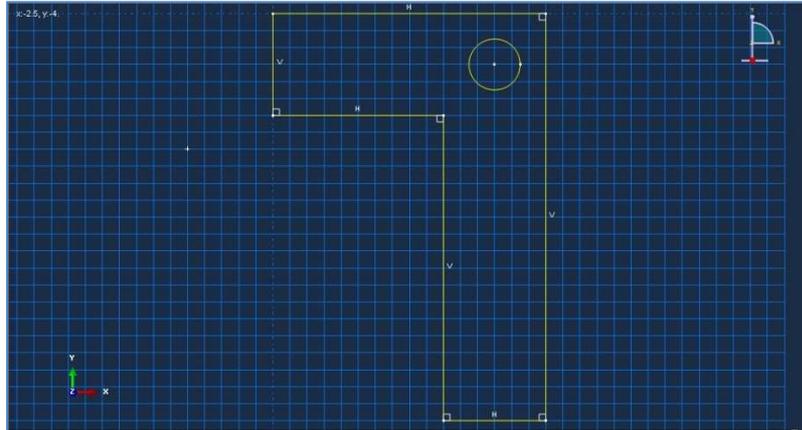
- Se hace clic en *Continue* para acceder al *Sketcher*. La pantalla ofrecida ahora por el programa es la que se muestra en la imagen inferior. En el margen izquierdo de la ventana aparece el menú con las herramientas propias del *Sketcher*.



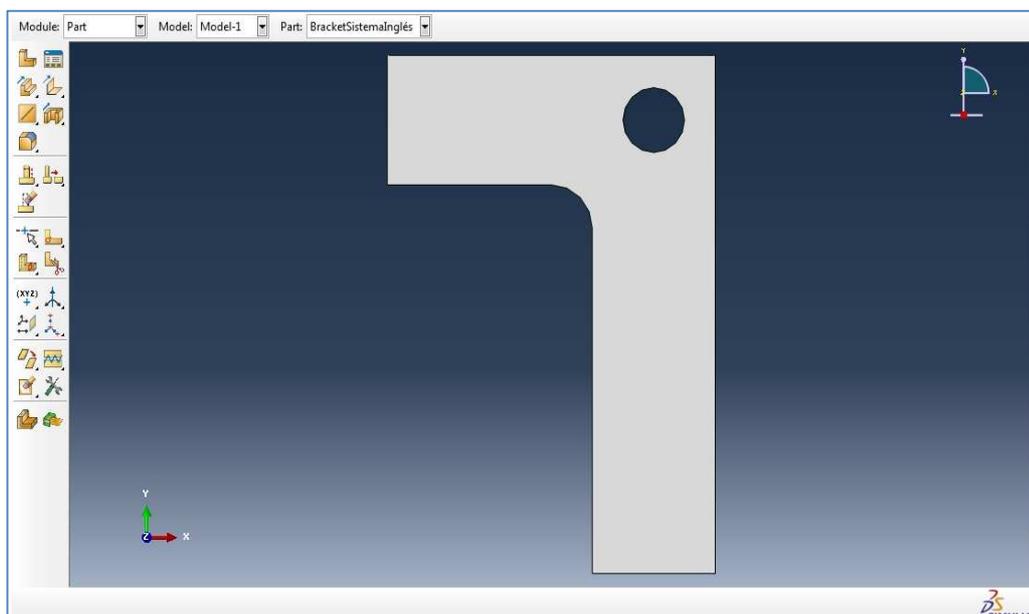
- Se activa la herramienta del módulo para crear líneas  y se introducen las coordenadas que determinan las esquinas del cuerpo:
  - (0, 0)
  - (8, 0)
  - (8, -12)
  - (5, -12)
  - (5, -3)
  - (0, -3)
  - (0, 0)
- Se pincha de nuevo en la herramienta  para desactivarla.



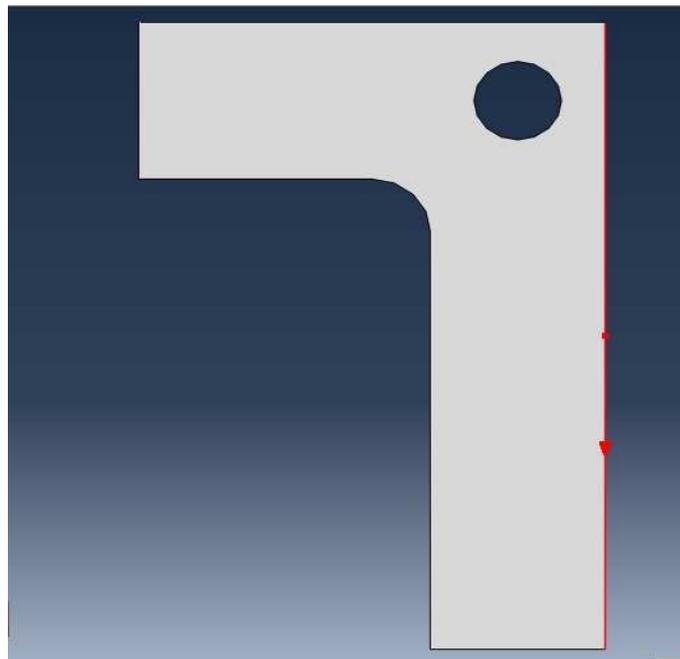
- Se hace clic en la herramienta para crear circunferencias  y se introducen las coordenadas del centro de la circunferencia y de un punto de la circunferencia, en el orden que nos indique la línea de comandos del programa.
  - (6.5, -1.5) → Centro
  - (7.25, -1.5) → Punto de la circunferencia



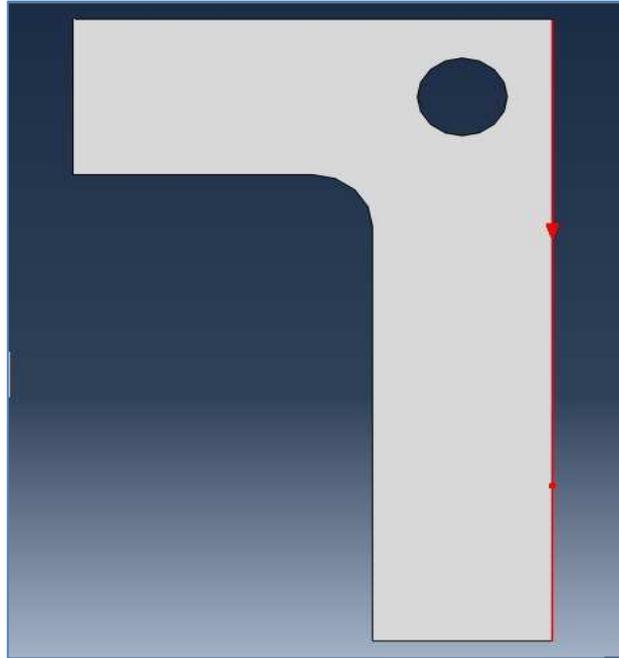
- Se pincha de nuevo en el icono de la herramienta para desactivarla.
- Se hace clic en el icono para crear arcos de circunferencia tangentes a dos líneas .
- Se introduce el radio del arco, 1 "", y se seleccionan las líneas a las que debe ser tangente.
- Se pincha otra vez para desactivarla.
- Se hace clic en *Done* para terminar el diseño de la parte. El programa muestra el resultado final:



- Al hacer clic en *Done* en el paso anterior, el programa sale del Sketch y vuelve al módulo *Part*. En el margen izquierdo se muestran las herramientas del módulo.
- Se pincha en la herramienta para crear puntos en el cuerpo  y, como es un botón desplegable, se mantiene pulsada hasta que aparecen las demás opciones. Se selecciona la herramienta para dividir líneas .
- El programa indica que se señale la línea a partir. Se selecciona la línea del margen derecho del cuerpo. Se presiona en *Done* para terminar la selección de líneas.



- La flecha roja nos indica en qué dirección se toma la división y nos pide el factor por el que se multiplicará la longitud de la línea para hallar el punto de división. Como la fuerza de 50 lb/in está aplicada sobre una longitud de 3 in, la longitud de la línea es 12 in y el programa toma el punto de inicio desde la parte de arriba según el sentido de la flecha, el factor por el que se debe multiplicar la longitud es 0,75.
- El programa ofrece una imagen del punto donde se realizará la división.
- Se pincha en el botón *Create Partition* de la línea de comandos para aceptar la partición.

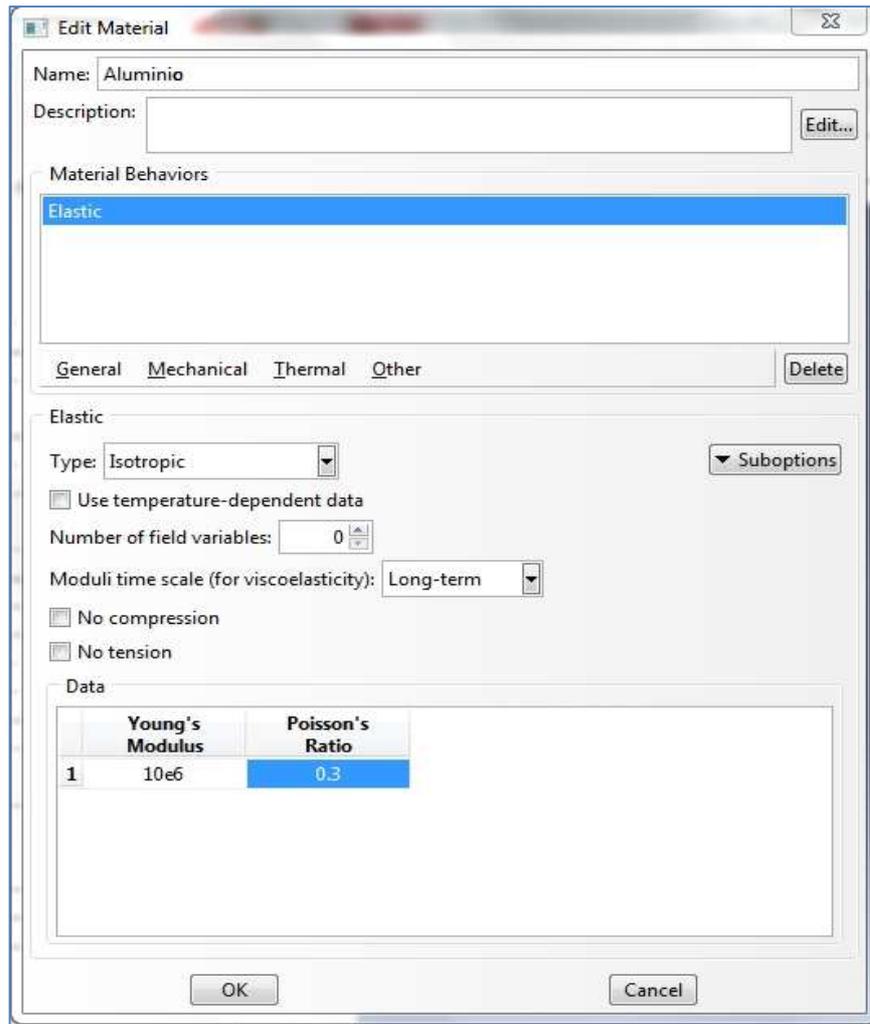


- Con este último paso, se termina el diseño de la parte.

### 3.2.2. Creación del material

Para definir los materiales del ejercicio se debe utilizar el módulo *Property*. Se entra en este módulo seleccionándolo en la pestaña desplegable del menú de *Abaqus*. Una vez dentro del módulo, los pasos a seguir son los siguientes:

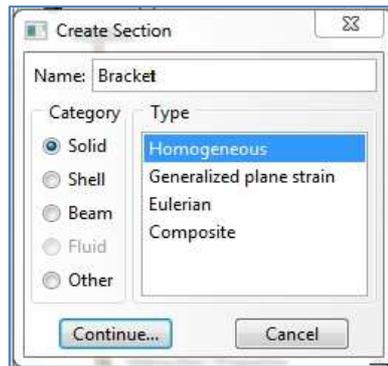
- Se hace clic en el icono  del menú del módulo. La ventana *Edit material* aparece en pantalla.
- Se nombra el material como *Aluminio*.
- Para definir las características mecánicas del aluminio, se pincha en *Mechanical* → *Elasticity* → *Elastic* y se introducen los valores del módulo de Young  $E = 10e6$  MPa y el coeficiente de Poisson  $\nu = 0.3$  en las correspondientes casillas.



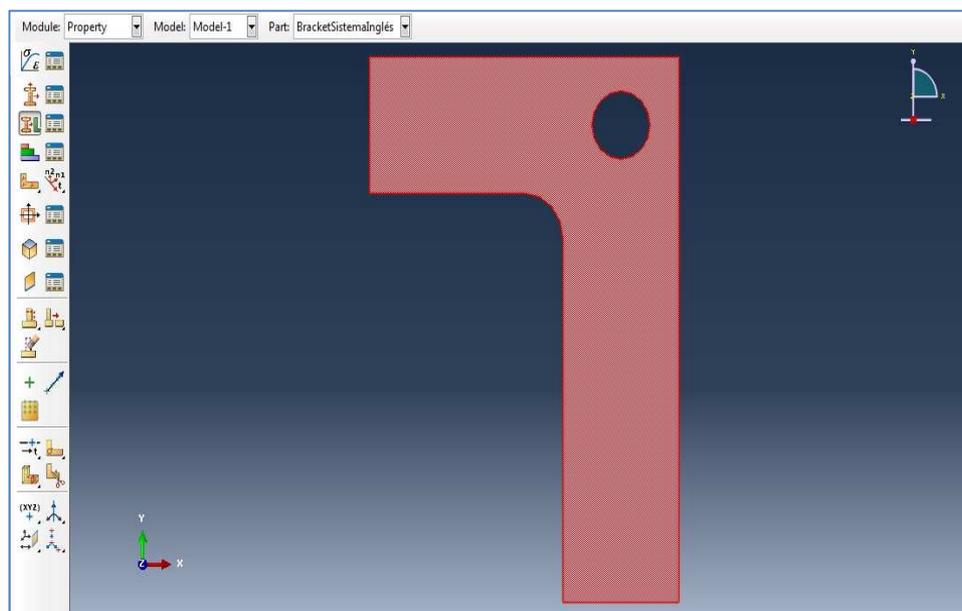
- Se presiona *OK* para cerrar la ventana.

### 3.2.3. Creación de una sección

- Se hace clic en el icono  para crear la sección. Al pinchar en este icono, se despliega la ventana *Create Section*.
- Se nombra a la sección como *Bracket*, se elige *Solid* como *Category* y *Homogeneous* como *Type*.



- Se pincha en *Continue* y se selecciona el *Aluminio* como material para la sección.
- Se hace clic en *OK* para cerrar la venta y crear la sección.
- Se selecciona del menú del módulo la herramienta para aplicar las secciones a las partes y conferirles así estas las propiedades del material, .



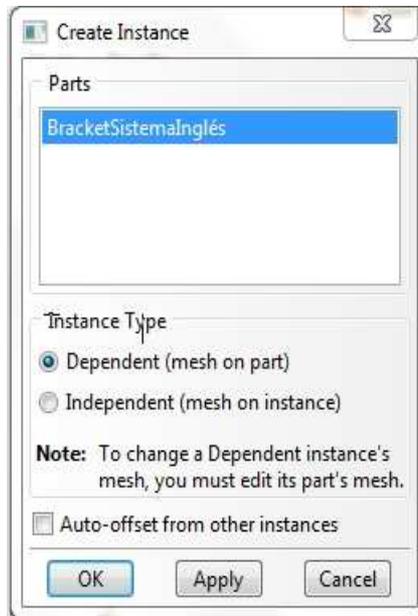
- Se hace clic sobre cualquier parte del cuerpo para seleccionarlo. *Abaqus* resalta la parte seleccionada y se hace clic en *Done* para aceptar la selección.
- Se acepta en la ventana *Edit Section Assignment* la sección *Bracket* y se da a *OK* para terminar la acción.

### 3.2.4. Ensamblado del modelo

Al igual que en el primer ejemplo, hay una única parte en el modelo, por lo que este paso carece de importancia.

Para ensamblar el modelo se siguen los siguientes pasos:

- Se selecciona el módulo *Assembly* de la lista de módulos.
- Se hace clic en el icono  en el menú propio del módulo. Aparece la ventana *Create Instance*.

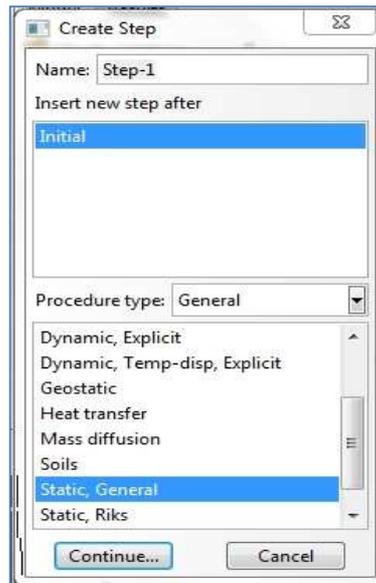


- Se acepta en *Parts* la única opción *BracketSistemaInglés* y se hace clic en *OK*.
- *Abaqus/CAE* crea la *instance* del bracket y se da por finalizada la actuación con este módulo.

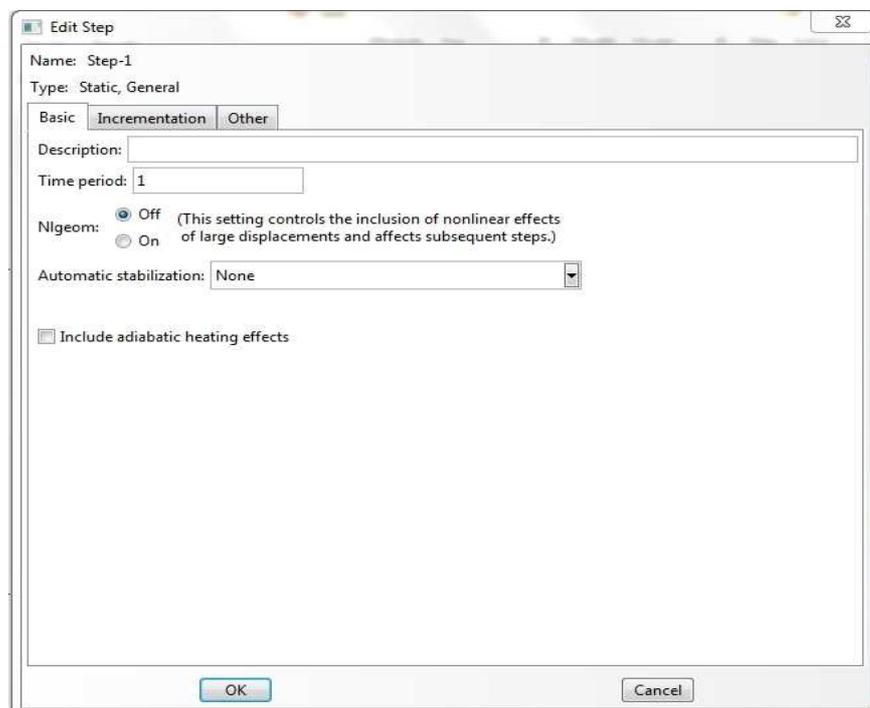
### 3.2.5. Configuración del análisis

Una vez creado el modelo de análisis, se puede entrar en el módulo *Step* para la configuración del análisis. De nuevo, sólo se necesitarán dos pasos, el paso inicial generado automáticamente por el programa y un paso estático general en el que se aplicarán las cargas al modelo.

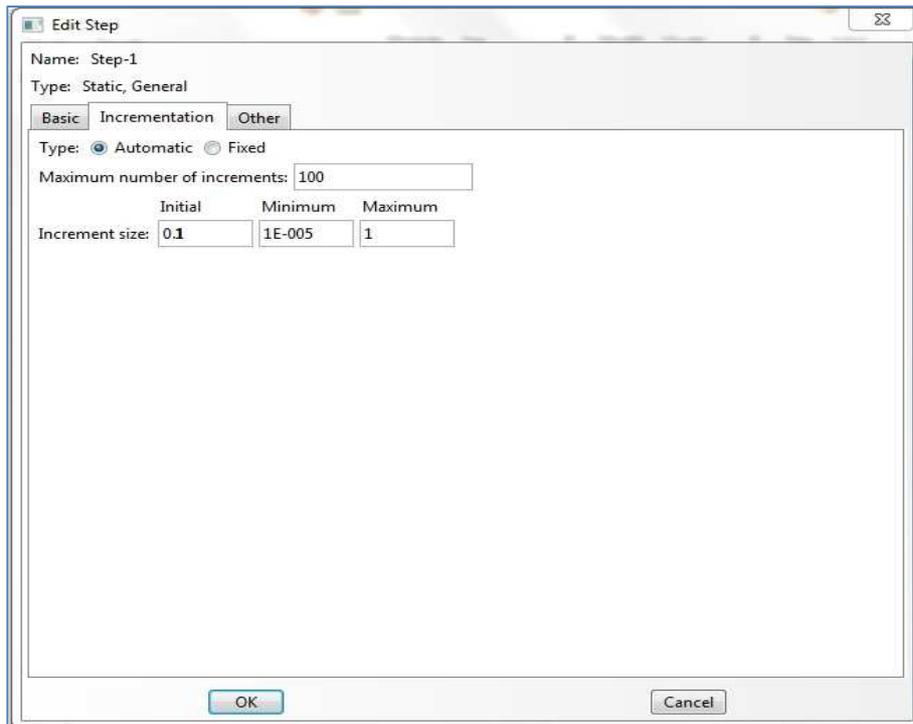
- Se selecciona el módulo *Step* en la lista de módulos.
- En el menú propio del módulo, se hace clic en el icono .
- Aparece la ventana *Create Step*, en la que figura el paso que genera el programa por defecto, *Initial*. Dentro de esta ventana, se acepta el nombre por defecto del nuevo paso (*Step1*) y se selecciona *Static General* dentro de los tipos de paso que ofrece.
- Se hace clic en *Continue* para continuar con el análisis.



- Aparece la ventana *Edit Step* con las opciones por defecto para un paso estático general. La pestaña *Basic* está seleccionada por defecto. Se escribe una pequeña descripción en el campo *Description (Apply Loading)*.



- Se hace clic sobre la pestaña *Incrementation* y se cambia el valor del incremento inicial a 0,1. De esta forma, *Abaqus* aplica en el instante inicial la décima parte de la fuerza total.

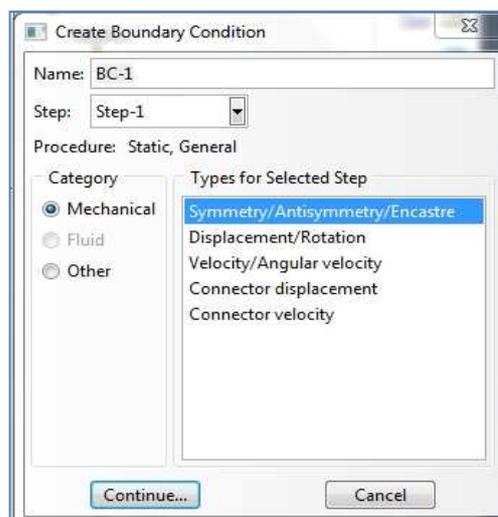


- Se hace clic sobre *OK* para crear el paso y salir de esta ventana.
- No es necesario modificar las salidas por defecto del programa porque las opciones incluyen las variables que se necesitan para este ejemplo.

### 3.2.6. Condición de borde

Para aplicar la condición de borde, se selecciona el módulo *Load* y se siguen los pasos siguientes:

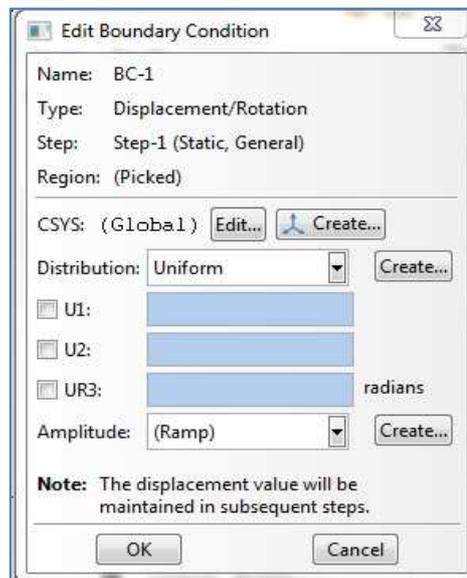
- En el menú del módulo, se utiliza la herramienta . Aparece la ventana *Create Boundary Condition*.



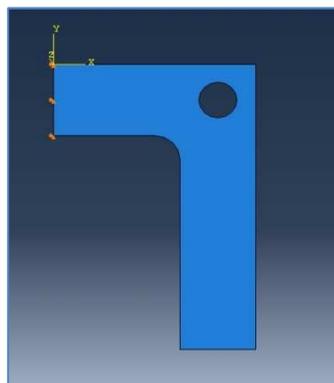
- En la ventana *Create Boundary Condition*:
  - Se nombra la condición de borde como *Empotramiento*.
  - Se selecciona el paso *Step 1* como el paso en el que se aplicará la condición de contorno.
  - Se acepta *Mechanical* como la opción válida de la lista *Category*.
  - Se selecciona *Displacement/Rotation* como el tipo de condición de borde y se hace clic en *Continue*.

*Abaqus* manda mensajes en el área de avisos para guiar al usuario.

- Se hace clic sobre el borde de la izquierda, donde va a estar el empotramiento.
- Se pincha en *Done* en el área de avisos para indicar que se ha acabado la selección. Aparece la ventana *Edit Boundary Condition*.



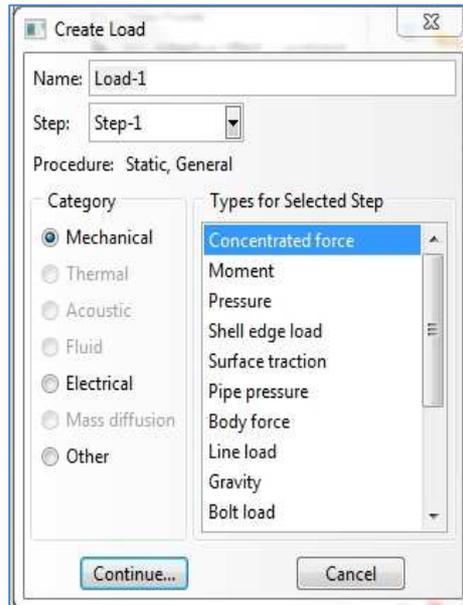
- En esta ventana, se debe pinchar en el cuadradito que activa U1 y U2 y dejar el valor 0 que el programa tiene por defecto.
- Hacer clic en *OK* para crear la condición. *Abaqus/CAE* crea flechas en cada esquina y los puntos medios sobre la línea en la que está aplicada la condición para indicar los grados de libertad impedidos.



### 3.2.7. Carga en el margen derecho inferior del bracket

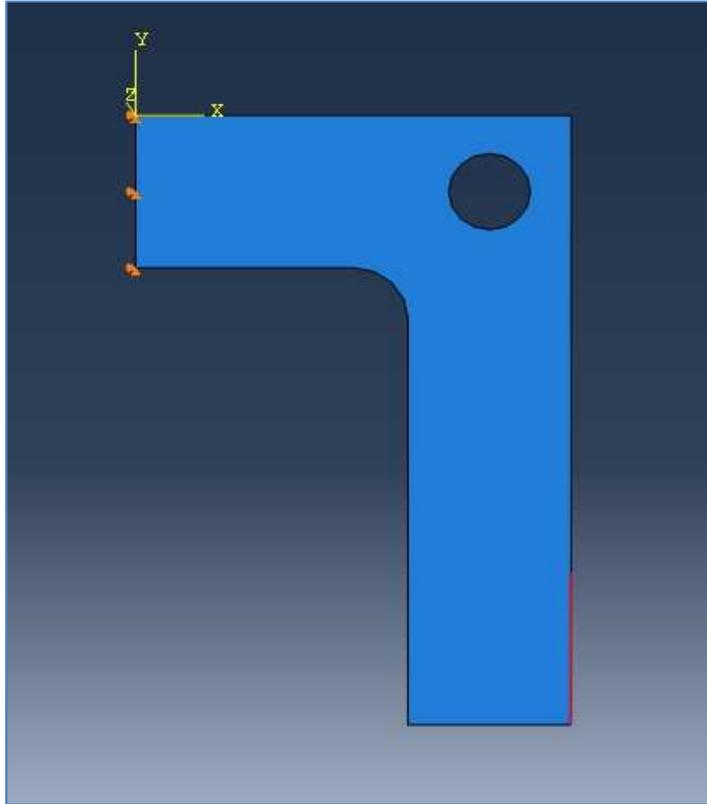
Los pasos a seguir para crear la carga lineal sobre el cuerpo son:

- En el menú del módulo *Load*, se hace clic en .
- Aparece la ventana *Create Load*.

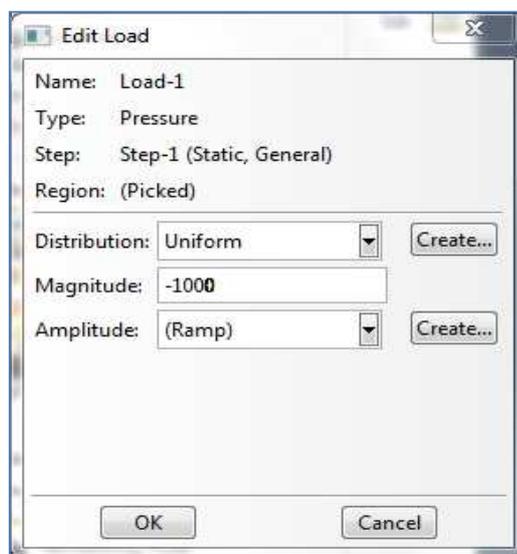


Dentro de esta ventana:

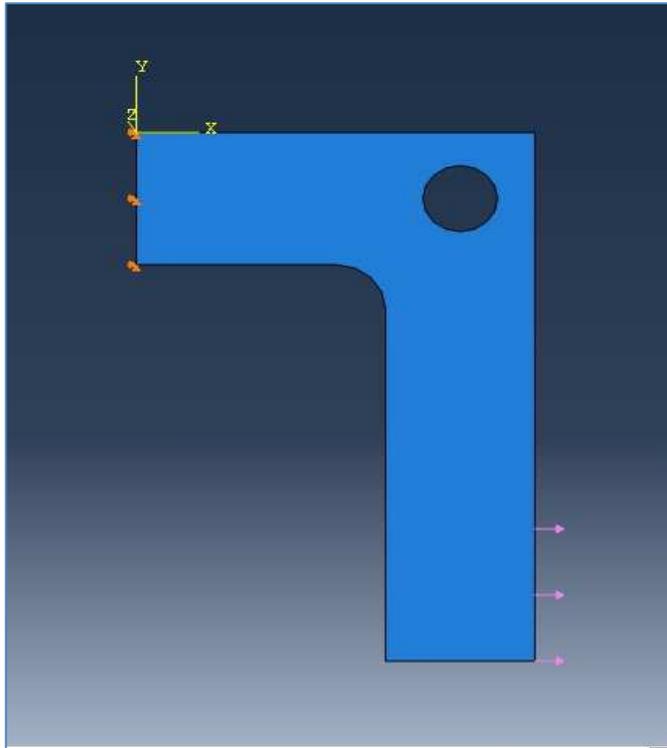
- Se nombra la carga como *Load-1*.
- Se selecciona el paso *Step-1* como el paso en el que se aplicará la carga.
- En la lista *Category*, se acepta *Mechanical* como la categoría por defecto.
- En la lista *Type for Selected Step*, se selecciona *Pressure* para el tipo de carga y se hace clic en *Continue*.
- Se selecciona el margen inferior del lateral derecho del cuerpo. *Abaqus* remarca en rojo la parte de la línea que se dividió en un paso previo.



- Se hace clic en *Done* para indicar que se ha terminado la selección.
- Aparece la ventana *Edit Load*. Dentro de ella:
  - Se introduce el valor de -1000 en *Magnitude*. La carga debe ser negativa porque se ha introducido como una presión y es una fuerza de tracción, por lo tanto, es una presión negativa.
  - Se acepta la selección de *Amplitude* por defecto.
  - Se hace clic en *OK* para crear la carga y cerrar la ventana.



- *Abaqus* crea flechas indicando la dirección y posición de la carga.



### 3.2.8. Mallado del modelo

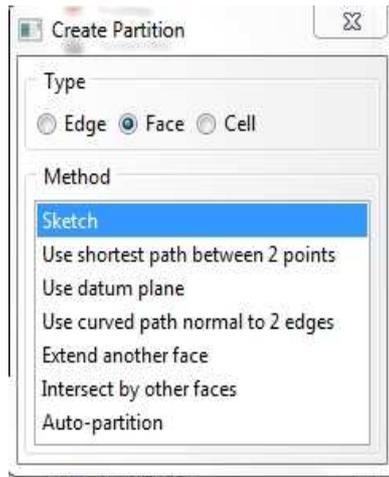
Para mallar el modelo, se empleará el módulo *Mesh*. En esta ocasión, hay que hacer uso de una nueva herramienta del módulo debido a la geometría del modelo.

Si se malla el modelo como se hizo en el primer ejercicio, se crearán distorsiones en las cercanías a las zonas redondeadas. Esto se produce porque el programa no es capaz de crear elementos totalmente cuadrados al no estar formada la geometría del cuerpo por líneas rectas.

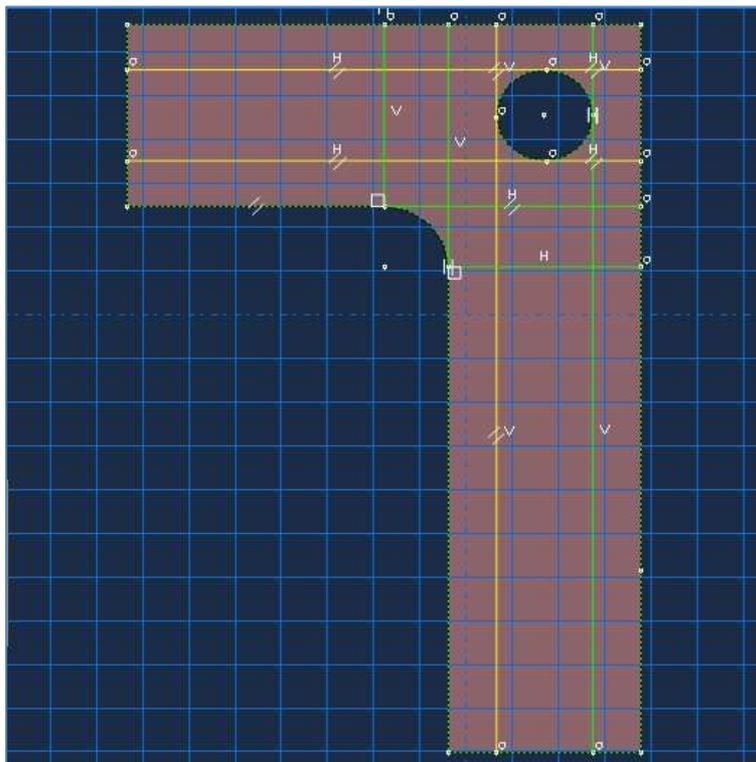
Como se necesita tener elementos con forma de cuadrado para comparar los resultados con la teoría clásica, hay que hacer particiones en el cuerpo para ayudar al programa a que lo malle correctamente y aisle las distorsiones que se creen.

Los pasos necesarios para hacer las particiones y mallar el cuerpo son:

- Se inicia el módulo *Mesh*.
- Se abre la pestaña *Tools* del menú desplegable de *Abaqus* y se selecciona la opción *Partition*. Aparece la ventana *Create Partition*.

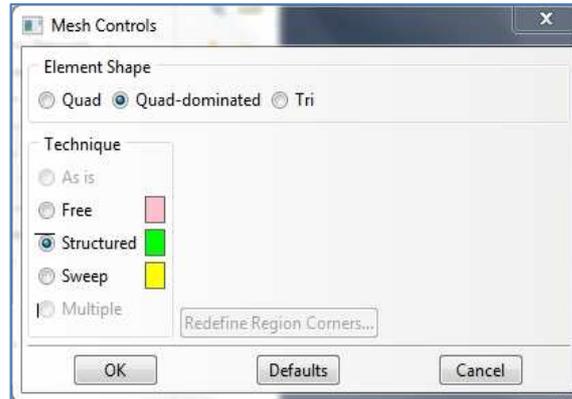


- Dentro de esta ventana, se selecciona *Face*→*Sketch*. El programa abre el *Sketch* y se realizan las particiones mostradas en la imagen para aislar las zonas conflictivas y que no perjudiquen el mallado. La herramienta del *Sketch* utilizada es .

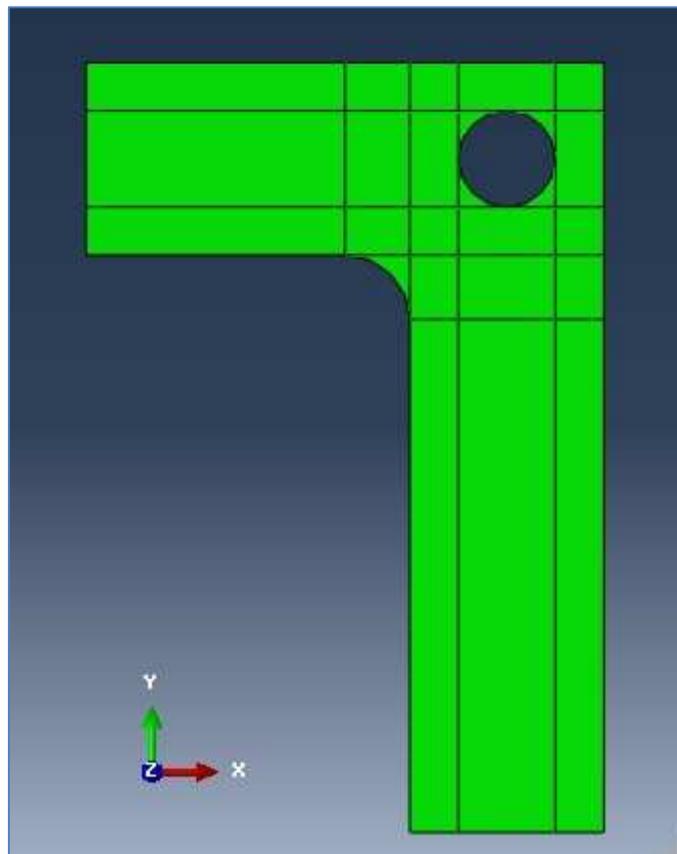


- Se pincha en *Done* para salir del *Sketcher* y volver al módulo *Mesh*.
- Se hace clic en  y se seleccionan las opciones mostradas en la imagen. Se selecciona *Quad-dominated* para que el programa forme elementos

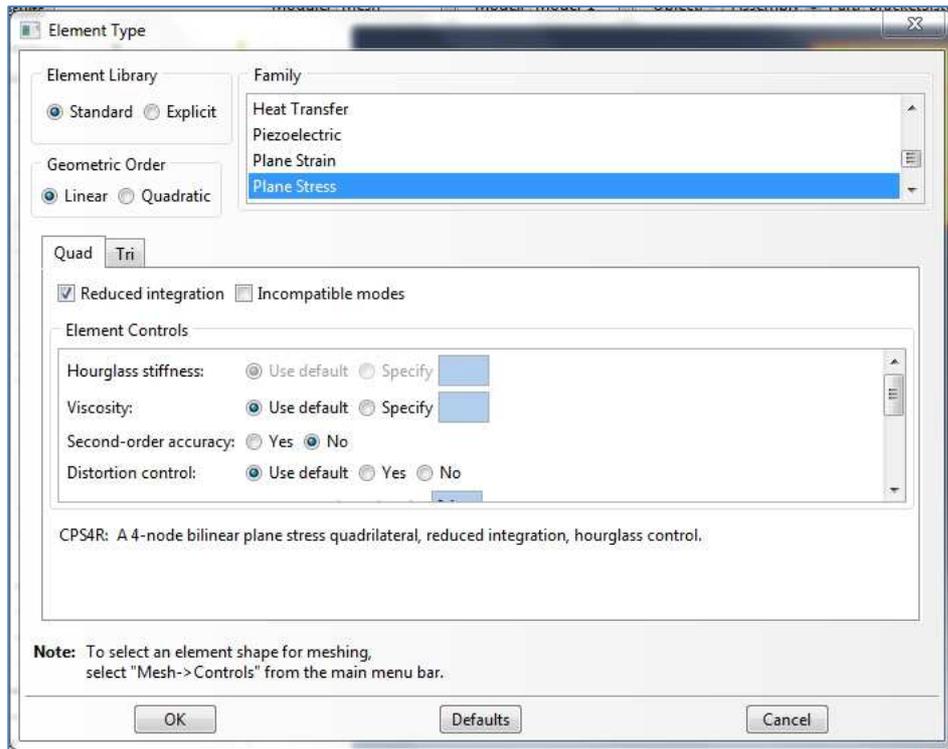
cuadrados siempre que sea posible, porque en las zonas de curva no podrá hacerlo.



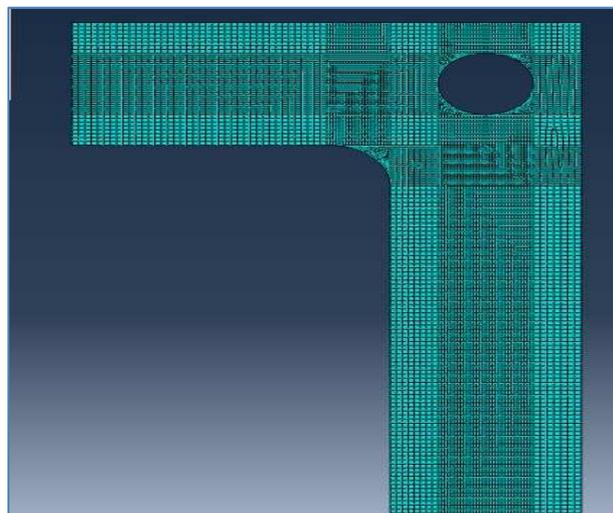
- El color del cuerpo se vuelve verde.



- Se pincha en el icono del menú de módulo  y aparece la ventana *Element Type*. Se eligen las opciones que aparecen en la imagen inferior y se pincha en *OK*.



- Ahora se hace un mallado distinto para las zonas más conflictivas:
  - Se crearán los nodos de todo el cuerpo con  a un tamaño de 0.05.
  - Se crearán los nodos de las zonas conflictivas con  a 0.01, de manera que quede como la imagen inferior.
  - Se pincha el botón  para crear la malla y el resultado es el de la imagen inferior. En realidad, la malla minuciosa bastaría hacerla en las zonas conflictivas, pero para no distorsionar la misma, hay que alargar el mallado detallado como figura en la imagen.



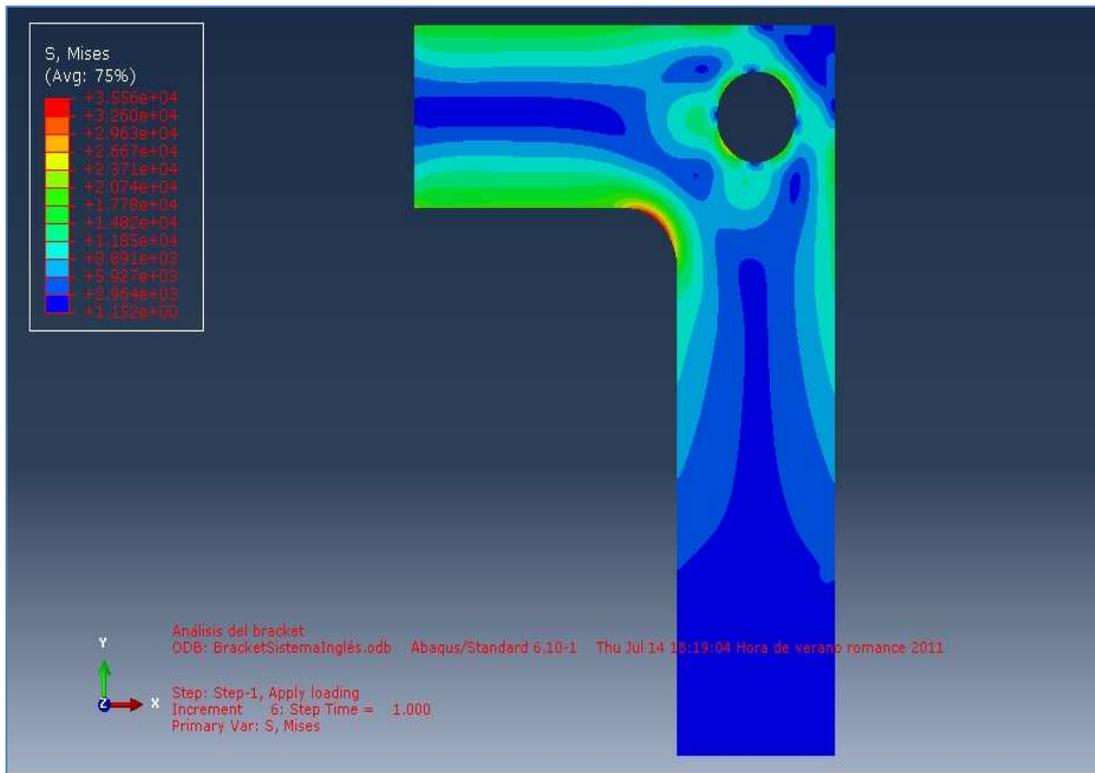
### 3.2.9. Creación del trabajo de análisis

Una vez configurado el análisis, se abre el módulo *Job* para crear un trabajo que esté asociado con el modelo y someter ese trabajo a análisis. Para ello:

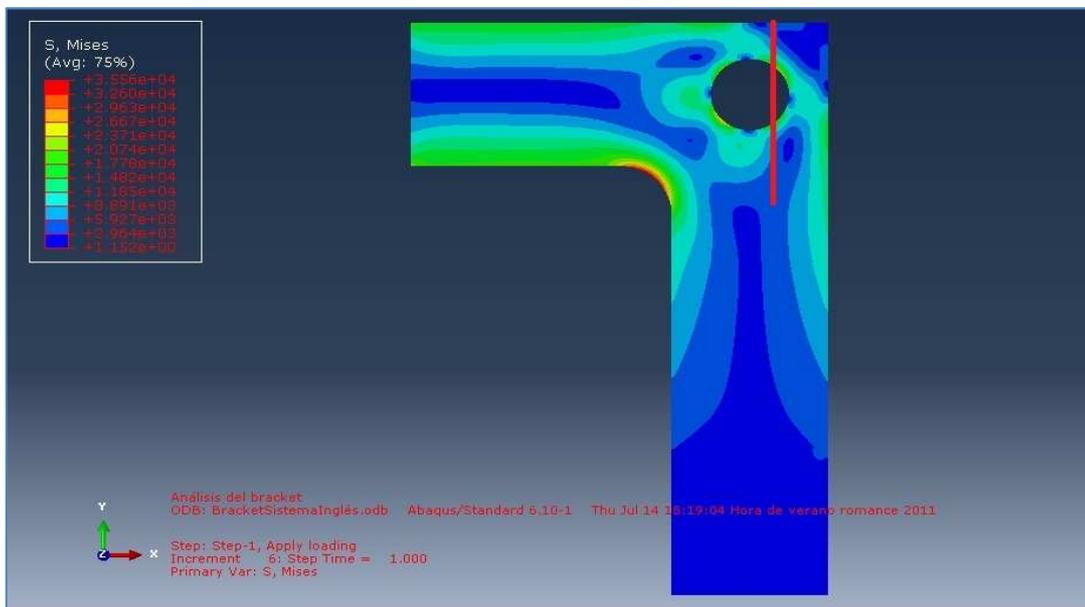
- Se entra en el módulo *Job* y se pincha en el icono . Aparece la ventana *Create Job* con la lista de los modelos que están disponibles en la base de datos de modelos.
- Se le da un nombre al trabajo y se hace clic en *Continue* para crearlo.
- Aparece la ventana *Edit job*.
  - *Description: Análisis del bracket*
  - *Job type: Full analysis*
  - *Run mode: Background*
  - *Submit time: Immediately*
- Se hace clic en *OK* para crear el trabajo.
- Se pincha sobre el icono , junto al icono  para abrir el *Job manager* y se pulsa en *Submit* para comenzar el análisis.
- Una vez concluido con éxito el análisis, se pincha en el botón *Results* de la ventana *Job Manager* para ver los resultados.

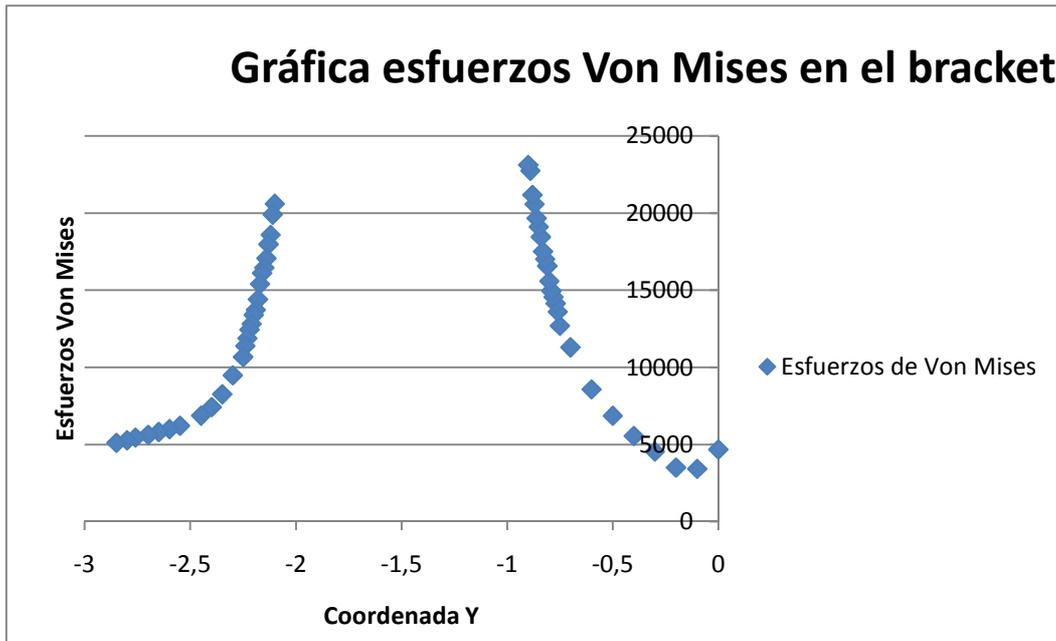
### 3.2.10. Visualización de los resultados del análisis

Los resultados que ofrece el programa para los esfuerzos de Von Mises son los mostrados en la imagen inferior. Como puede verse, los esfuerzos son máximos en el hombro y en las dos diagonales que atraviesan el círculo. Esto se debe a la concentración de tensiones provocada por la discontinuidad de la geometría y por las características del esfuerzo.

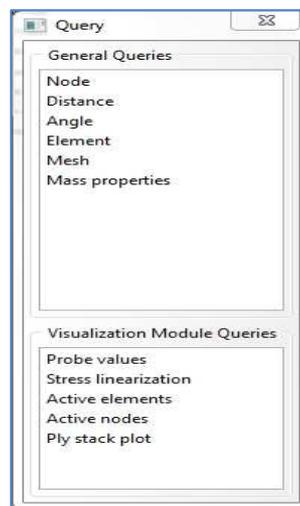


Si se toma una línea que atraviese el agujero por sus zonas más conflictivas como muestra la imagen inferior, los resultados para los esfuerzos de Von Mises son los mostrados en la gráfica.





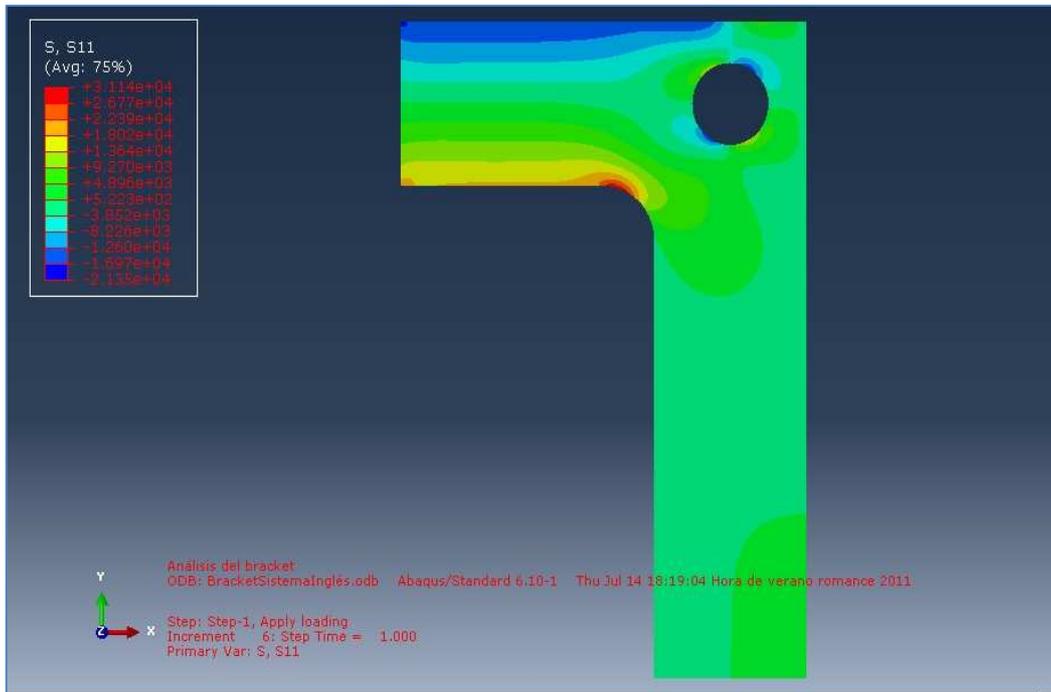
En este gráfico, se ha tomado el origen de coordenadas Y en el borde superior del bracket. Para obtener los valores exactos de cada punto, se ha utilizado una nueva herramienta. En el menú de *Abaqus* se hace clic en . Aparece la ventana *Query* que se muestra en la imagen inferior.



Dentro de esta ventana, se puede acceder al valor de cada nodo de dos formas: con la opción *Stress linearization* o con la opción *Probe values*. La primera opción permite dibujar una línea en el *Sketch* del dibujo o introducir las coordenadas de inicio y fin de la línea cuyos valores nodales se quiere averiguar. La segunda opción, permite seleccionar sobre el dibujo o introducir las coordenadas de cada nodo del que se quiere averiguar sus valores. Se ha optado por la segunda opción. Se han tomado nodos con la misma coordenada X y distinta coordenada Y de la línea marcada en el dibujo que atraviesa el agujero por sus puntos de máxima tensión. Como se puede ver

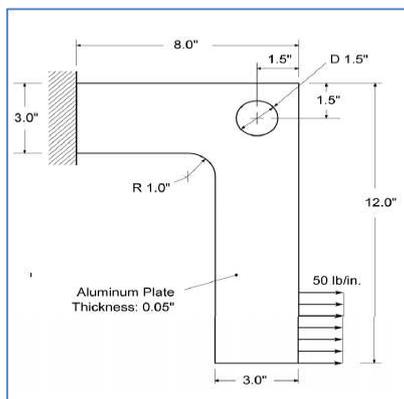
en el gráfico, en las zonas cercanas al agujero (zonas vacías del gráfico), las tensiones son máximas por la concentración de esfuerzos.

Para la comparación con la teoría clásica, nos interesa calcular los esfuerzos en la dirección del eje X, ya que el bracket está sometido a flexión y los esfuerzos generados por esa flexión serán en la dirección del eje X, según el sistema coordenado del programa. La imagen que se obtiene para los esfuerzos S11 es:



Como se puede ver en la leyenda que estratifica los esfuerzos por colores, el esfuerzo en la zona del agujero es de color amarillo anaranjado, lo que supone un esfuerzo de  $2.239 \cdot 10^4 \text{ lb/in}^2$ . El máximo esfuerzo se produce en el hombro del bracket y es de  $3.114 \cdot 10^4 \text{ lb/in}^2$ .

### 3.2.11. Comparación con la teoría clásica de cálculo



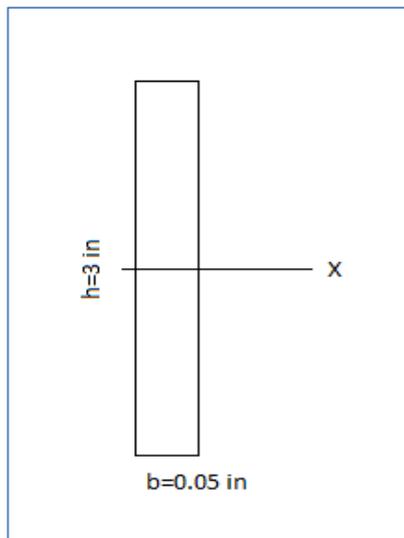
Ahora se calcularán los esfuerzos en la dirección normal a la sección para el empotramiento de la viga por la teoría clásica de cálculo. Según esta teoría, el esfuerzo en los bordes del agujero es 1,5 veces el esfuerzo en la pieza sin esa discontinuidad, considerando sólo la flexión.

La tensión por flexión es  $\sigma = \frac{M}{W} = \frac{M \cdot Z}{I}$

En este caso, la pieza tiene una sección en el empotramiento de  $3 \times 0.05 \text{ in}^2$ , como muestra la imagen inferior.

El momento de inercia respecto al eje x (imagen inferior), que es respecto al que sufre la flexión la pieza, es  $I_x = \frac{b \cdot h^3}{12}$  y la altura Z de la fórmula de la tensión será

Z=h/2. La tensión por flexión será  $\sigma = \frac{M \cdot h/2}{\frac{b \cdot h^3}{12}} = \frac{M \cdot 6}{b \cdot h^2}$ .



La fuerza aplicada sobre el bracket es de 50 lb/in, aplicada sobre una línea de 3 in de longitud. Por lo tanto, el momento resultante, aplicado en la mitad de esa línea (a 1.5 in de la parte inferior del bracket y a 9 in del centro de la sección en el empotramiento) es de

$$M = F \cdot d = (50 \text{ lb/in}) \cdot (3 \text{ in}) \cdot (9 \text{ in}) = 1350 \text{ lb} \cdot \text{in}$$

Y la tensión en la sección del empotramiento es de

$$\sigma = \frac{M \cdot 6}{b \cdot h^2} = \frac{(1350 \text{ lb} \cdot \text{in}) \cdot 6}{0.05 \text{ in} \cdot (3 \text{ in})^2} = 18000 \text{ lb/in}^2$$

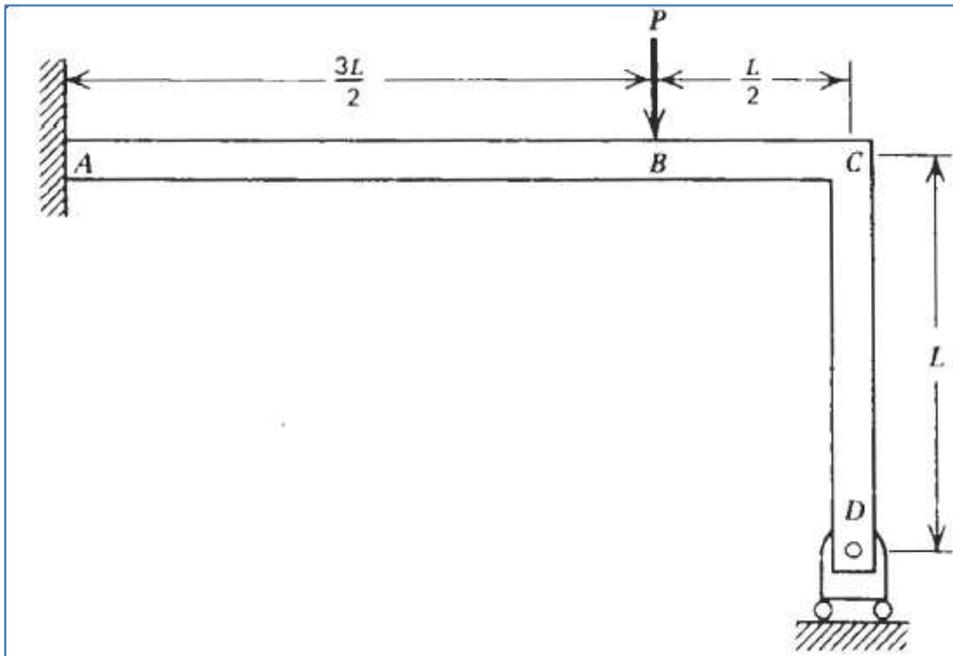
Esta sería la tensión máxima si la discontinuidad no existiera. Al existir esa discontinuidad, la tensión real en la discontinuidad es  $\sigma_{real} = 1.5 \sigma$ .

$$\sigma_{real} = 1.5 \cdot 18000 \text{ lb/in}^2 = 27000 \text{ lb/in}^2$$

Si se divide el resultado del programa entre el resultado de la teoría clásica, se obtiene:

$$\frac{2.239 \cdot 10^4}{27000} = 0.82926 \Rightarrow \text{Error} = 1 - 0.82926 = 0.17 < 0.25$$

### 3.3. EJEMPLO Nº 3: SEMIPÓRTICO CARGADO PUNTUALMENTE



En el siguiente ejemplo, se pretende averiguar la reacción en el apoyo D del semipórtico con una carga puntual en su elemento superior mostrado en la imagen. Se utilizarán para ello dos modelos distintos de análisis: en el primero, el modelo será lineal, es decir, formado por líneas y en el segundo, el modelo se diseñará en 2D.

Se tomarán los siguientes datos:

- $L = 1\text{m}$
- $P = 1\text{kN}$
- $E = 207\text{GPa}$
- $S = 50 \times 50 \text{ mm}^2$

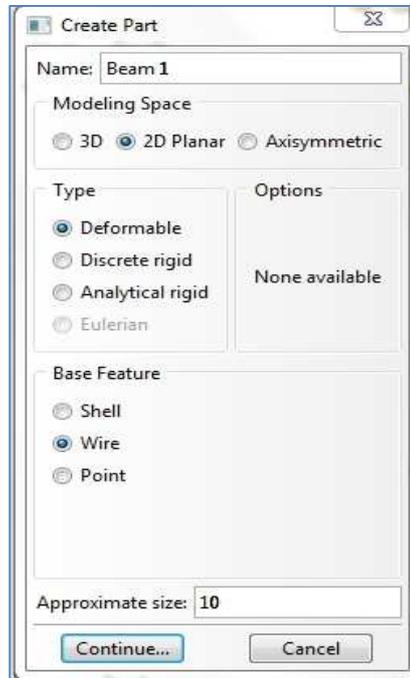
#### 3.3.1. Análisis del modelo lineal

##### 3.3.1.1. Creación de una parte

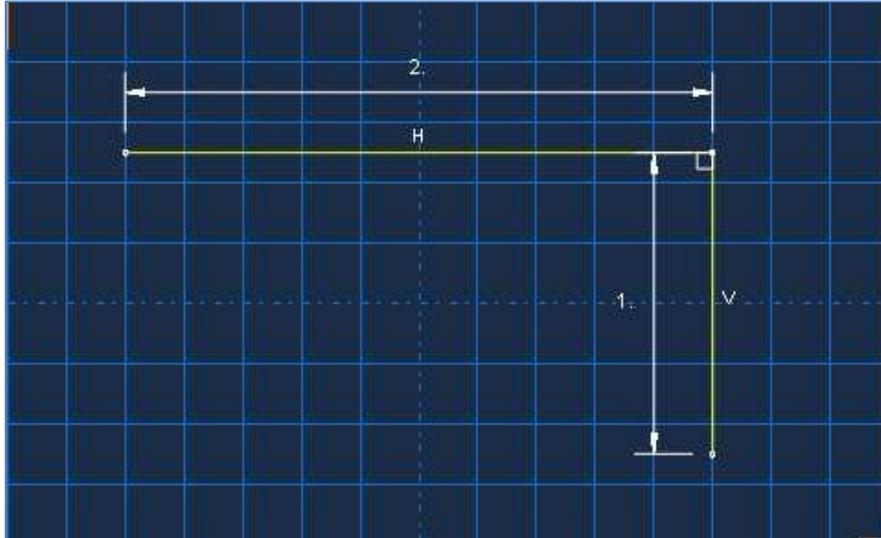
Se inicia el programa *Abaqus/CAE*. Se dibuja la geometría con el módulo *Part*:

- Se hace clic en el icono  del menú del módulo.
- Aparece la ventana *Create part*.
  - *Name: Beam 1*
  - *Modeling Space: 2D Planar*

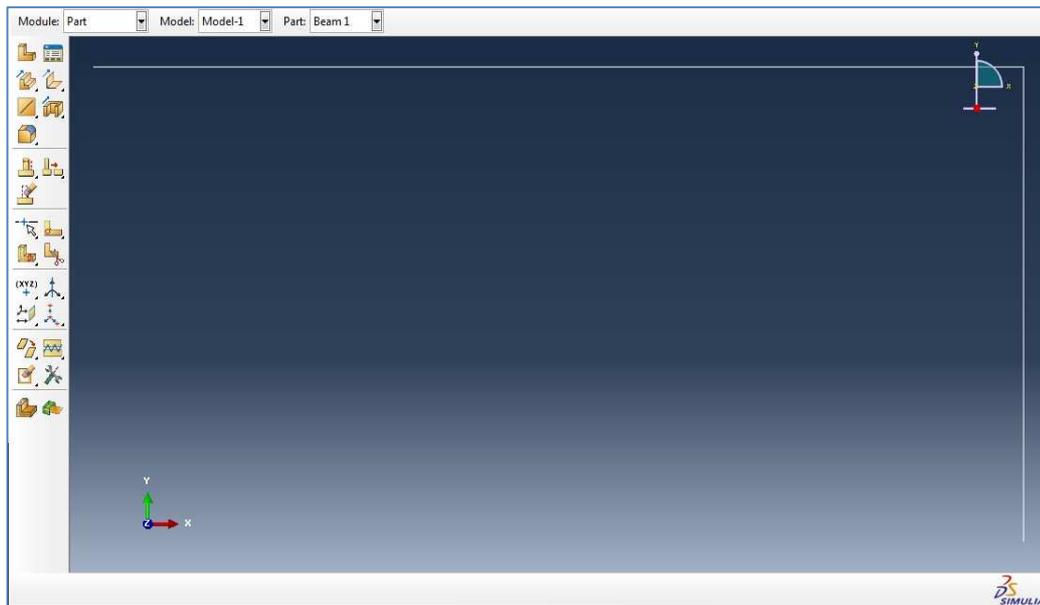
- *Type: Deformable*
- *Base Feature: Wire (alambre)*
- *Approximate Size: 10*



- Se hace clic en *Continue* para acceder al *Sketcher* y se activa la herramienta del módulo para crear líneas . Se dibujan dos líneas rectas formando un ángulo de 90° de 1 y 2 m.
- Se pincha de nuevo en la herramienta  para desactivarla.
- Se comprueba con el botón  que la longitud de las líneas es la necesitada de 1 y 2 m. Para ello, se pincha en el icono y, siguiendo las instrucciones de la línea de comandos, se seleccionan las dos líneas y se hace clic en *Done*. La imagen mostrada por el programa es la siguiente:



- Se pincha de nuevo en el icono de la herramienta para desactivarla.
- Se hace clic en *Done* para cerrar la herramienta de dimensionamiento y de nuevo en *Done* para terminar el diseño de la parte. El programa ha vuelto al módulo *Part* y muestra el resultado final:

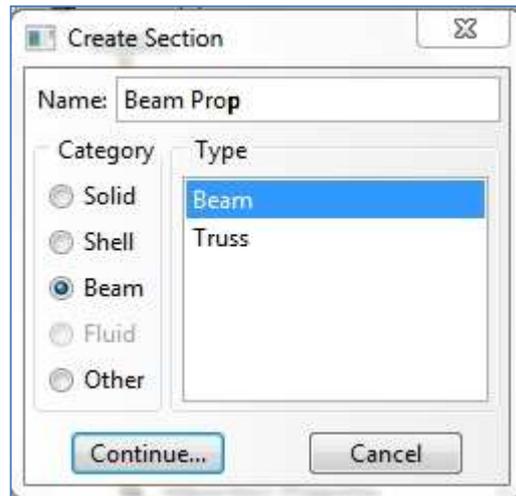


- Con este último paso, se termina el diseño de la parte.

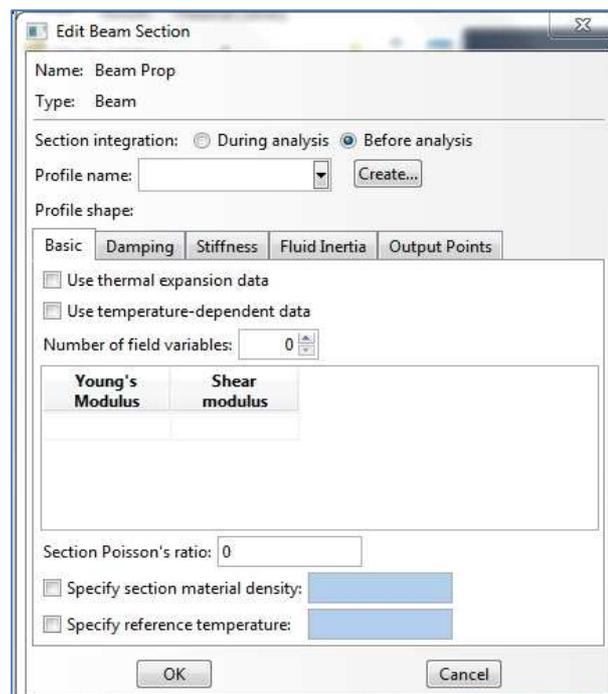
### 3.3.1.2. Creación del material

Para definir los materiales del ejercicio se debe utilizar el módulo *Property*. Se entra en este módulo seleccionándolo en la pestaña desplegable del menú de *Abaqus*. Una vez dentro del módulo, los pasos a seguir son los siguientes:

- Se hace clic en el icono  del menú del módulo. La ventana *Create section* aparece en pantalla.

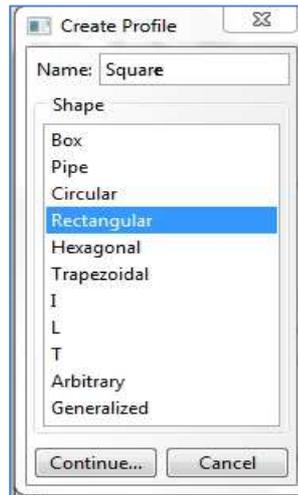


- Se nombra a la sección como *Beam Prop*.
  - Se selecciona *Beam* como *Category* y *Beam* como *Type*.
- Se hace clic en *Continue* y aparece la pantalla *Edit Beam Section*.

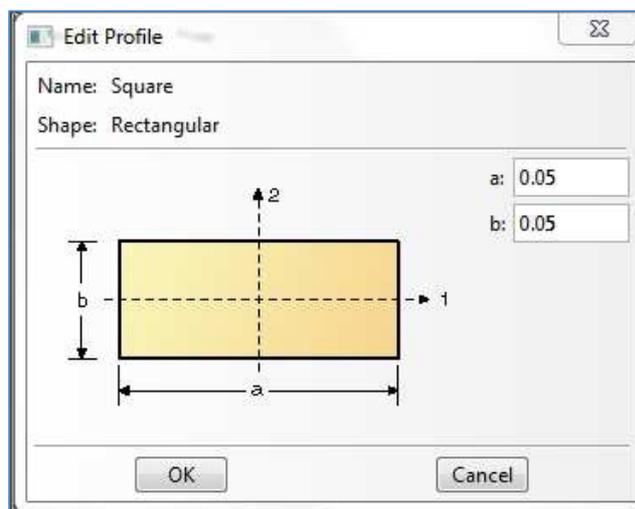


Dentro de esta pantalla:

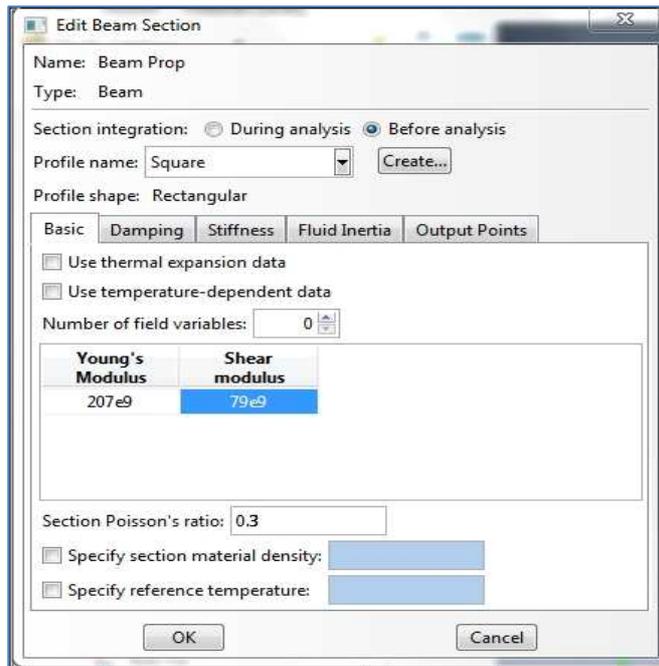
- *Section integration: Before Analysis*
- *Profile name:* se presiona en el botón *Create* y, dentro de la ventana emergente, se elige un nombre, *Square*, y se elige *Rectangular* como *Shape*, ya que para el cálculo se va a considerar una sección cuadrada de  $50 \times 50 \text{ mm}^2$ .



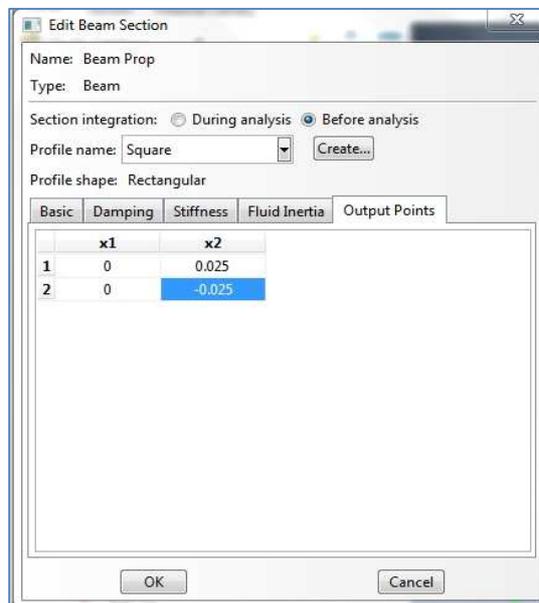
- Se hace clic en *Continue* y aparece la pantalla *Edit Profile*. Se introducen los valores  $a = 50$  y  $b = 50$  para crear la sección de  $50 \times 50 \text{ mm}^2$ .



- Se hace clic en *OK* y se regresa a la pantalla *Edit Beam Section*.



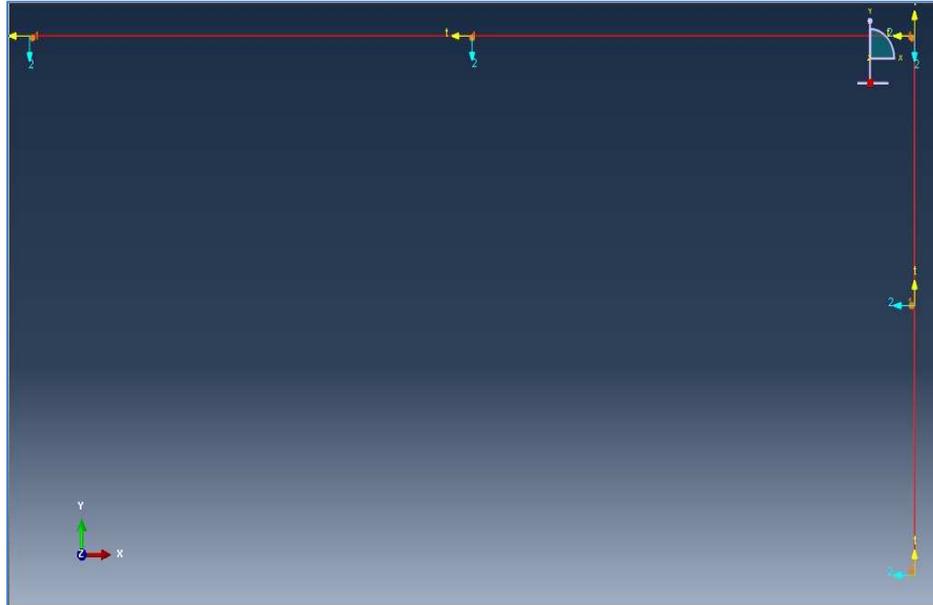
- En esta pantalla, se introducen los valores del módulo de Young, 207e9 Pa, del módulo de cortadura, 79e9 Pa, y del coeficiente de Poisson, 0.3.
- Se hace clic en la pestaña *Output points* y se definen los puntos de análisis en el punto de abscisa 0 y en los extremos superior e inferior de la sección:



- Se hace clic en *OK* para crear la sección y se asigna la sección al cuerpo con la función .
- Se determina la orientación de la sección con el botón . Para ello, se seleccionan ambas líneas y se introduce el vector (0, 0, -1). Con esta

acción, se pone en línea el eje 1 de la sección para la que se definieron los valores de  $a$  y  $b$ , con el eje  $Z$  del modelo.

- Se presiona *OK* para aceptar los valores introducidos y el programa muestra los ejes en los extremos y en los puntos medios de las barras.

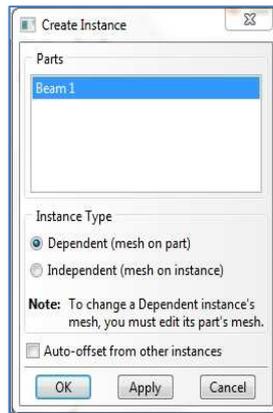


### 3.3.1.3. Ensamblado del modelo

Al igual que en los otros dos ejemplos, hay una única parte en el modelo, por lo que este paso carece de importancia.

Para ensamblar el modelo se siguen los siguientes pasos:

- Se selecciona el módulo *Assembly* de la lista de módulos.
- Se hace clic en el icono  en el menú propio del módulo. Aparece la ventana *Create Instance*.

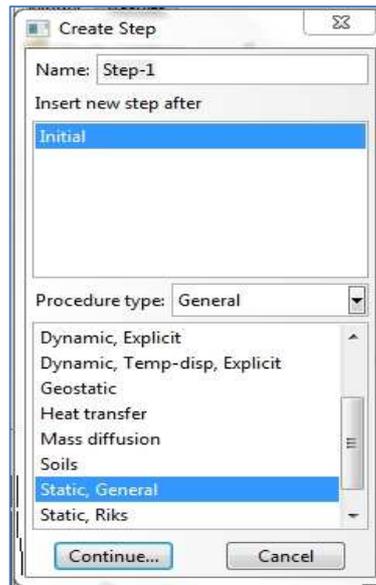


- Se acepta en *Parts* la única opción *Beam 1*, se selecciona *Independent* y se hace clic en *OK*. Se debe marcar *Independent* a fin de que más tarde nos deje dividir la viga para situar la carga en el módulo *Load*.
- *Abaqus/CAE* crea la *instance* del pórtico y se termina el trabajo con este módulo.

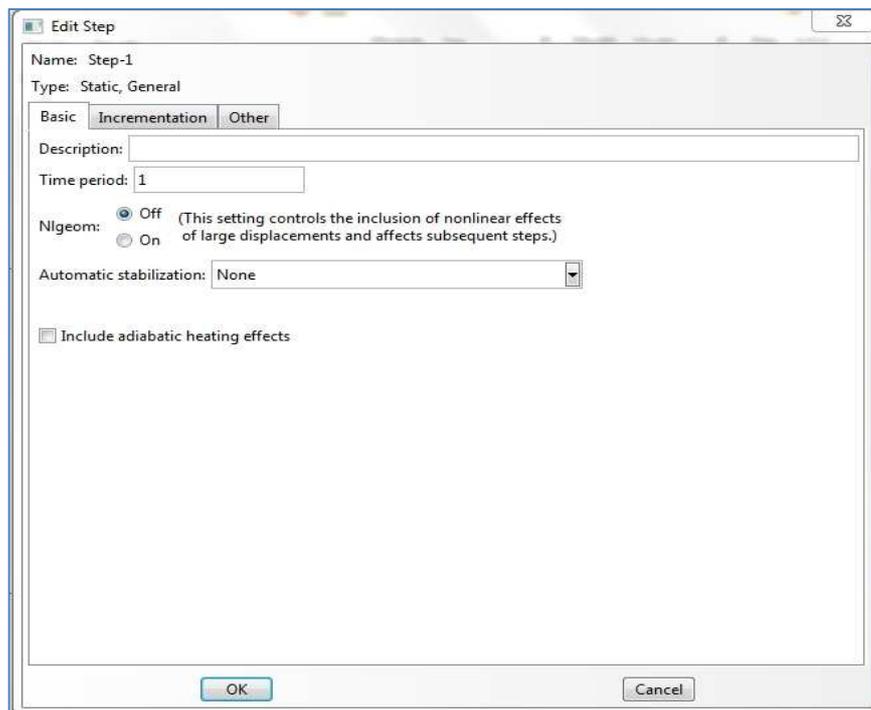
#### 3.3.1.4. Configuración del análisis

Una vez creado el modelo del pórtico, se puede entrar en el módulo *Step* para la configuración del análisis. De nuevo, sólo se necesitarán dos pasos, el paso inicial generado automáticamente por el programa y un paso estático general en el que se aplicarán las cargas al modelo.

- Se selecciona el módulo *Step* en la lista de módulos.
- En el menú propio del módulo, se hace clic en el icono .
- Aparece la ventana *Create Step*, en la que figura el paso que genera el programa por defecto, *Initial*. Dentro de esta ventana, se acepta el nombre por defecto del nuevo paso (*Step1*) y se selecciona *Static General* dentro de los tipos de paso que ofrece.
- Se hace clic en *Continue* para continuar con el análisis.



- Aparece la ventana *Edit Step* con las opciones por defecto para un paso estático general. Estas opciones son válidas para el análisis que se quiere realizar, por lo que se presiona *OK* para crear el paso.

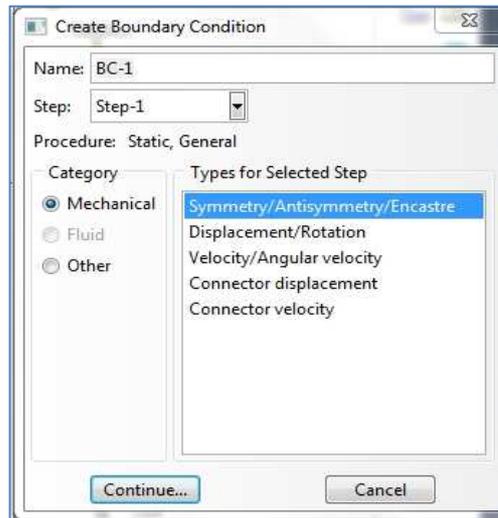


- No es necesario modificar las salidas por defecto del programa porque las opciones incluyen las variables que se necesitan para este ejemplo.

### 3.3.1.5. Condiciones de borde

Para aplicar las condiciones de borde, se selecciona el módulo *Load* y se siguen los siguientes pasos:

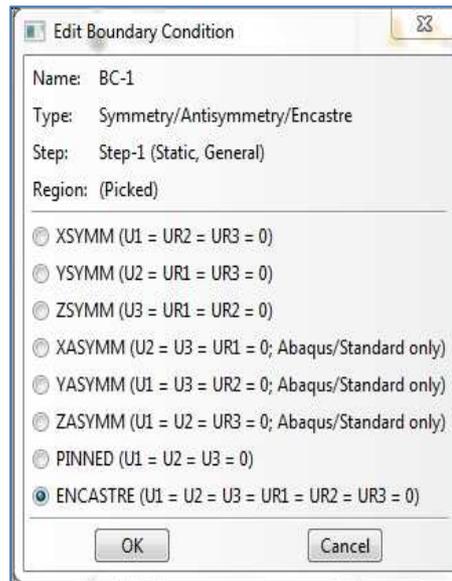
- En el menú del módulo, se utiliza la herramienta . Aparece la ventana *Create Boundary Condition*.



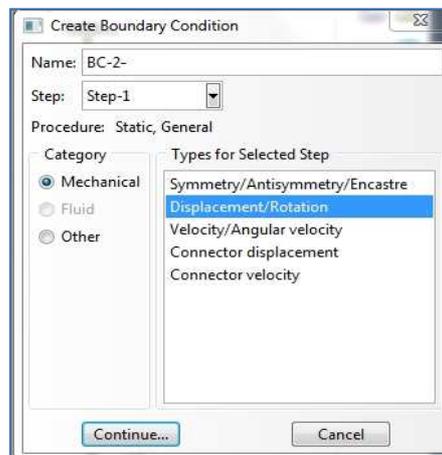
- En la ventana *Create Boundary Condition*:
  - Se selecciona el paso *Step 1* como el paso en el que se aplicará la condición de contorno.
  - Se acepta *Mechanical* como la opción válida de la lista *Category*.
  - Se selecciona *Symetry/Antisymetry/Encastre* como el tipo de condición de borde y se hace clic en *Continue*.

*Abaqus* muestra mensajes en el área de avisos para guiar al usuario.

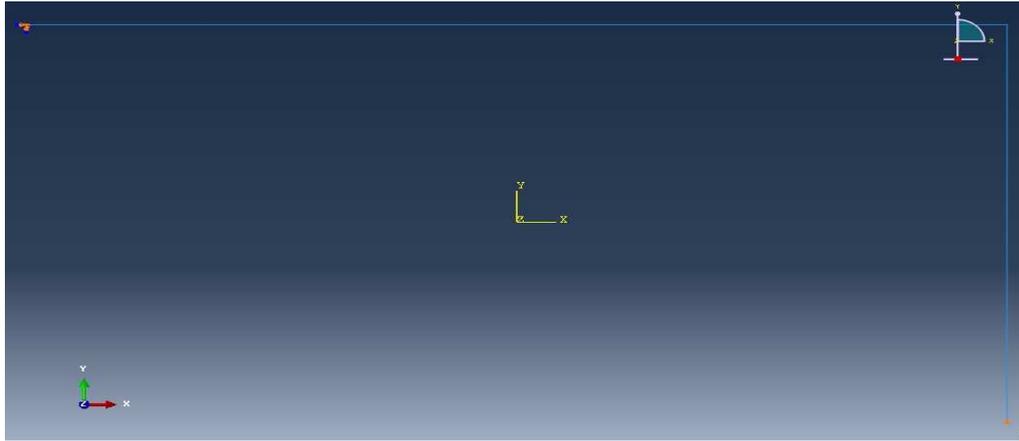
- Se hace clic sobre el extremo izquierdo de la viga, donde va a estar el empotramiento.
- Se pincha en *Done* en el área de avisos para indicar que se ha acabado la selección. Aparece la ventana *Create Boundary Condition*.



- En esta ventana, se selecciona la opción *ENCASTRE* y se hace clic en *OK* para crear el empotramiento.
- Se vuelve a pulsar en el icono  para crear la segunda condición. En esta ocasión, como se tiene que simular un apoyo simple, se selecciona la opción *Displacement/Rotation* dentro de la categoría *Mechanical*.



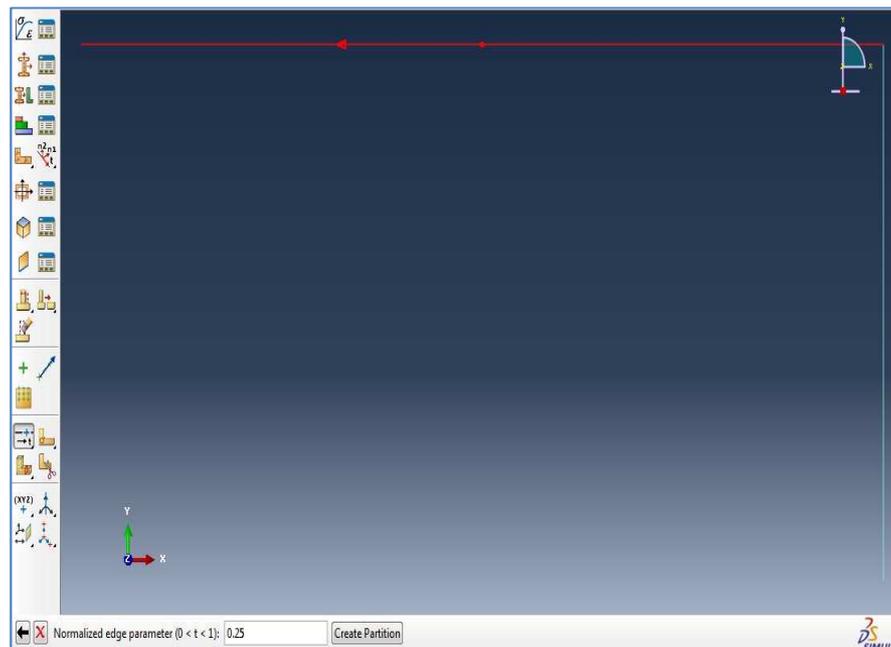
- Se selecciona el paso *Step-1* y se presiona *OK*.
- Se selecciona el punto inferior del pilar y se presiona *Done*.
- Se activa la opción *U2* y se introduce el valor 0 (no podrá desplazarse en sentido vertical).
- Hacer clic en *OK* para crear la condición. *Abaqus/CAE* crea flechas en los puntos en los que se han aplicado las condiciones de contorno para indicar los grados de libertad impedidos.



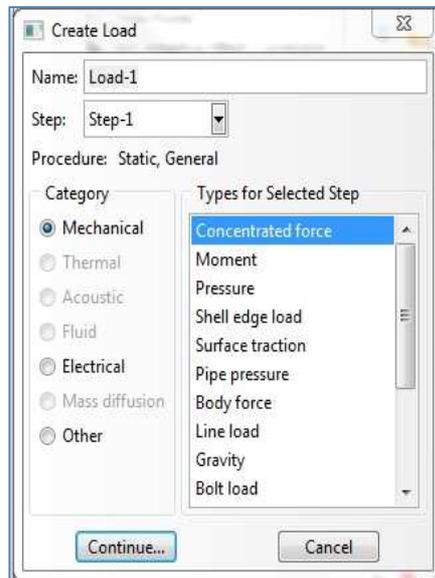
### 3.3.1.6. Carga en la viga

Los pasos a seguir para crear la carga puntual sobre la viga son:

- Se pulsa sobre el icono  en el menú del módulo *Load* para que se desplieguen las opciones ocultas y se selecciona  para crear la división necesaria para situar la carga a 1.5 m del empotramiento. Se selecciona el elemento a partir y, como la flecha señala hacia la izquierda, se introduce el valor 0.25 y se da a *Create partition*. Si la flecha estuviera en la otra dirección, se tendría que poner 0.75.

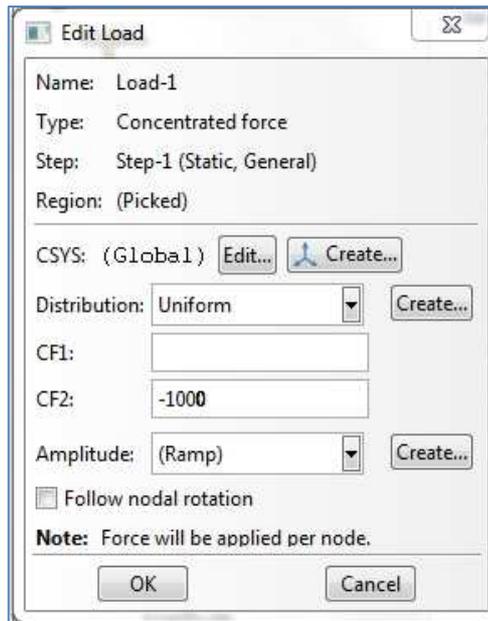


- Con la división ya creada, se hace clic en .
- Aparece la ventana *Create Load*.

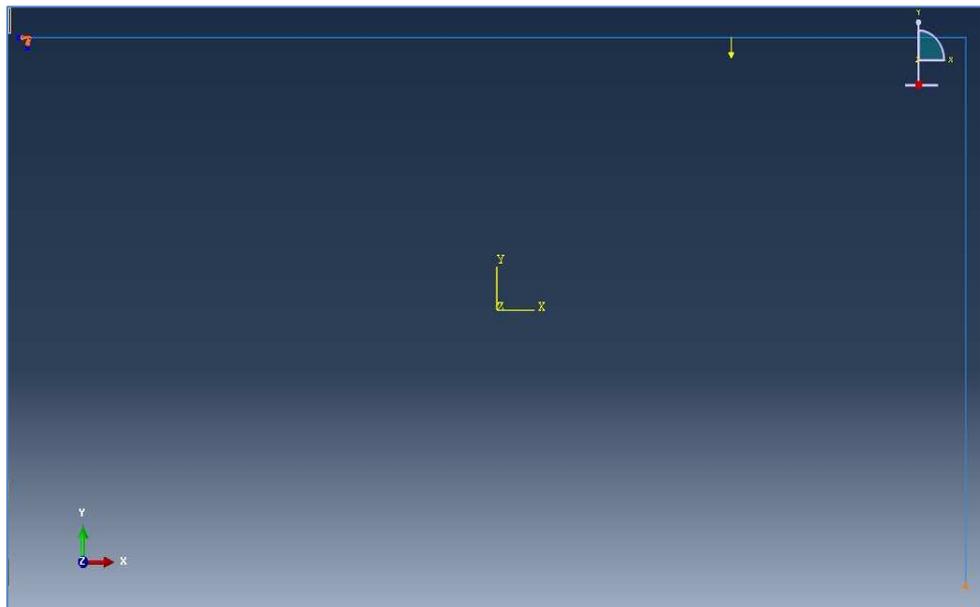


Dentro de esta ventana:

- Se nombra la carga como *Load-1*.
  - Se selecciona el paso *Step-1* como el paso en el que se aplicará la carga.
  - En la lista *Category*, se acepta *Mechanical* como la categoría por defecto.
  - En la lista *Type for Selected Step*, se selecciona *Concentrated force* para el tipo de carga y se hace clic en *Continue*.
- Se selecciona el punto recientemente creado en la viga.
  - Se hace clic en *Done* para indicar que se ha terminado la selección.
  - Aparece la ventana *Edit Load*. Dentro de ella:
    - Se introduce el valor de -1000 en *CF2* para indicar que en la dirección negativa del eje Y habrá una carga de 1000 N.
    - Se acepta la selección de *Amplitude* por defecto.
    - Se hace clic en *OK* para crear la carga y cerrar la ventana.



- *Abaqus* crea una flecha indicando la dirección y posición de la carga.



### 3.3.1.7. Mallado del modelo

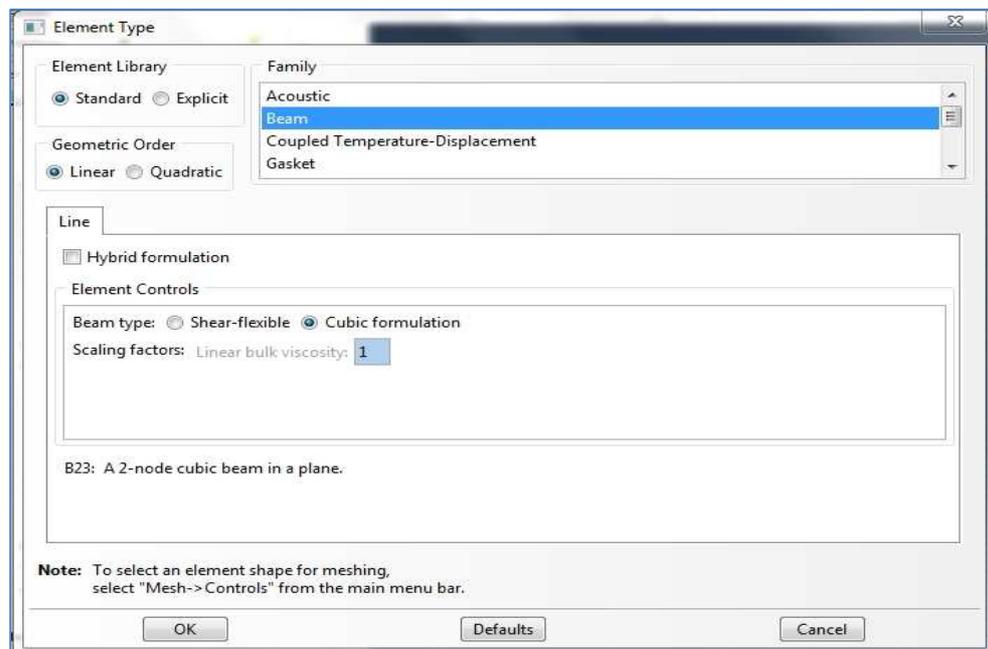
Para mallar el modelo, se empleará el módulo *Mesh*. Los pasos necesarios para mallar el cuerpo son:

- Se inicia el módulo *Mesh*.
- Se hace clic en el icono del menú de módulo  y se introduce un valor de tamaño 0.5 para que cree un nodo cada medio metro. Se hace clic en

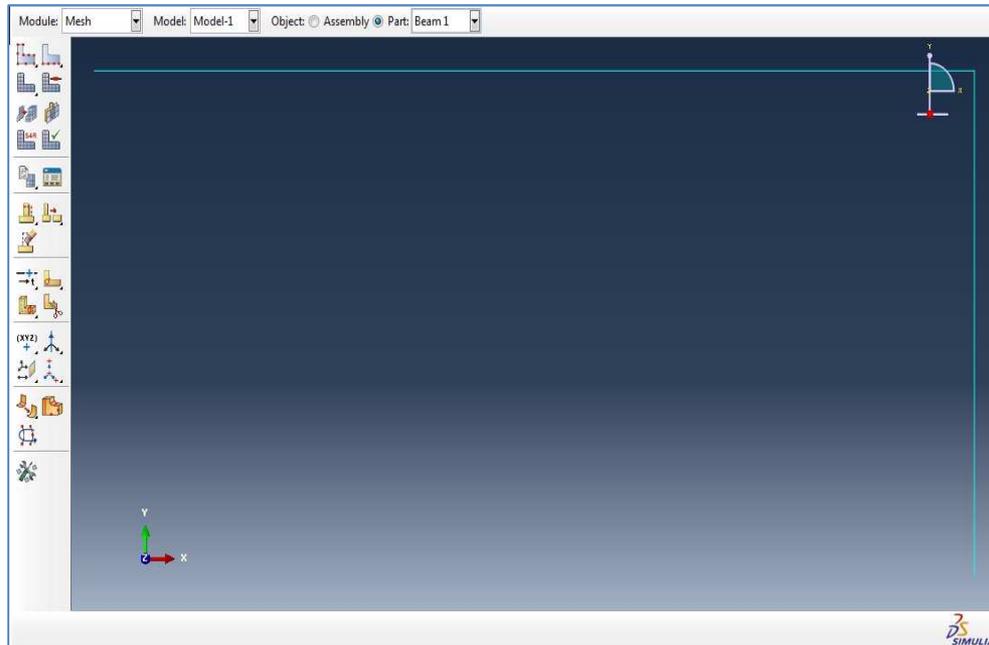
OK y después en *Done* para obtener la imagen inferior, donde se ven las divisiones de los nodos cada 0.5 m:



- Se pincha en el icono del menú de módulo  y se seleccionan las tres barras. Ahora son tres gracias a la división efectuada en la viga para aplicar la carga.
- Se presiona *Done* y aparece la ventana *Element Type*. Se eligen las opciones que aparecen en la imagen inferior y se pincha en *OK*.



- Se hace clic en el botón  para mallar el modelo. En esta ocasión, el mallado no se puede apreciar en la imagen que arroja *Abaqus* al tratarse de elementos lineales.



### 3.3.1.8. Creación del trabajo de análisis

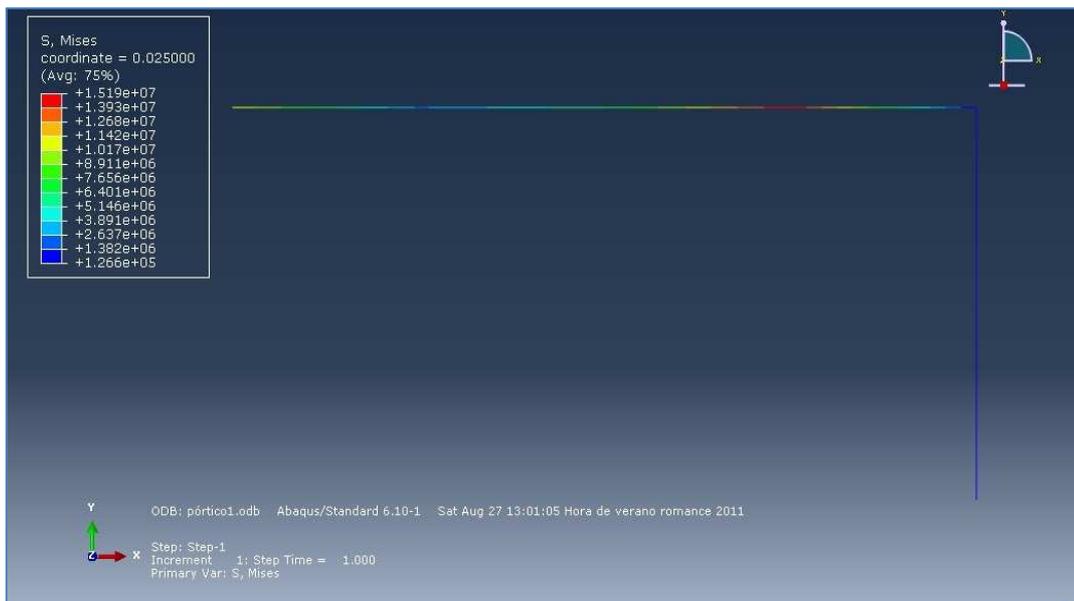
Una vez configurado el análisis, se abre el módulo *Job* para crear un trabajo que esté asociado con el modelo y someter ese trabajo a análisis. Para ello:

- Se entra en el módulo *Job* y se pincha en el icono . Aparece la ventana *Create Job* con la lista de los modelos que están disponibles en la base de datos de modelos.
- Se le da un nombre al trabajo y se hace clic en *Continue* para crearlo.
- Aparece la ventana *Edit job*.
  - *Description: Análisis del pórtico 1*
  - *Job type: Full analysis*
  - *Run mode: Background*
  - *Submit time: Immediately*
- Se hace clic en *OK* para crear el trabajo.
- Se pincha sobre el icono , junto al icono  para abrir el *Job manager* y se pulsa en *Submit* para comenzar el análisis.

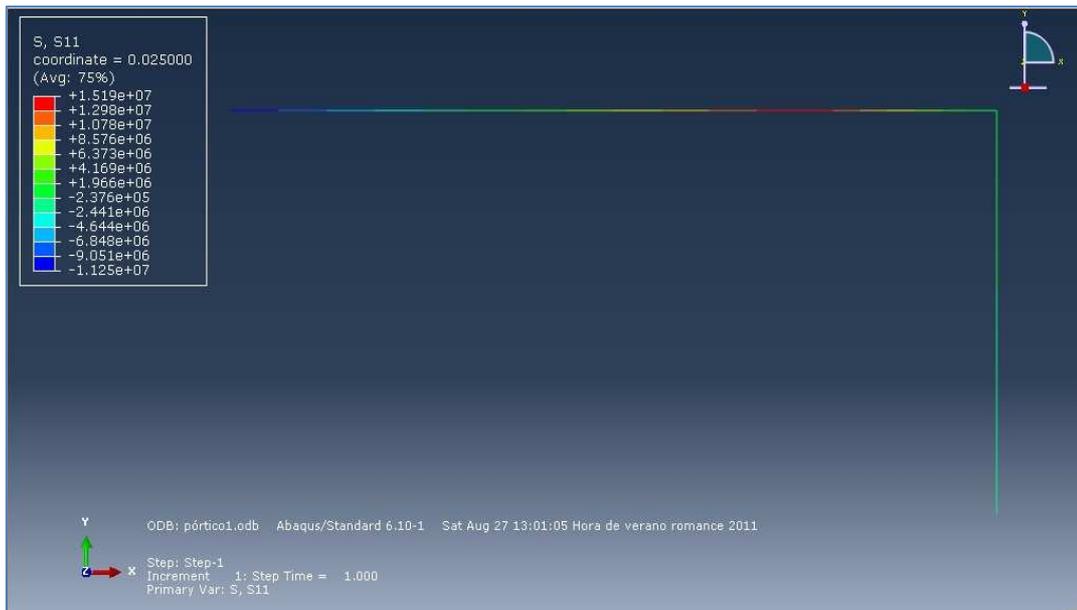
- El programa lanza un mensaje para que se le asigne la orientación de la sección de nuevo a la viga. Esto ocurre porque una parte de la viga ha perdido la orientación que ya se le dio al partirla para poner la carga puntual. Basta con volver al módulo *Property* y repetir los pasos para darle una orientación a la sección.
- Se vuelve al módulo *Job* y se hace clic en *Submit*. Esta vez el programa no da error y comienza el análisis.
- El análisis es muy corto por la simplicidad del modelo.
- Una vez concluido con éxito el análisis, se pincha en el botón *Results* de la ventana *Job Manager* para ver los resultados.

### 3.3.1.9. Visualización de los resultados del análisis

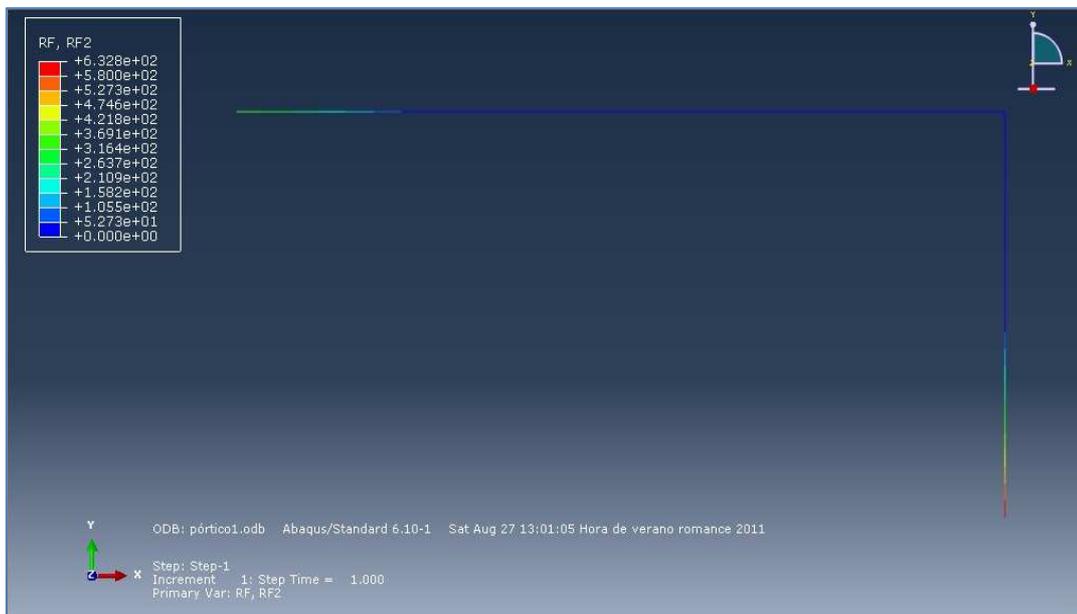
Los resultados que ofrece el programa para los esfuerzos de Von Mises son los mostrados en la imagen inferior. Como puede verse, los esfuerzos son máximos en el punto de aplicación de la carga.



Ahora se selecciona del menú desplegable de *Abaqus* la opción *S11* para ver los esfuerzos en la dirección del eje *X*. El esfuerzo máximo es de  $1.519 \cdot 10^7$  Pa en el punto de aplicación de la carga. El esfuerzo de Von Mises y su componente *S11* son iguales en este punto, por lo que estará compuesto únicamente por esa componente.



Si se escoge la opción  $RF \rightarrow RF2$  en el menú desplegable, el valor máximo para la reacción en la dirección del eje Y se obtiene en el apoyo simple y es de 632,8 N.



A continuación se realizará el ejercicio en 2D y se analizarán las diferencias con la teoría clásica.

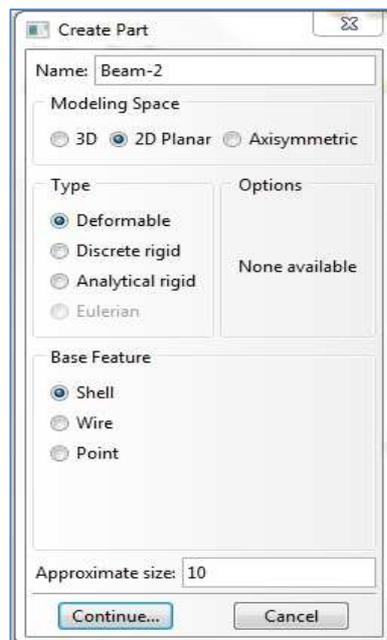
### 3.3.2. Análisis del modelo en 2D

Ahora se realizará el mismo ejercicio pero utilizando un modelo en dos dimensiones.

#### 3.3.2.1. Creación de una parte

Se inicia el programa *Abaqus/CAE* y se dibuja la geometría con el módulo *Part*:

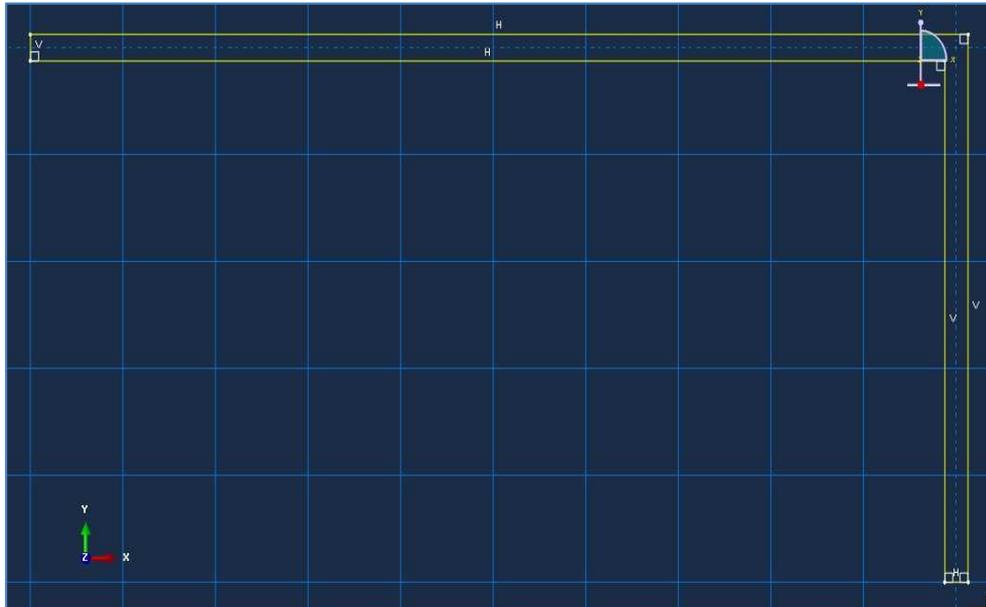
- Se hace clic en el icono  del menú del módulo.
- Aparece la ventana *Create part*.
  - *Name: Beam-2*
  - *Modeling Space: 2D Planar*
  - *Type: Deformable*
  - *Base Feature: Shell*
  - *Approximate Size: 10*



- Se hace clic en *Continue* para acceder al *Sketcher* y se activa la herramienta del módulo para crear líneas . Hay que tener en cuenta que ya no se está dibujando una simplificación del problema, hay que dibujar la geometría real y considerar las dimensiones de la sección a la hora de introducir las coordenadas.
- Se introducen las siguientes coordenadas:
  - (-2, 0.025)
  - (0.025, 0.025)

- (0.025, -1)
- (-0.025, -1)
- (-0.025, -0.025)
- (-2, -0.025)
- Se cierra el polígono.

Con estas coordenadas, el eje de la pieza coincide con el modelo lineal tomado para el análisis anterior, de longitudes 1 y 2 m.



- Se pincha de nuevo en la herramienta  para desactivarla.
- Se hace clic en *Done* para terminar el diseño de la parte. El programa ha vuelto al módulo *Part* y muestra el resultado final:

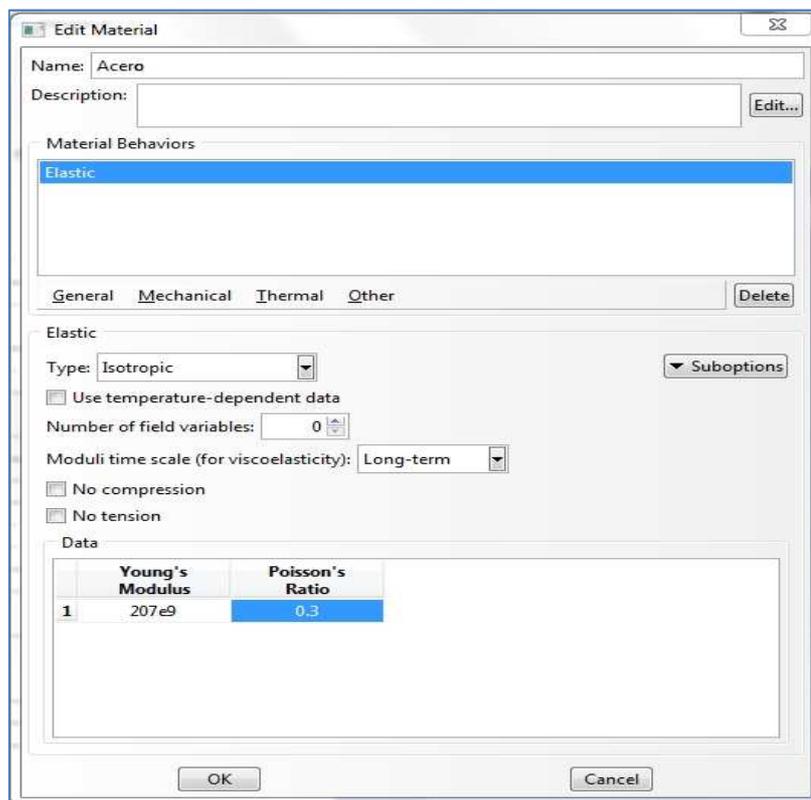


- Con este último paso, se termina el diseño de la parte.

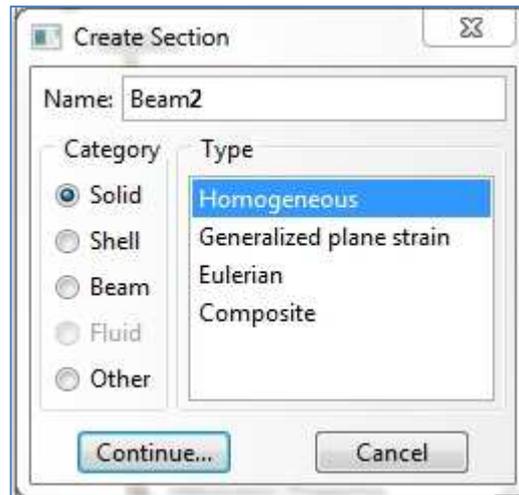
### 3.3.2.2. Creación del material

Para definir los materiales del ejercicio se debe utilizar el módulo *Property*. Se entra en este módulo seleccionándolo en la pestaña desplegable del menú de *Abaqus*. Una vez dentro del módulo, los pasos a seguir son los siguientes:

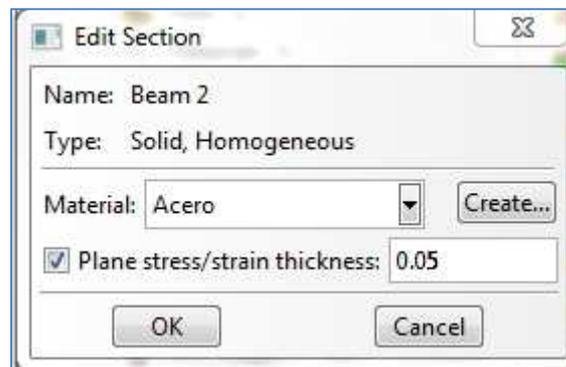
- Se hace clic en la herramienta  para abrir la ventana *Edit Material*.
- En la ventana *Edit Material*:
  - Se nombra al material: *Acero*
  - Se pulsa en el menú desplegable *Mechanical*→*Elasticity*→*Elastic* y se introducen las características del material: Módulo de Young,  $207 \cdot 10^9$  Pa, y coeficiente de Poisson 0,3.



- Se hace clic en el icono  del menú del módulo. La ventana *Create section* aparece en pantalla.



- Se nombra a la sección como *Beam2*.
- Se selecciona *Solid* como *Category* y *Homogeneous* como *Type*.
- Se hace clic en *Continue* y aparece la pantalla *Edit Section*.
- Se acepta el único material de la lista, *Acero*, como material para la sección y se le da un espesor de plano de tensión de 0.05.



- Se hace clic en *OK* para crear la sección.
- Se asigna la sección al cuerpo con la función .

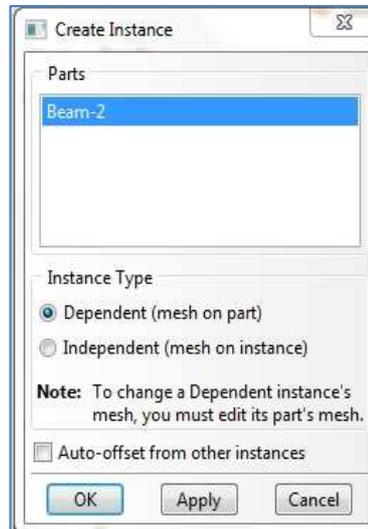
### 3.3.2.3. Ensamblado del modelo

Al igual que en los otros tres ejemplos, hay una única parte en el modelo, por lo que este paso carece de importancia.

Para ensamblar el modelo se siguen estos pasos:

- Se selecciona el módulo *Assembly* de la lista de módulos.

- Se hace clic en el icono  en el menú propio del módulo. Aparece la ventana *Create Instance*.



- Se acepta en *Parts* la única opción *Beam-2*, se marca *Independent* y se hace clic en *OK*.
- *Abaqus/CAE* crea la *instance* del pórtico y se termina el trabajo con este módulo.

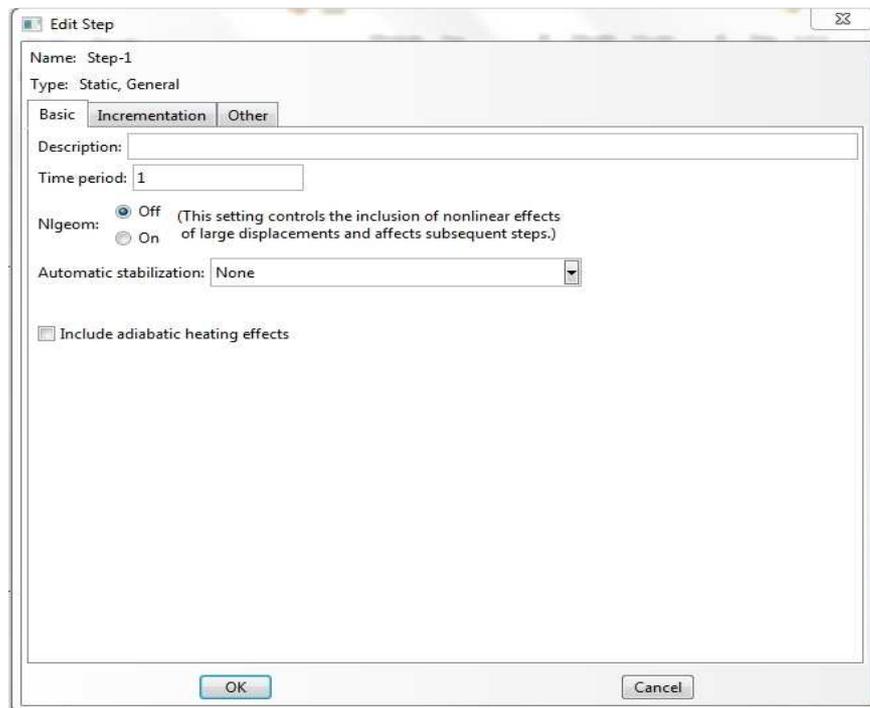
#### 3.3.2.4. Configuración del análisis

Una vez creado el modelo del pórtico, se entra en el módulo *Step* para la configuración del análisis. De nuevo, sólo se necesitan dos pasos, el paso inicial generado automáticamente por el programa y un paso estático general en el que se aplicarán las cargas al modelo.

- Se selecciona el módulo *Step* en la lista de módulos.
- En el menú propio del módulo, se hace clic en el icono .
- Aparece la ventana *Create Step*, en la que figura el paso que genera el programa por defecto, *Initial*. Dentro de esta ventana, se acepta el nombre por defecto del nuevo paso (*Step1*) y se selecciona *Static General* dentro de los tipos de paso que ofrece.
- Se hace clic en *Continue* para continuar con el análisis.



- Aparece la ventana *Edit Step* con las opciones por defecto para un paso estático general. Estas opciones son válidas para el análisis que se quiere realizar, por lo que se presiona *OK* para crear el paso.



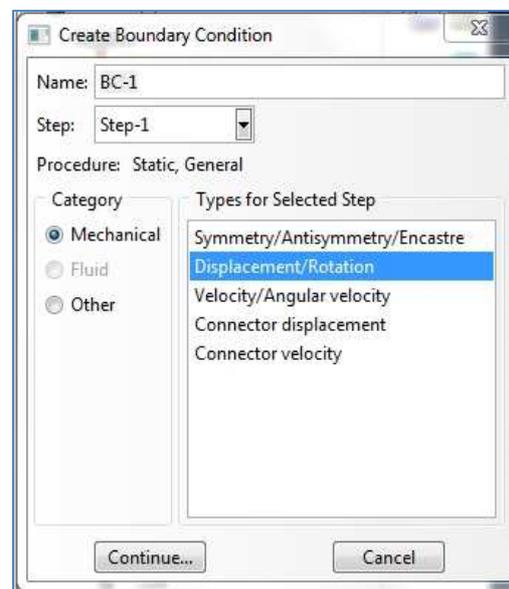
- No es necesario modificar las salidas por defecto del programa porque las opciones incluyen las variables que se necesitan para este ejemplo.

### 3.3.2.5. Condiciones de borde

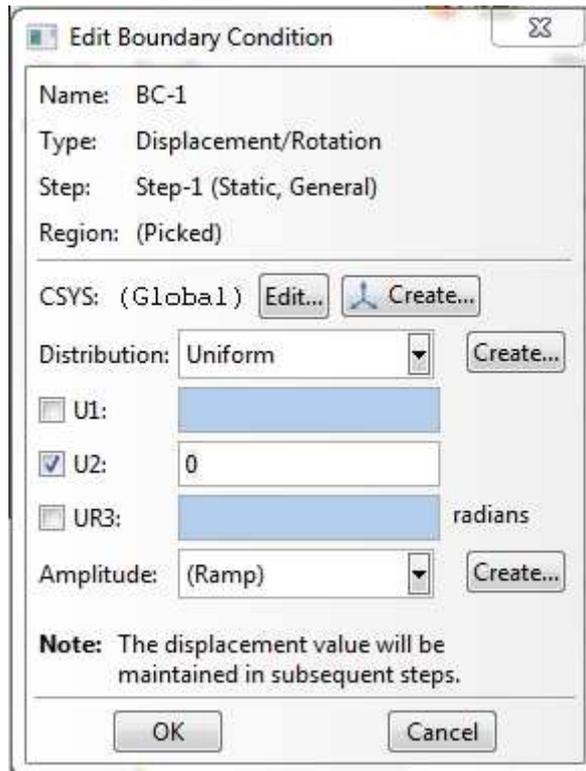
Se tienen que aplicar dos condiciones de borde, un empotramiento y un apoyo simple. Se empezará por el apoyo simple.

Para aplicar esta condición de borde, se pueden seguir dos procedimientos: Se utiliza la herramienta *Partition Edge* para situar un punto en el medio de la parte inferior del pilar, donde estaría el apoyo simple; o sólo se sujeta uno de los dos puntos extremos del soporte, el izquierdo o el derecho. Se debe hacer así porque se trata de un apoyo simple que no permite el desplazamiento en dirección Y pero sí el desplazamiento en las otras direcciones y el giro. Si tomamos todo el borde inferior y le damos la condición de que el desplazamiento en dirección Y es 0, al ser una línea larga y no un punto, no se permitirá el giro, pues al intentar pivotar respecto al punto central, se levantará de uno de los bordes y se hundirá del otro. Al no estar permitido el desplazamiento en esa dirección, el programa dará error y no podrá ofrecer un resultado de análisis. Nos hemos decantado por la primera opción:

- Se selecciona la herramienta , se toma la línea de la base del pilar y se introduce como coeficiente 0.5 para hallar su punto medio.
- Se hace clic en el icono .
- Aparece la ventana *Create Boundary Condition*.



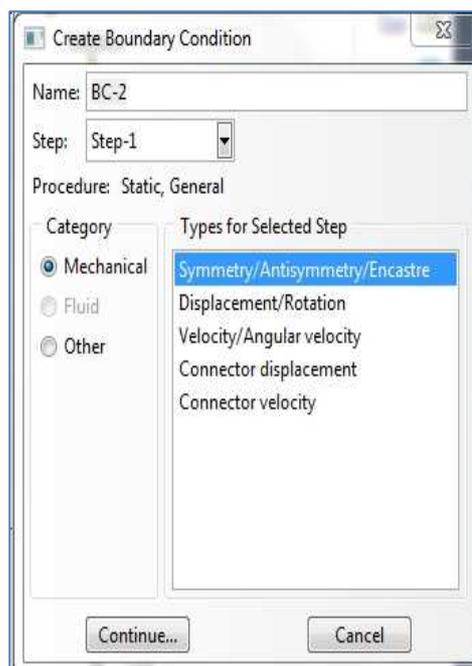
- Se hace clic en *Continue* y se señala el punto medio de la base del pilar creado anteriormente.
- Se pincha en *Done* en el área de avisos para indicar que se ha acabado la selección. Aparece la ventana *Edit Boundary Condition*.



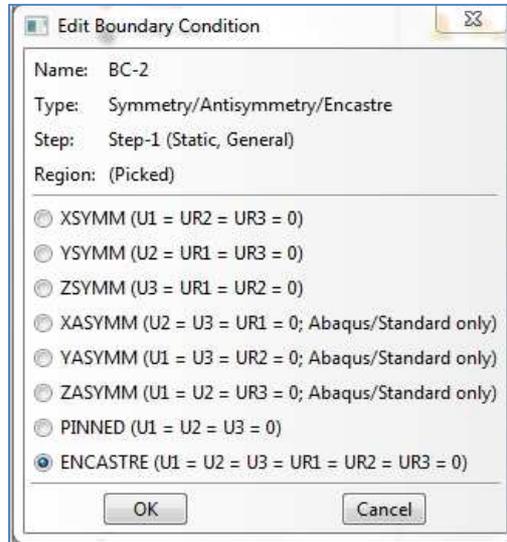
- En esta ventana, se selecciona la opción *U2*, se deja el valor 0 y se hace clic en *OK* para crear el apoyo simple.

Para aplicar la segunda condición de borde, el empotramiento en el extremo izquierdo de la viga:

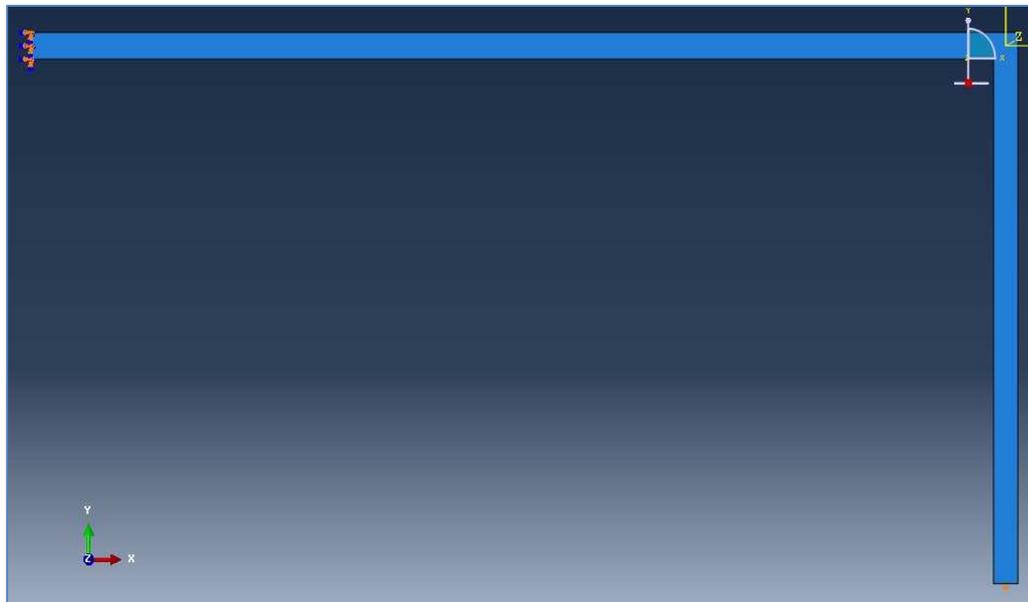
- Se vuelve a pulsar en el icono . En esta ocasión, como se tiene que simular un empotramiento, se selecciona la opción *Symmetry/Antisymmetry/Encastre* dentro de la categoría *Mechanical*.



- Se presiona *OK* y se selecciona el lado izquierdo de la viga
- Se presiona *Done* para terminar la selección y abrir la ventana *Edit Boundary Condition*.



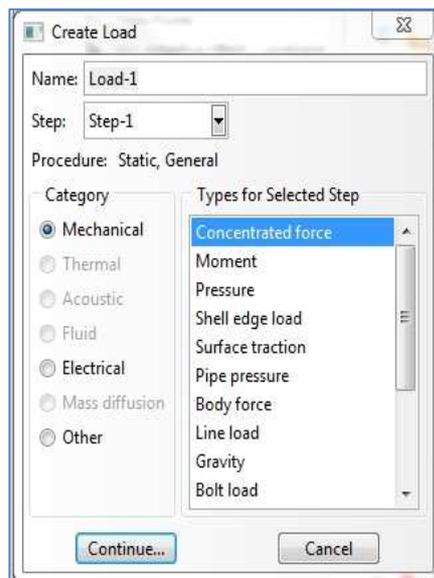
- Se activa la opción *ENCASTRE*.
- Se presiona sobre *OK* para crear la condición. *Abaqus/CAE* crea flechas en los puntos en los que se han aplicado las condiciones de contorno para indicar los grados de libertad impedidos.



### 3.3.2.6. Carga en la viga

Los pasos a seguir para crear la carga puntual sobre la viga son:

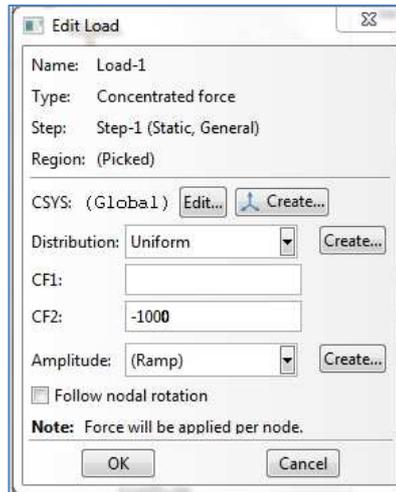
- Se pulsa sobre el icono  en el menú del módulo *Load* para que se desplieguen las opciones ocultas.
- Se selecciona  para crear la división necesaria a fin de situar la carga a 1.5 m del empotramiento.
- Se selecciona la línea superior y se hace clic en *Done*. Para que el ejercicio sea igual al anterior, hay que tener en cuenta las dimensiones de la sección, ya que el eje de los elementos de este pórtico es el elemento lineal del anterior. Ahora la carga tiene que quedar a 0.525 m del borde derecho (antes era a 0.5 m del extremo derecho de la línea). Si se divide esta longitud entre la longitud total de la viga, 2.025, se obtiene el coeficiente por el que se tiene que multiplicar la longitud de la viga para hallar el punto de aplicación de la carga, 0.25926. Como la flecha señala hacia la derecha, se introduce el valor  $1 - 0.25926 = 0.74074$  y se da a *Create partition*.
- Con la división ya creada, se hace clic en .
- Aparece la ventana *Create Load*.



Dentro de esta ventana:

- Se nombra la carga como *Load-1*.
- Se selecciona el paso *Step-1* como el paso en el que se aplicará la carga.

- En la lista *Category*, se acepta *Mechanical* como la categoría por defecto.
- En la lista *Type for Selected Step*, se selecciona *Concentrated force* para el tipo de carga y se hace clic en *Continue*.
- Se selecciona el punto recientemente creado en la viga.
- Se hace clic en *Done* para indicar que se ha terminado la selección.
- Aparece la ventana *Edit Load*.



Dentro de ella:

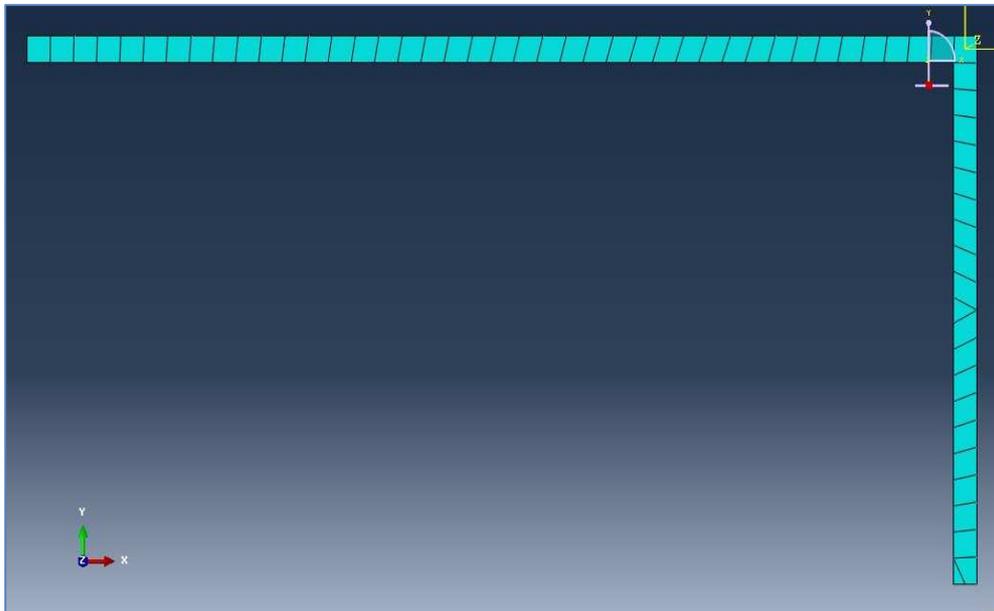
- Se introduce el valor de -1000 en *CF2* para indicar que en la dirección negativa del eje Y habrá una carga de 1000 N.
- Se acepta la selección de *Amplitude* por defecto.
- Se hace clic en *OK* para crear la carga y cerrar la ventana.
- *Abaqus* crea una flecha indicando la dirección y posición de la carga.



### 3.3.2.7. Mallado del modelo

Para mallar el modelo, se empleará el módulo *Mesh*. Los pasos necesarios para mallar el cuerpo son:

- Se inicia el módulo *Mesh*.
- Se hace clic en el icono del menú de módulo  y se introduce un valor de tamaño del elemento de 0.05.
- Se hace clic en *OK* y después en *Done* para crear los nodos especificados.
- Se hace clic en el icono  para mallar el elemento.



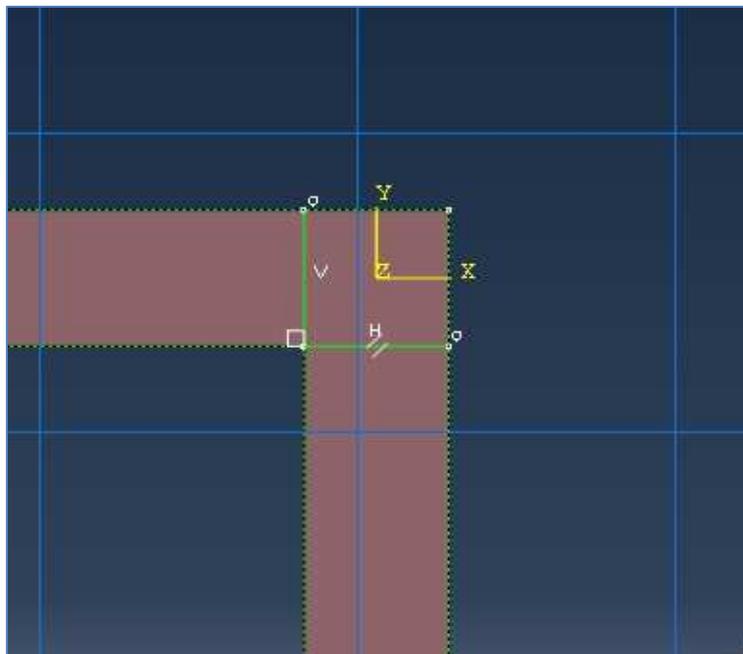
La malla no es uniforme. Para solucionarlo, se puede reducir el tamaño del elemento o hacer particiones en las zonas conflictivas, en este caso, el codo.

- Se pincha en  y se reduce el tamaño del elemento a 0.025, que es un múltiplo de la longitud del modelo.
- Se sigue obteniendo un mallado no uniforme, distorsionado por el codo.

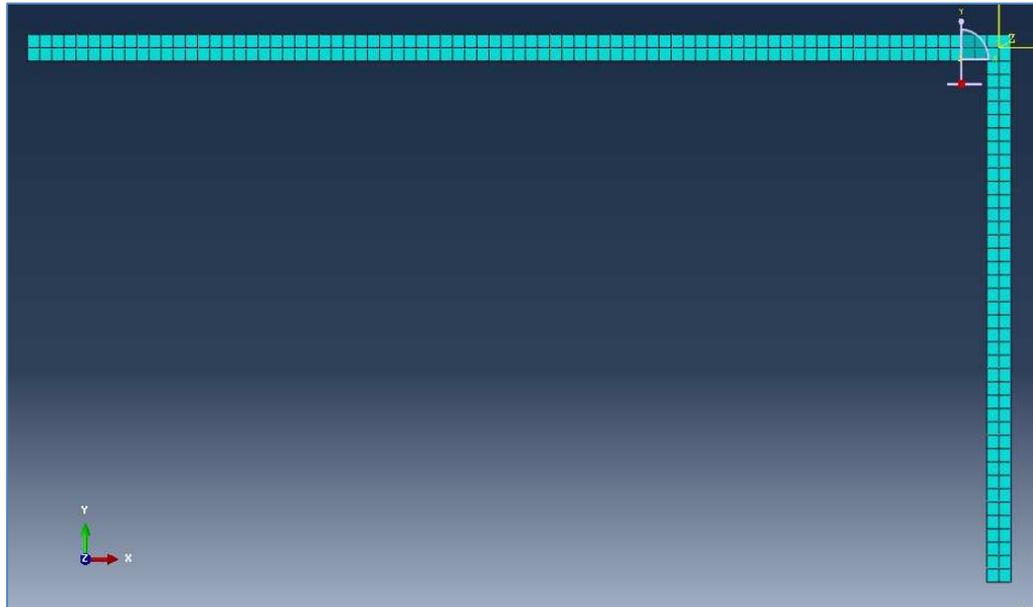


La solución para eliminar esa distorsión es utilizar las particiones para aislar el codo y ayudar al programa a mallar el modelo.

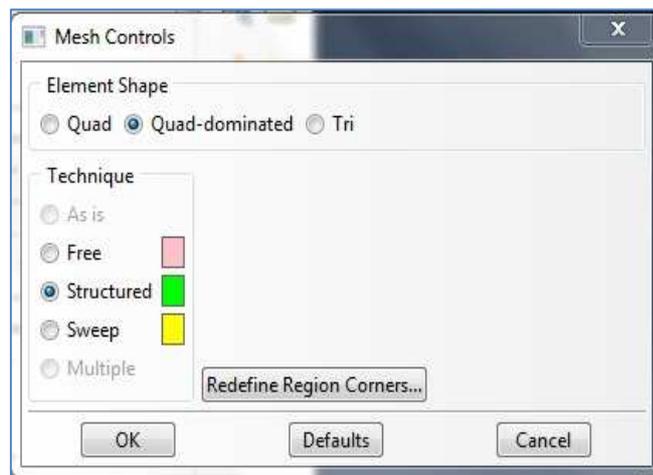
- Se hace clic en la pestaña del menú de *Abaqus Tools*→*Partition*→*Face*→*Sketch* y se realizan con la herramienta del *Sketch*  las particiones mostradas en la imagen.



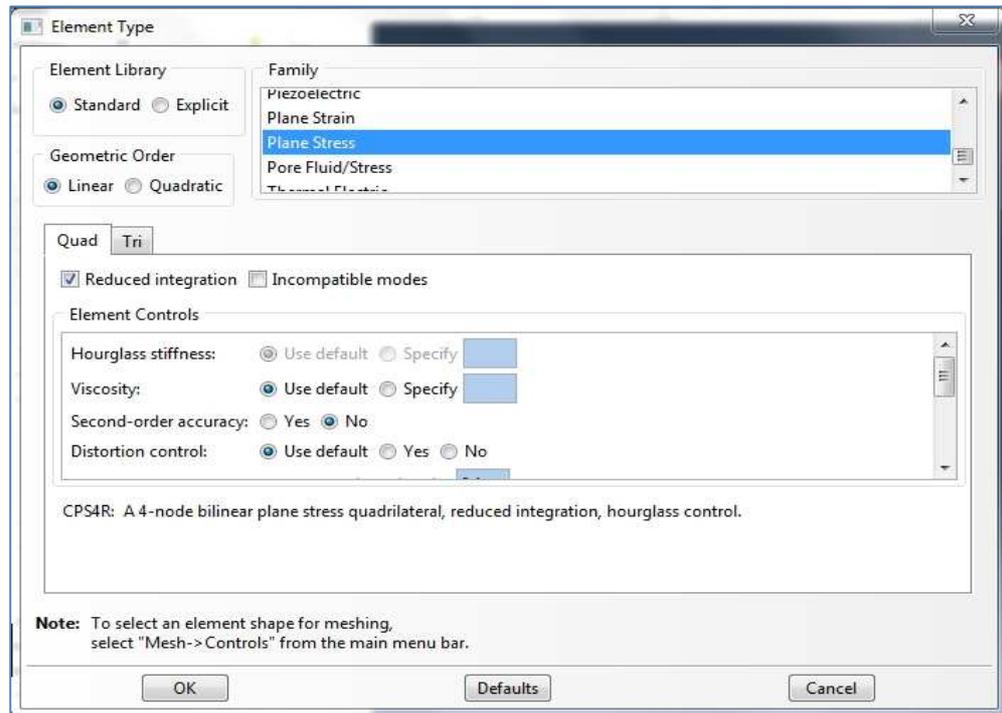
- Se hace clic en el icono  para mallar el elemento de nuevo.
- La malla obtenida ya es regular:



- Se hace clic en la herramienta , se selecciona *Structure* y se hace clic en *OK*.



- Se pincha en el icono del menú de módulo  y se selecciona el modelo, las tres partes que lo forman después de hacer las particiones.
- Se marcan las opciones que aparecen en la imagen inferior y se presiona *OK*.



- Se hace clic en el icono  para mellar el elemento de nuevo, porque la malla ha desaparecido al realizar los dos últimos pasos.

### 3.3.2.8. Creación del trabajo de análisis

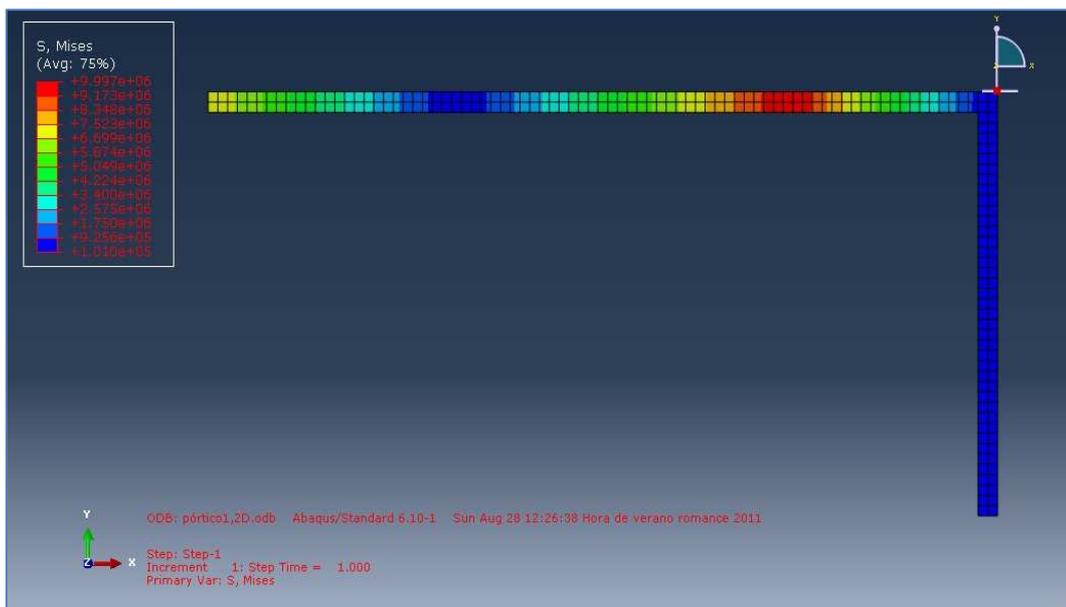
Una vez configurado el análisis, se abre el módulo *Job* para crear un trabajo que esté asociado con el modelo y someter ese trabajo a análisis. Para ello:

- Se entra en el módulo *Job* y se pinchar en el icono . Aparece la ventana *Create Job* con la lista de los modelos que están disponibles en la base de datos de modelos.
- Se le da un nombre al trabajo y se hace clic en *Continue* para crearlo.
- Aparece la ventana *Edit job*.
  - *Description: Análisis del pórtico 2*
  - *Job type: Full analysis*
  - *Run mode: Background*
  - *Submit time: Immediately*
- Se hace clic en *OK* para crear el trabajo.

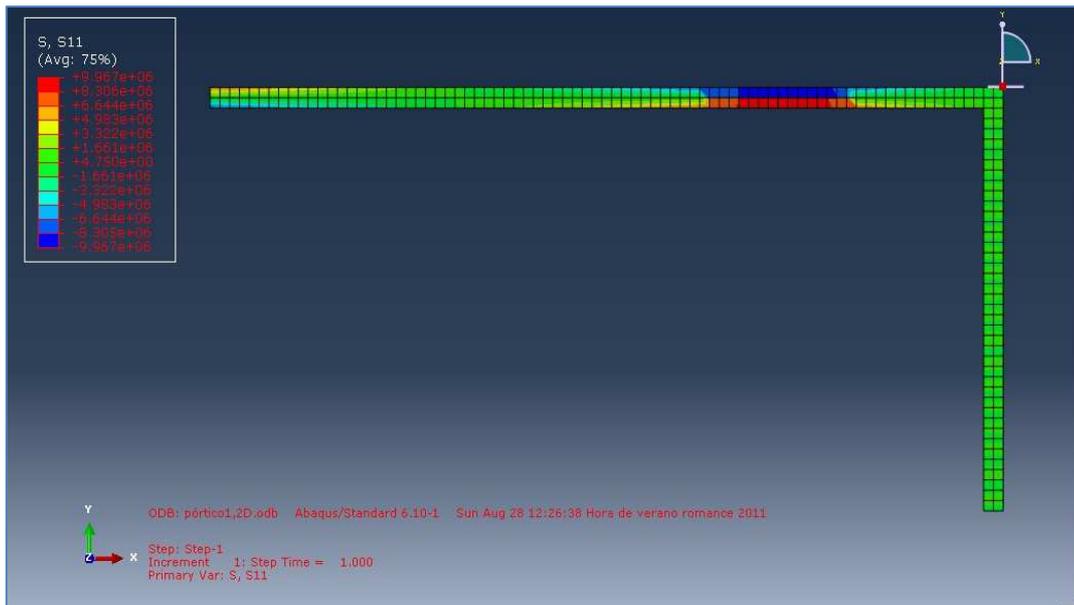
- Se pincha sobre el icono , junto al icono  para abrir el *Job manager* y se pulsa en *Submit* para comenzar el análisis.
- El análisis es ligeramente más lento que el anterior, al haber hecho más complejo el modelo.
- Una vez concluido con éxito el análisis, se pincha en el botón *Results* de la ventana *Job Manager* para ver los resultados.

### 3.3.2.9. Visualización de los resultados del análisis

Los resultados que ofrece el programa para los esfuerzos de Von Mises son los mostrados en la imagen inferior. Como puede verse en la imagen inferior, los esfuerzos son máximos en el punto de aplicación de la carga. Sin embargo, los resultados varían sustancialmente: para el modelo lineal, el esfuerzo de Mises era de  $1.519 \cdot 10^7$  y en este caso es de  $9.997 \cdot 10^6$ .



Ahora se selecciona del menú desplegable de *Abaqus* la opción *S11* para ver los esfuerzos en la dirección del eje X. El esfuerzo máximo es de  $9.967 \cdot 10^6$  Pa en el punto de aplicación de la carga.



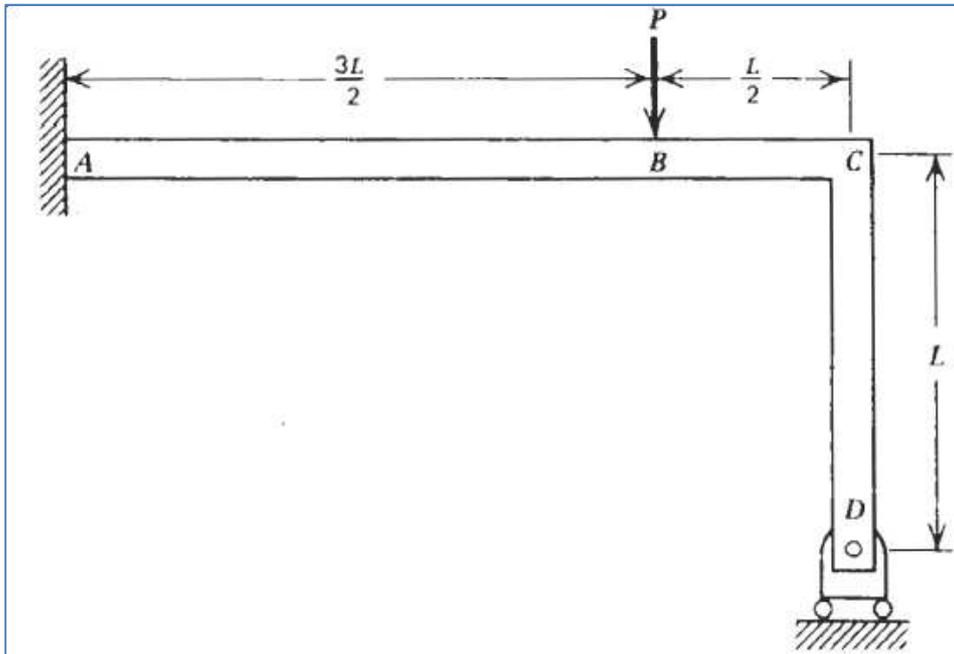
Para este modelo, puede apreciarse cómo en el punto de aplicación de la carga, hay tracción en la parte inferior de la viga y compresión en la parte superior (flexión).

Si se escoge la opción  $RF \rightarrow RF2$  en el menú desplegable, el valor máximo para la reacción en la dirección del eje Y se obtiene en el apoyo simple y es de 632,7 N.



Para esta variable, que es la que se va a analizar por la teoría clásica, la diferencia entre un modelo y otro es menor. Sin embargo, este segundo análisis permite ver con mayor claridad las tensiones y su distribución.

### 3.3.2.10. Comparación con la teoría clásica de cálculo



Ahora se calculará el semipórtico de la figura por el método de Cross utilizado por la teoría clásica. Los datos del ejercicio eran:

- $L = 1\text{m}$
- $P = 1\text{kN}$
- $E = 207\text{GPa}$
- $S = 50 \times 50 \text{ mm}^2$

Como la sección es igual para la viga y el pilar, se considera que  $I = 1$  para ambos miembros.

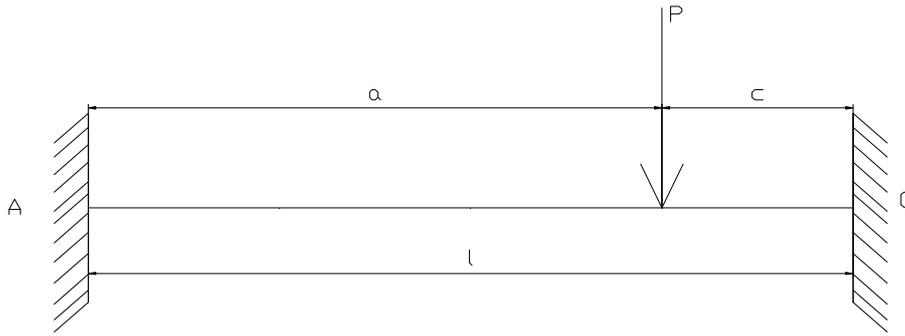
1) Se obtienen los coeficientes de rigidez relativa:

$$K_{DC} = \frac{I}{L} = \frac{1}{1} = 1 = K_{CD}$$

$$K_{CA} = \frac{I}{L} = \frac{1}{2} = 0.5$$

2) Se hallan los momentos de empotramiento perfecto:

- Para DC es 0 porque no está cargado.
- Para AC será:

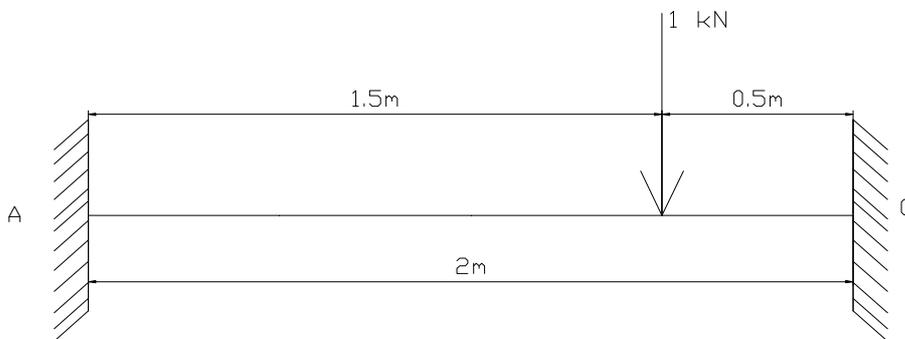


Para este modelo y esta designación, los momentos de empotramiento perfecto de Cross para los extremos A y C son:

$$m_A = + \frac{P \cdot a \cdot c^2}{l^2}$$

$$m_C = - \frac{P \cdot c \cdot a^2}{l^2}$$

Para el caso en particular del problema:

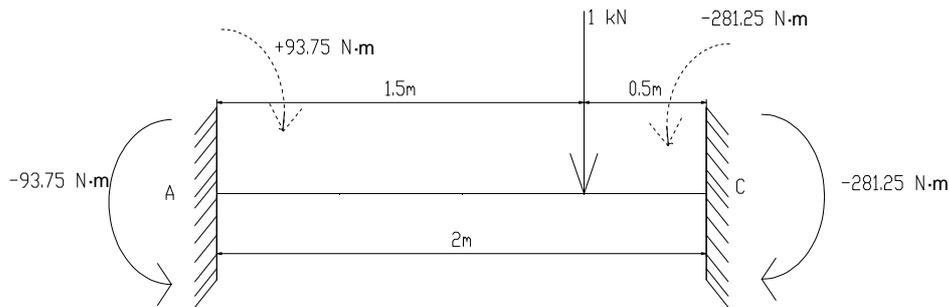


$$m_A = \frac{1\text{kN} \cdot 1.5\text{m} \cdot (0.5\text{m})^2}{(2\text{m})^2} = 93.75\text{N}$$

$$m_C = - \frac{1\text{kN} \cdot 0.5\text{m} \cdot (1.5\text{m})^2}{(2\text{m})^2} = -281.25\text{N}$$

Los momentos calculados son los momentos de Cross, que son de sentido contrario a los momentos resistentes (si el de Cross gira en el sentido horario, el resistente gira en el sentido anti horario) y son positivos en el sentido de las agujas del

reloj. Por lo tanto, el sentido de los momentos de Cross y el de los resistentes, es el marcado en la figura inferior en línea discontinua para los momentos de Cross y en línea continua para los momentos resistentes.



3) Se calculan los coeficientes de reparto:

$$\rho_{ij} = \frac{k_{ij}}{\sum k}$$

$$\rho_{CA} = \frac{k_{CA}}{k_{CA} + k_{CD}} = \frac{0.5}{0.5 + 1} = \frac{1}{3}$$

$$\rho_{CD} = \frac{k_{CD}}{k_C + k_{CA}} = \frac{1}{1 + 0.5} = \frac{2}{3}$$

El coeficiente de reparto de A es 0 por ser un empotramiento (absorbe todo el momento) y el de D es 1 (al ser un apoyo simple, no absorbe nada).

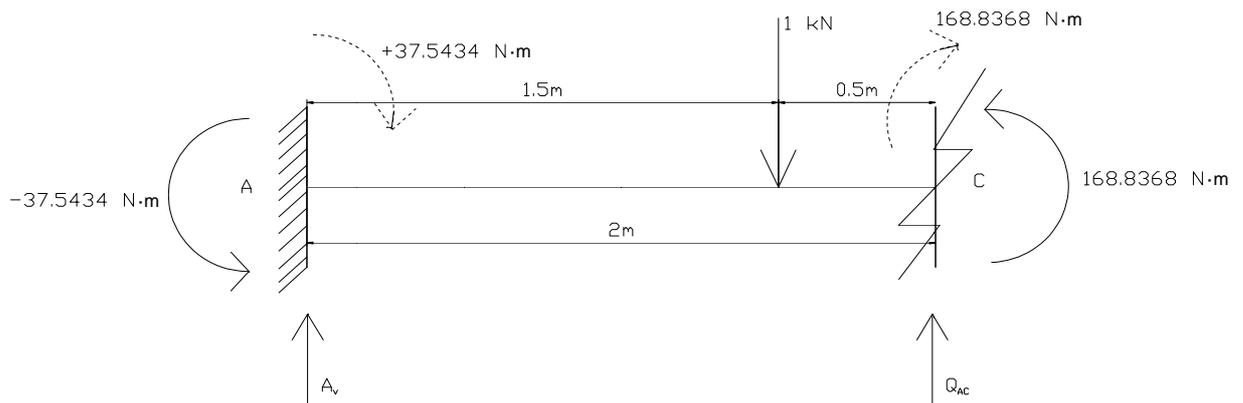
Se comprueba que la suma de los coeficientes de reparto es igual a 1.

4) Se calculan los momentos de Cross totales:

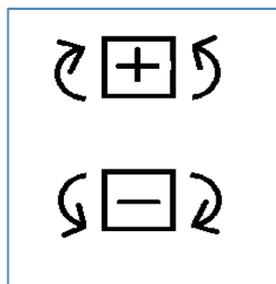
	A	C		D
	A	CA	CD	D
$\rho$	0	1/3	2/3	1
$M_0$	93.75	281.25		
1 <sup>er</sup> reparto		-93.75	-187.5	
1 <sup>er</sup> transporte	-46.875			-93.75
2 <sup>o</sup> reparto				93.75
2 <sup>o</sup> transporte			46.875	
3 <sup>er</sup> reparto		-15.625	-31.25	

3 <sup>er</sup> transporte	-7.8125			-15.625
4 <sup>o</sup> reparto				15.625
4 <sup>o</sup> transporte			7.8125	
5 <sup>o</sup> reparto		-2.6042	-5.2083	
5 <sup>o</sup> transporte	-1.3021			-2.6042
6 <sup>o</sup> reparto				2.6042
6 <sup>o</sup> transporte			1.3021	
7 <sup>o</sup> reparto		-0.434	-0.868	
7 <sup>o</sup> transporte	-0.217			-0.434
8 <sup>o</sup> reparto				0.434
Momentos de Cross totales	37.5434	168.8368	-168.8368	0

A continuación, se hacen los diagramas de cuerpo libre para averiguar los esfuerzos en los apoyos. Se corta por C:



El signo de los momentos resistentes es:



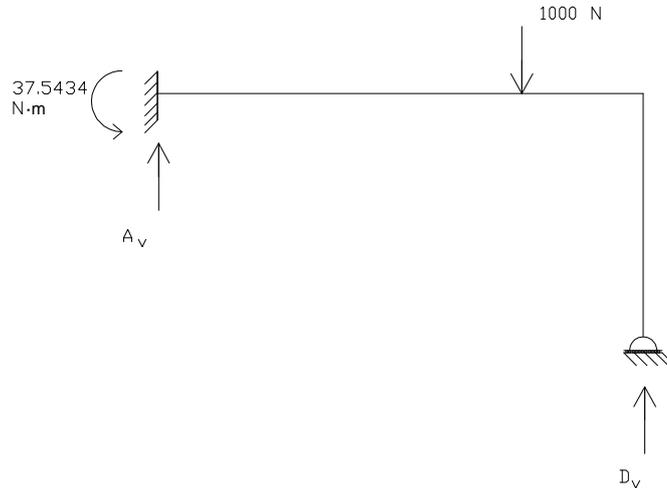
$$\sum M_A = 0 \Rightarrow 37.5434 N \cdot m - (1000 N \cdot 1.5 m) + (Q_{AC} \cdot 2 m) + 168.8368 N \cdot m = 0$$

$$Q_{AC} = 646.8099N$$

$$\sum F_V = 0 \Rightarrow A_V + Q_{AC} - 1000N = 0 \Rightarrow A_V = 1000N - Q_{AC} = 1000N - 646.8099N$$

$$A_V = 353.1901N$$

Y si se hace el sumatorio de fuerzas en el eje Y para el pórtico:



$$\sum F_V = A_V + D_V - 1000N = 0 \Rightarrow D_V = 1000N - A_V = 646.8099N$$

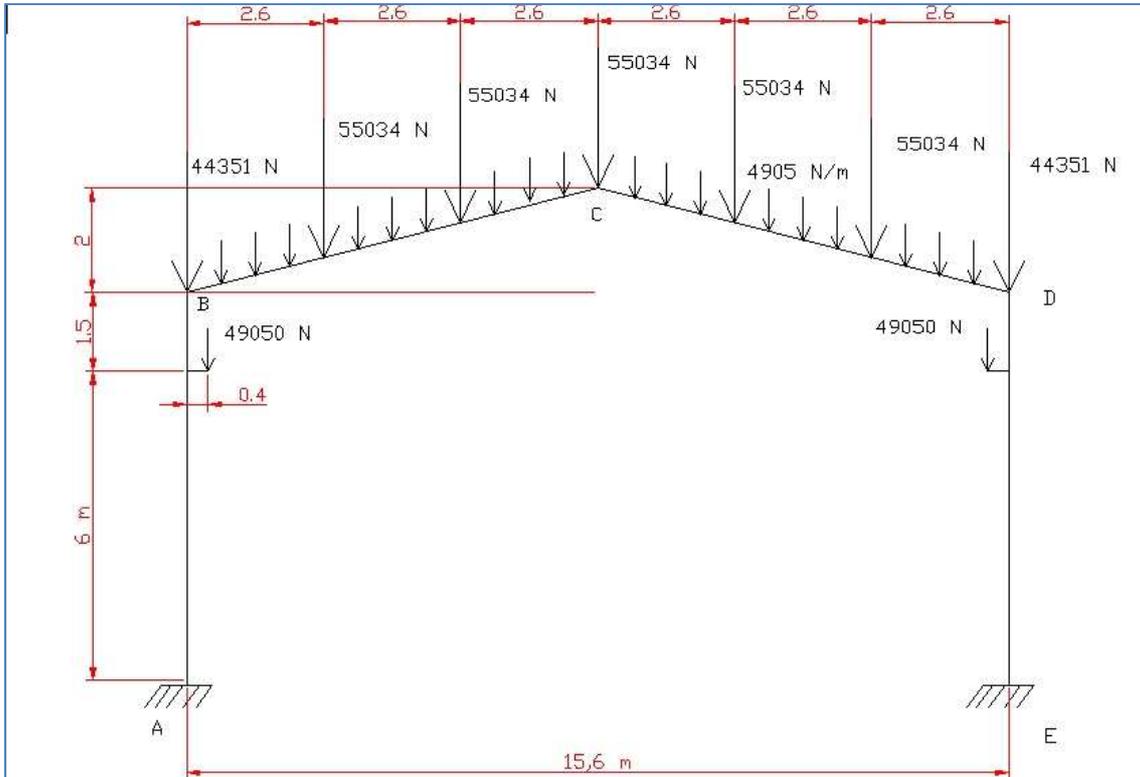
Por lo tanto la reacción vertical para el apoyo simple es:

$$D_V = 646.8099 N$$

Si se compara con los resultados del programa, el error es de:

$$\frac{632.7}{646.8099} = 0.97818 \Rightarrow \text{Error} = 1 - 0.97818 = 0.02181 < 0.25$$

### 3.4. EJEMPLO Nº 4: PÓRTICO A DOS AGUAS



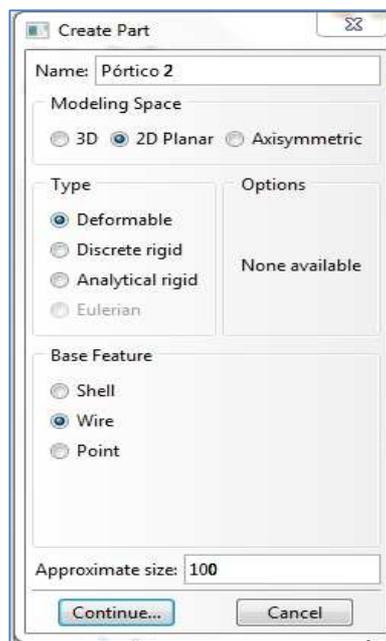
En el siguiente ejemplo, se analizará la simplificación lineal de la imagen de un pórtico a dos aguas con cargas puntuales y cargas distribuidas sobre su dintel y una carga puntual sobre cada pilar, simulando un puente grúa. Se quiere averiguar, como en el ejercicio anterior, las reacciones en los apoyos.

Como ya se demostró en el ejemplo anterior, la diferencia entre el modelo lineal y el modelo en 2D para las reacciones en los apoyos es insignificante. Sin embargo, el tiempo de cálculo es mayor para el modelo en 2D. Por eso, se utilizará la simplificación de la figura y en el programa se diseñará un modelo lineal con las funciones ya vistas para el ejemplo anterior.

### 3.4.1. Creación de una parte

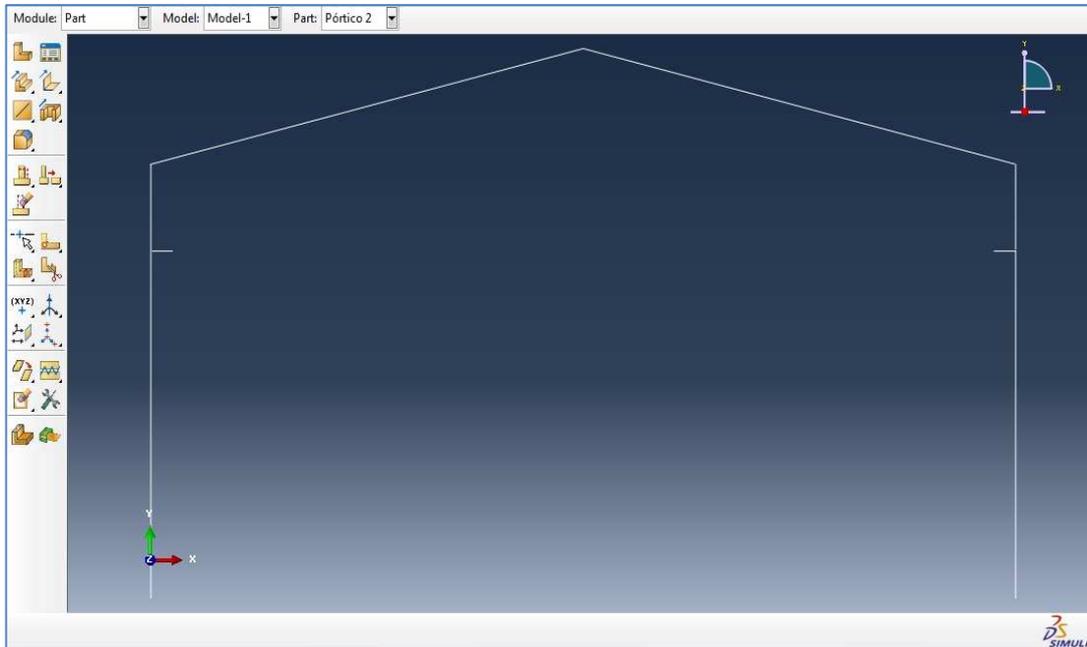
Se inicia el programa *Abaqus/CAE*. Se dibuja la geometría con el módulo *Part*:

- Se hace clic en el icono  del menú del módulo.
- Aparece la ventana *Create part*.
  - *Name: Pórtico 2*
  - *Modeling Space: 2D Planar*
  - *Type: Deformable*
  - *Base Feature: Wire (alambre)*
  - *Approximate Size: 100*



- Se hace clic en *Continue* para acceder al *Sketcher* y se activa la herramienta del módulo para crear líneas . Se introducen las siguientes coordenadas:
  - (0, 0)
  - (0, 6)
  - (0.4, 6)
  - (0, 7.5)
  - (7.8, 9.5)
  - (15.6, 7.5)
  - (15.6, 0)
  - (15.6, 6)
  - (15.2, 6)
- Se pincha de nuevo en la herramienta  para desactivarla.

- Se hace clic en *Done* para cerrar la herramienta de dimensionamiento y de nuevo en *Done* para terminar el diseño de la parte. El programa ha vuelto al módulo *Part* y muestra el resultado final:

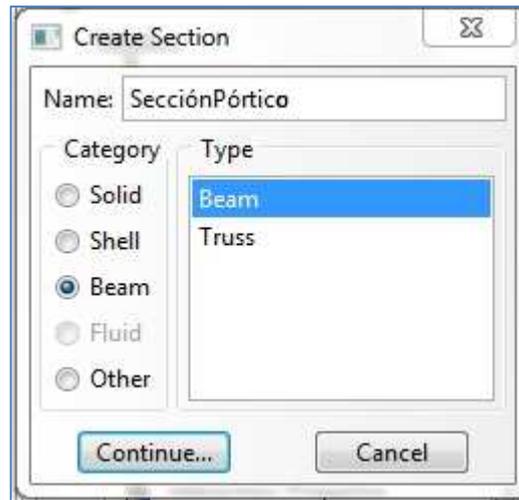


- Con este último paso, se termina el diseño de la parte.

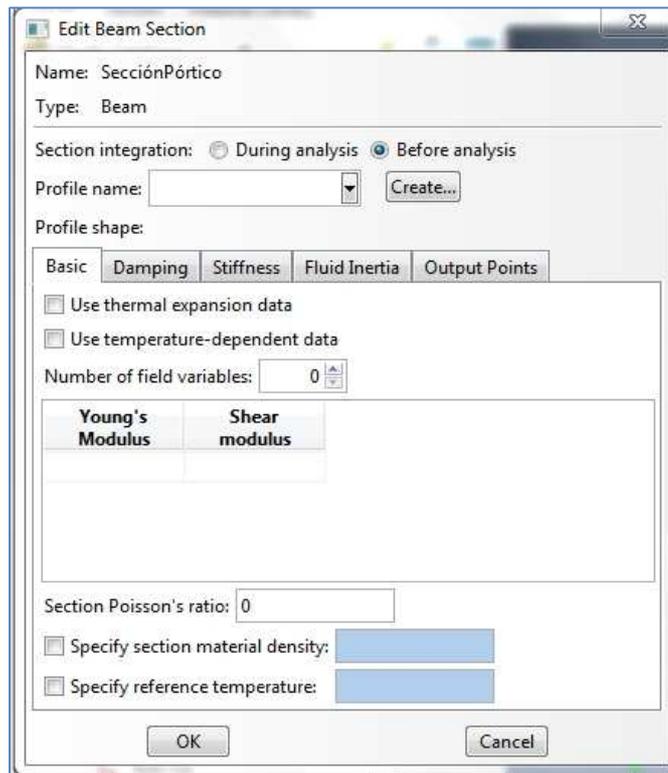
### 3.4.2. Creación del material

Para definir los materiales del ejercicio se debe utilizar el módulo *Property*. Una vez dentro del módulo, los pasos a seguir son los siguientes:

- Se hace clic en el icono  del menú del módulo. La ventana *Create section* aparece en pantalla.



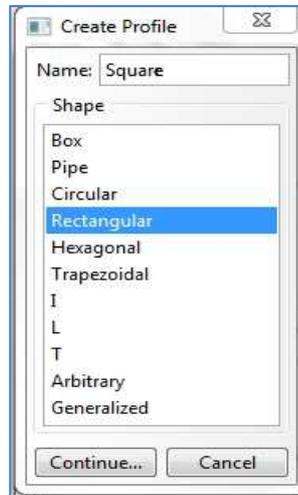
- Se nombra a la sección como *SecciónPórtico*.
- Se selecciona *Beam* como *Category* y *Beam* como *Type*.
- Se hace clic en *Continue* y aparece la pantalla *Edit Beam Section*.



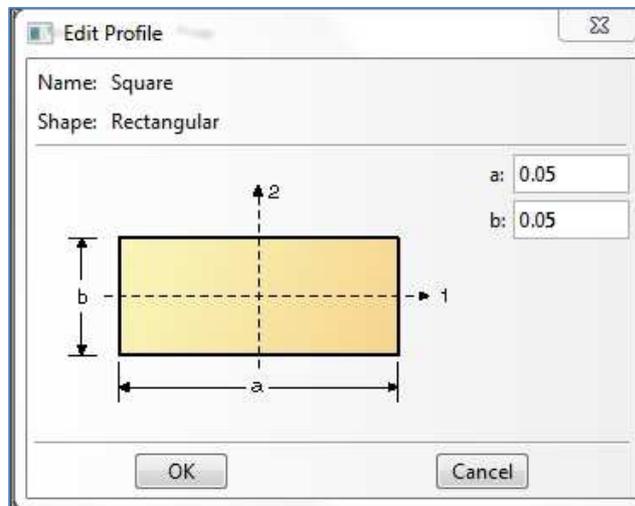
Dentro de esta pantalla:

- *Section integration: Before Analysis*
- *Profile name:* se presiona en el botón *Create* y, dentro de la ventana emergente, se elige un nombre, *Square*, y se elige *Rectangular* como

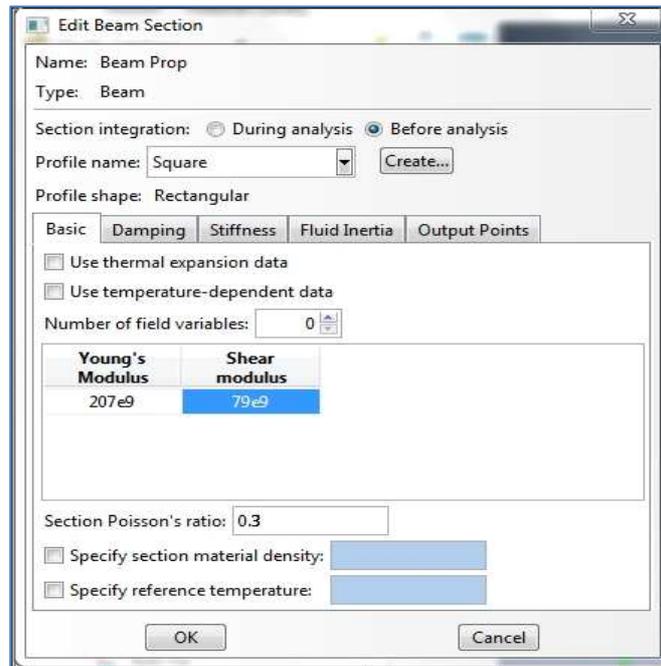
*Shape*, ya que para el cálculo se va a considerar una sección cuadrada de  $50 \times 50 \text{ mm}^2$ .



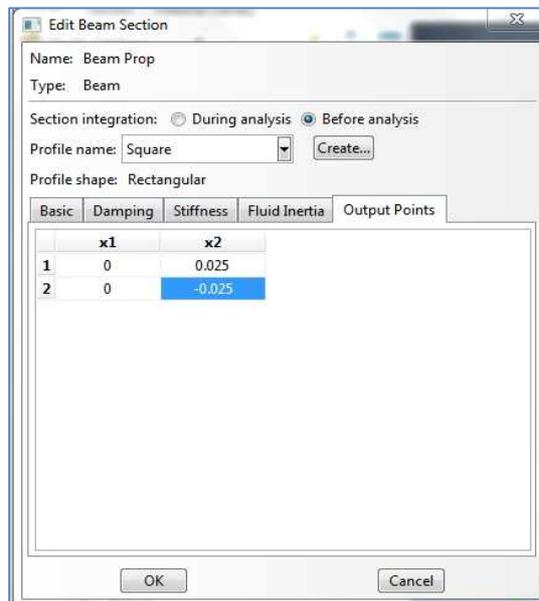
- Se hace clic en *Continue* y aparece la pantalla *Edit Profile*. Se introducen los valores  $a = 50$  y  $b = 50$  para crear la sección de  $50 \times 50 \text{ mm}^2$ .



- Se hace clic en *OK* y se regresa a la pantalla *Edit Beam Section*.

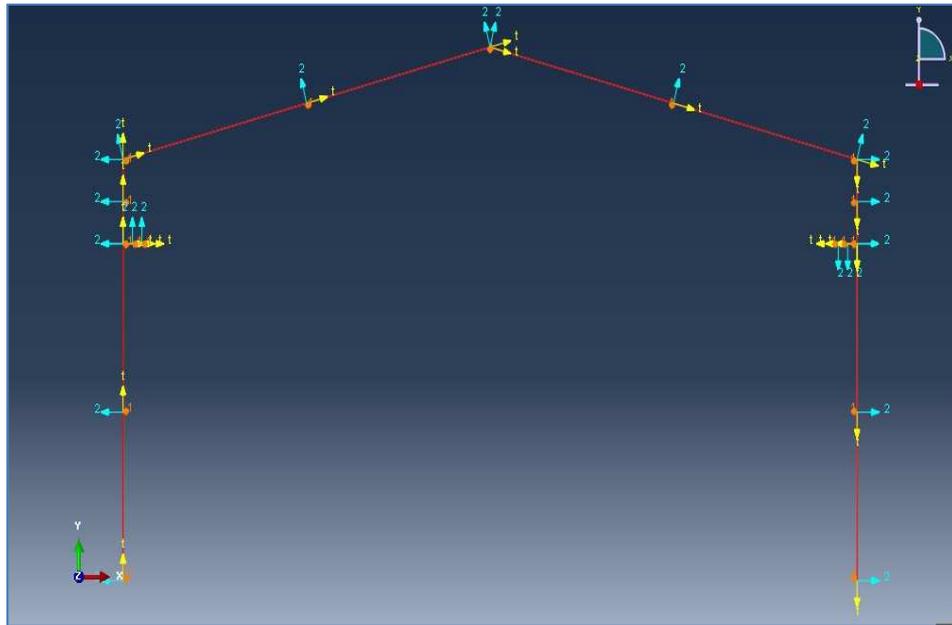


- En esta pantalla:
  - se introducen los valores del módulo de Young, 207e9 Pa, del módulo de cortadura, 79e9 Pa, y del coeficiente de Poisson, 0.3.
  - Se hace clic en la pestaña *Output points* y se definen los puntos de análisis en el punto de abscisa 0 y en los extremos superior e inferior de la sección (abscisa 0.025 y -0.025):



- Se hace clic en *OK* para crear la sección y se asigna la sección al cuerpo con la función .

- Se determina la orientación de la sección con el botón . Para ello, se seleccionan ambas líneas y se introduce el vector  $(0, 0, -1)$ . Con esta acción, se pone en línea el eje 1 de la sección para la que se definieron los valores de  $a$  y  $b$ , con el eje Z del modelo.
- Se presiona *OK* para aceptar los valores introducidos y el programa muestra los ejes en los extremos y en los puntos medios de las barras.

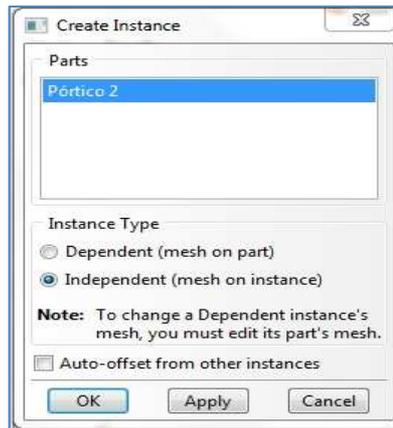


### 3.4.3. Ensamblado del modelo

Al igual que en los otros dos ejemplos, hay una única parte en el modelo, por lo que este paso carece de importancia.

Para ensamblar el modelo se siguen estos pasos:

- Se selecciona el módulo *Assembly* de la lista de módulos.
- Se hace clic en el icono  en el menú propio del módulo. Aparece la ventana *Create Instance*.



- Se acepta en *Parts* la única opción *Pórtico 2*, se selecciona *Independent* y se hace clic en *OK*. Se debe marcar *Independent* para que más tarde nos deje dividir la viga a fin de situar la carga en el módulo *Load*.
- *Abaqus/CAE* crea la *instance* del pórtico y se termina el trabajo con este módulo.

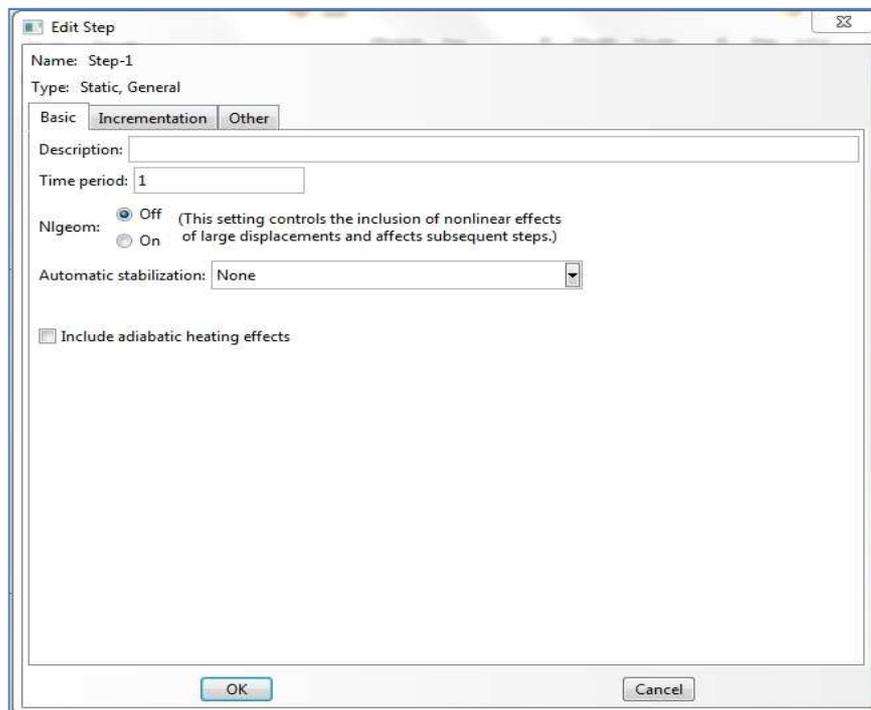
#### 3.4.4. Configuración del análisis

Una vez creado el modelo del pórtico, se puede entrar en el módulo *Step* para la configuración del análisis. De nuevo, sólo se necesitarán dos pasos, el paso inicial generado automáticamente por el programa y un paso estático general en el que se aplicarán las cargas al modelo.

- Se selecciona el módulo *Step* en la lista de módulos.
- En el menú propio del módulo, se hace clic en el icono .
- Aparece la ventana *Create Step*, en la que figura el paso que genera el programa por defecto, *Initial*. Dentro de esta ventana, se acepta el nombre por defecto del nuevo paso (*Step1*) y se selecciona *Static General* dentro de los tipos de paso que ofrece.
- Se hace clic en *Continue* para continuar con el análisis.



- Aparece la ventana *Edit Step* con las opciones por defecto para un paso estático general. Estas opciones son válidas para el análisis que se quiere realizar, por lo que se presiona *OK* para crear el paso.

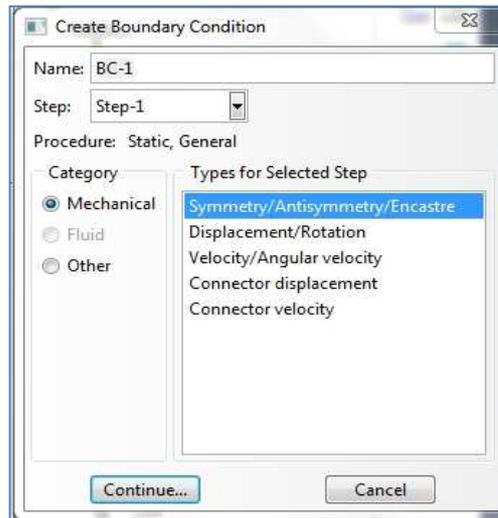


- No es necesario modificar las salidas por defecto del programa porque las opciones incluyen las variables que se necesitan para este ejemplo.

### 3.4.5. Condiciones de borde

Para aplicar las condiciones de borde, se selecciona el módulo *Load* y se siguen los pasos:

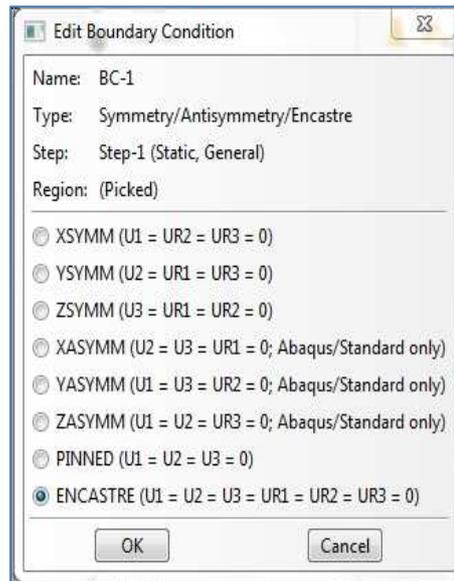
- En el menú del módulo, se utiliza la herramienta . Aparece la ventana *Create Boundary Condition*.



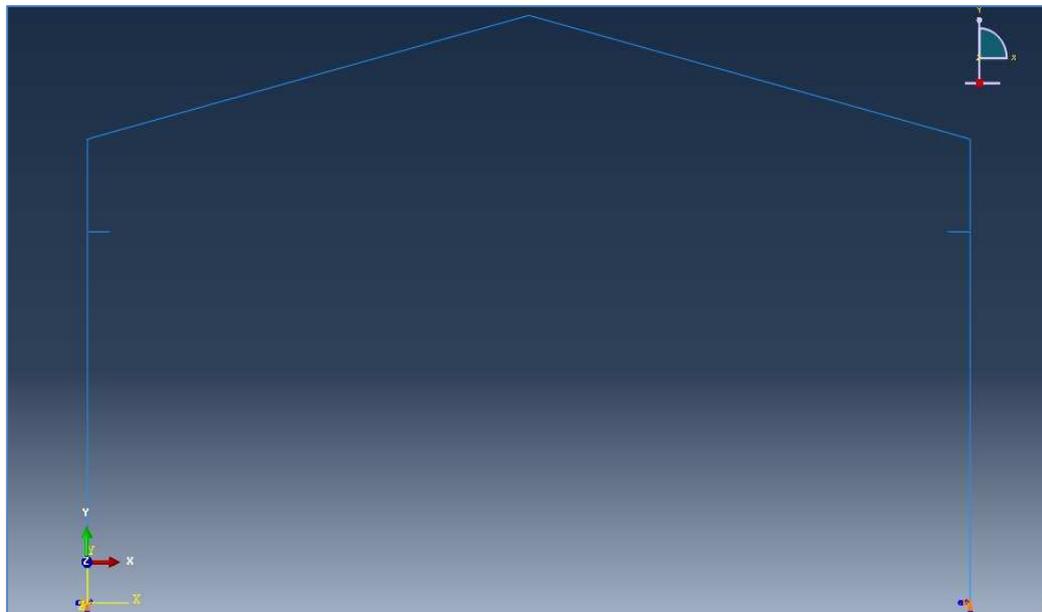
- En la ventana *Create Boundary Condition*:
  - Se selecciona el paso *Step 1* como el paso en el que se aplicará la condición de contorno.
  - Se acepta *Mechanical* como la opción válida de la lista *Category*.
  - Se selecciona *Symetry/Antisymmetry/Encastre* como el tipo de condición de borde y se hace clic en *Continue*.

*Abaqus* manda mensajes en el área de avisos para guiar al usuario.

- Se hace clic sobre el punto inferior de los dos pilares.
- Se pincha en *Done* en el área de avisos para indicar que se ha acabado la selección. Aparece la ventana *Create Boundary Condition*.



- En esta ventana, se selecciona la opción *ENCASTRE* y se hace clic en *OK* para crear los empotramientos.
- *Abaqus/CAE* crea flechas en los puntos en los que se han aplicado las condiciones de contorno para indicar los grados de libertad impedidos.

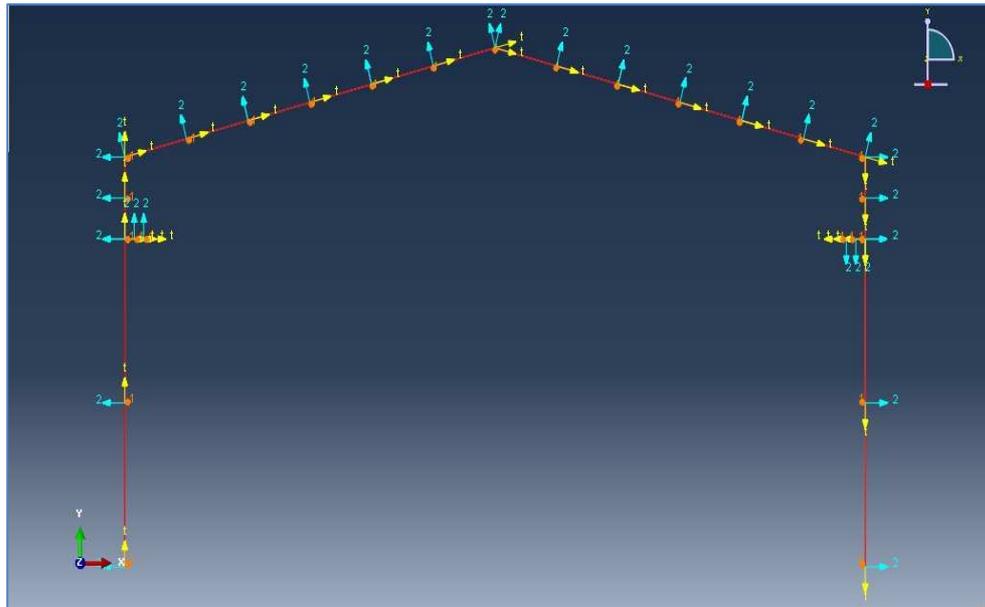


### 3.4.6. Carga en la viga

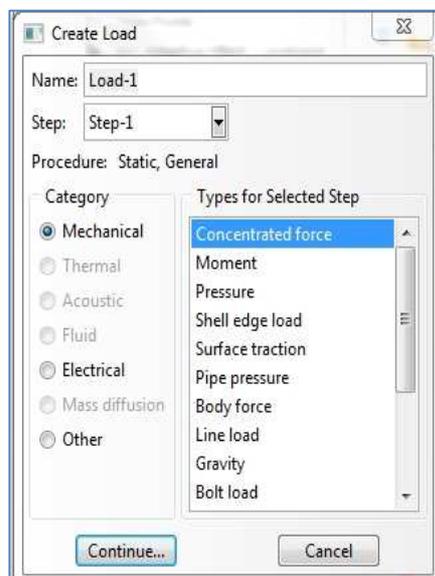
Los pasos a seguir para crear las cargas sobre la viga son:

- Se pulsa sobre el icono  en el menú del módulo *Load* para que se desplieguen las opciones ocultas y se selecciona  para dividir el dintel

en tres partes y situar las cargas puntuales a 1.5 m del empotramiento. Se selecciona el elemento, se introduce el valor 0.33 y se pincha en *Create* *partition* para crear la primera división. Se vuelve a pinchar en  y se selecciona la parte del dintel que aún no ha sido dividida. Se introduce el factor 0.5 para dividir esa parte en dos y se hace clic en *Done*. Se tendrá que volver a asignar la orientación de la sección en el módulo *Property* al haber partido los elementos superiores. Si no se hace, el programa dará error, como ocurrió en el análisis lineal del pórtico anterior.

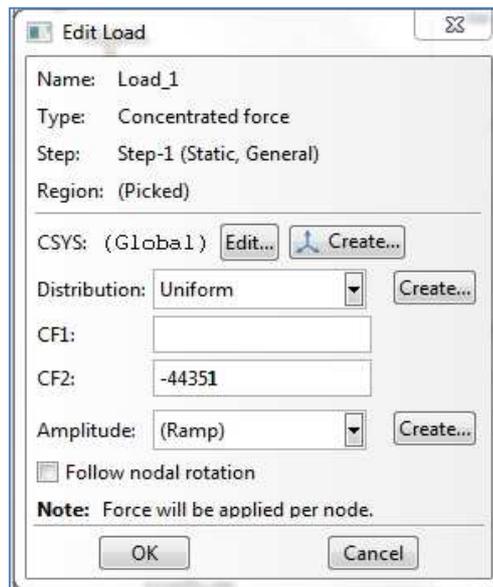


- Se hace lo mismo para la otra parte del dintel.
- Con las divisiones ya creadas, se hace clic en .
- Aparece la ventana *Create Load*.

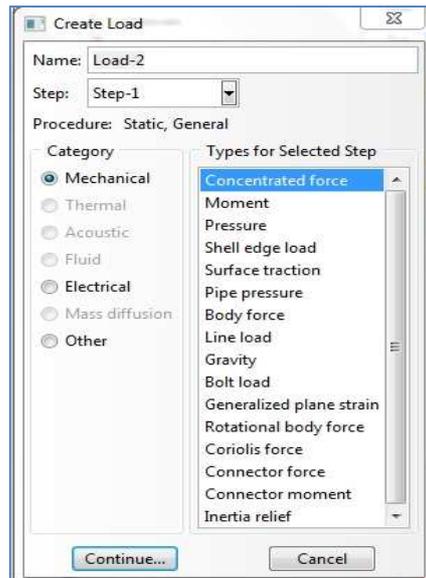


Dentro de esta ventana:

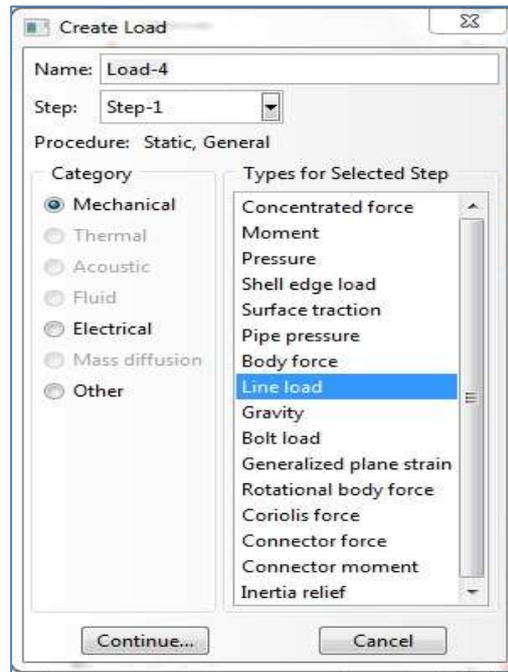
- Se nombra la carga como *Load-1*.
  - Se selecciona el paso *Step-1* como el paso en el que se aplicará la carga.
  - En la lista *Category*, se acepta *Mechanical* como la categoría por defecto.
  - En la lista *Type for Selected Step*, se selecciona *Concentrated force* para el tipo de carga y se hace clic en *Continue*.
- Se selecciona el punto bajo de los dos dinteles y se hace clic en *Done* para indicar que se ha terminado la selección.
  - Aparece la ventana *Edit Load*. Dentro de ella:
    - Se introduce el valor de -44351 en *CF2* para indicar que en la dirección negativa del eje Y habrá una carga de 44351 N.
    - Se acepta la selección de *Amplitude* por defecto.
    - Se hace clic en *OK* para crear la carga y cerrar la ventana.



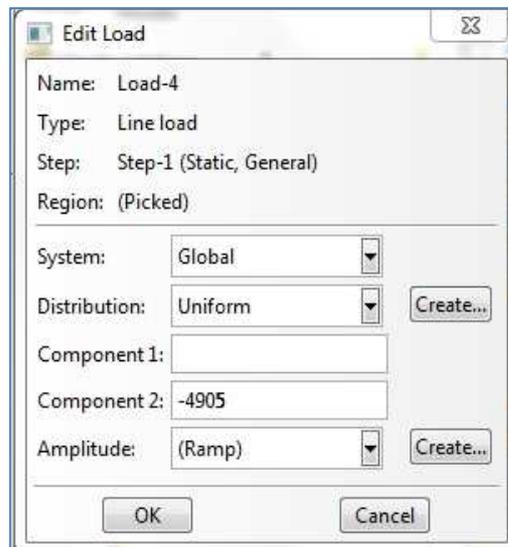
- Se hace clic en  para crear la siguiente carga puntual.
- Aparece la ventana *Create Load*, donde se eligen las mismas opciones que se eligieron antes.



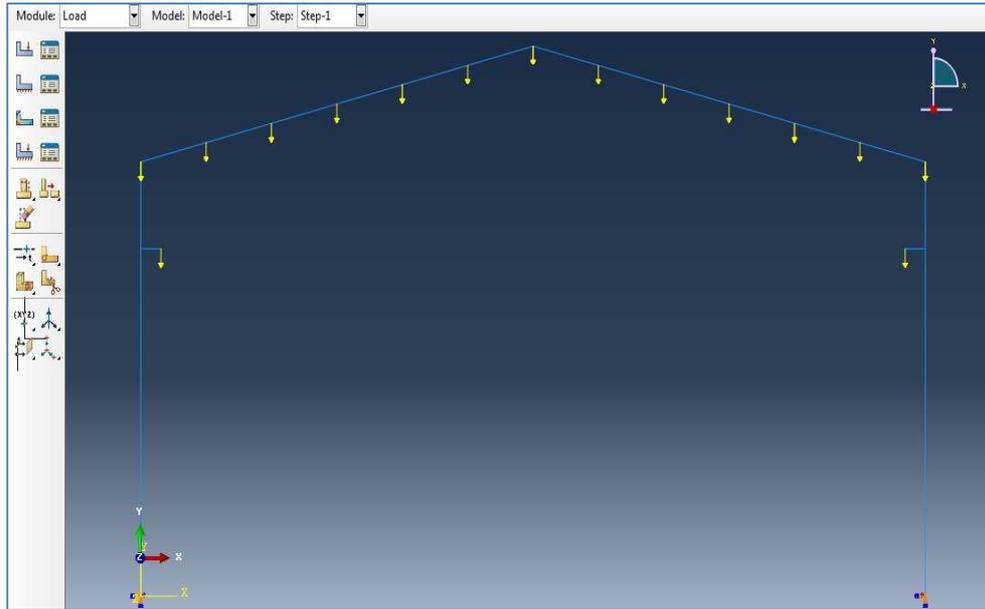
- Se seleccionan los puntos intermedios de los dinteles y el cumbreiro y se hace clic en *Done*.
- Aparece la ventana *Edit Load*. Dentro de ella:
  - Se introduce el valor de -55034 en *CF2* para indicar que en la dirección negativa del eje Y habrá una carga de 55034 N.
  - Se acepta la selección de *Amplitude* por defecto.
  - Se hace clic en *OK* para crear la carga y cerrar la ventana.
- Se vuelve a pulsar sobre  para crear la carga de los puentes grúa. Como también se trata de una carga puntual, las opciones elegidas serán las mismas que para las dos cargas anteriores. Solo cambiará el valor de la carga, de -49050 N, situadas en los extremos del elemento donde están situados los puentes grúa en los pilares.
- Por último, para crear la carga lineal sobre los dinteles, se pincha en  y se seleccionan las opciones de la imagen inferior.



- Se hace clic en *Continue*, se seleccionan los dinteles y se hace clic en *Done*.
- Aparece la ventana *Edit Load*. En ella, se introduce el valor -4905 en la componente 2.



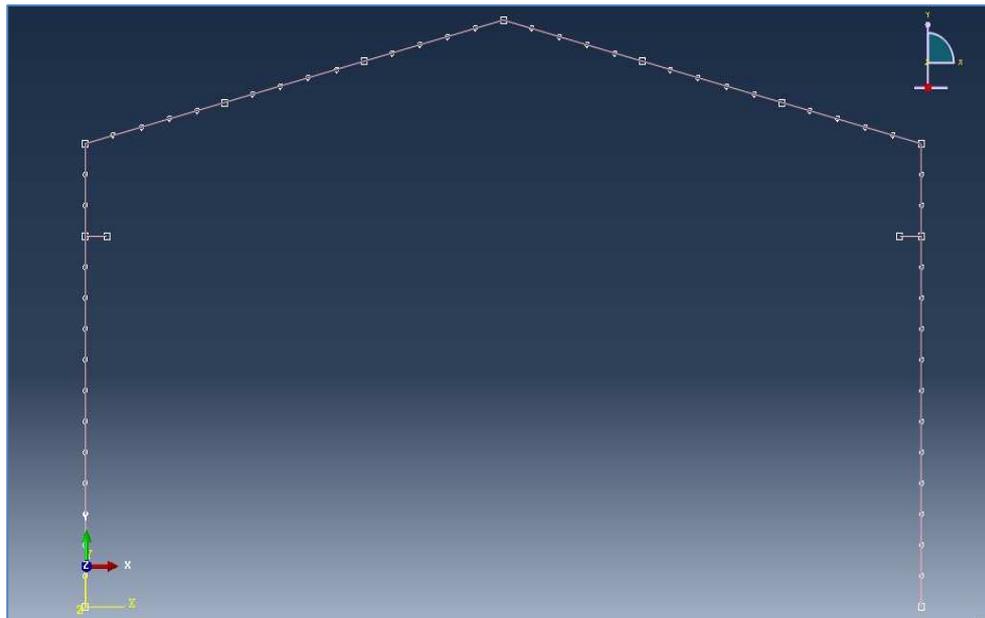
- *Abaqus* muestra las cargas sobre el pórtico:



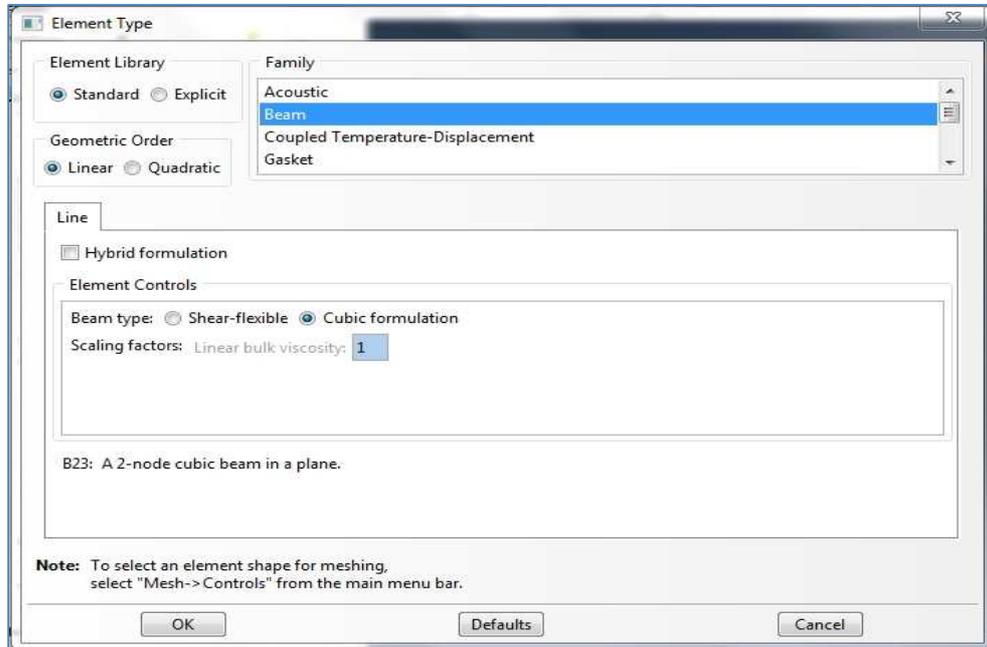
### 3.4.7. Mallado del modelo

Para mallar el modelo, se empleará el módulo *Mesh*. Los pasos necesarios para mallar el cuerpo son:

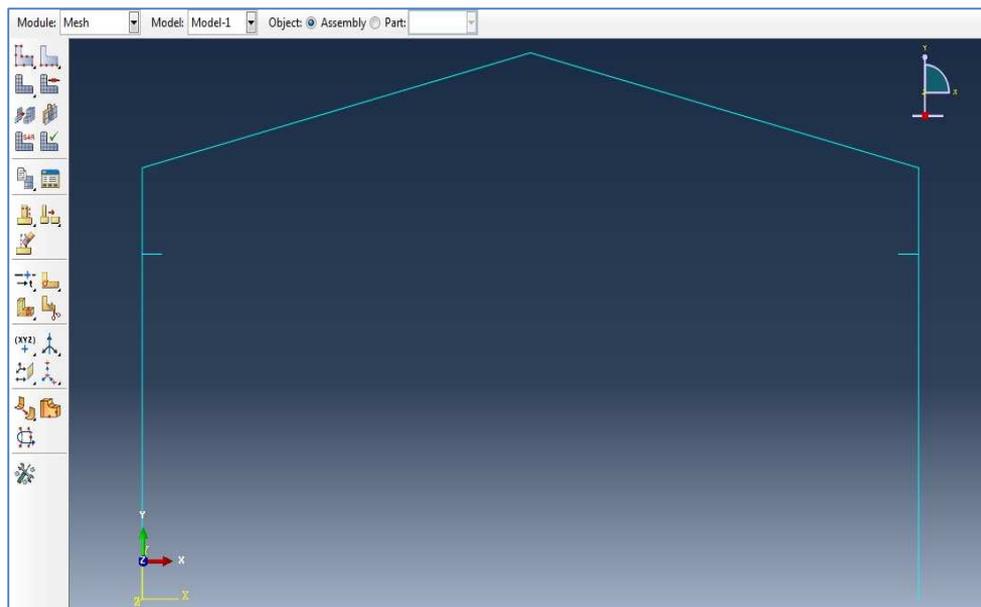
- Se inicia el módulo *Mesh*.
- Se hace clic en el icono del menú de módulo  y se introduce un valor de tamaño 0.5 para que cree un nodo cada medio metro. Se hace clic en *OK* y después en *Done*:



- Se pincha en el icono del menú de módulo  y se selecciona todo el modelo.
- Se presiona *Done* y aparece la ventana *Element Type*. Se eligen las opciones que aparecen en la imagen inferior y se pincha en *OK*.



- Se hace clic en el botón  para mallar el modelo. De nuevo, el mallado no se puede apreciar en la imagen que arroja *Abaqus* al tratarse de elementos lineales.



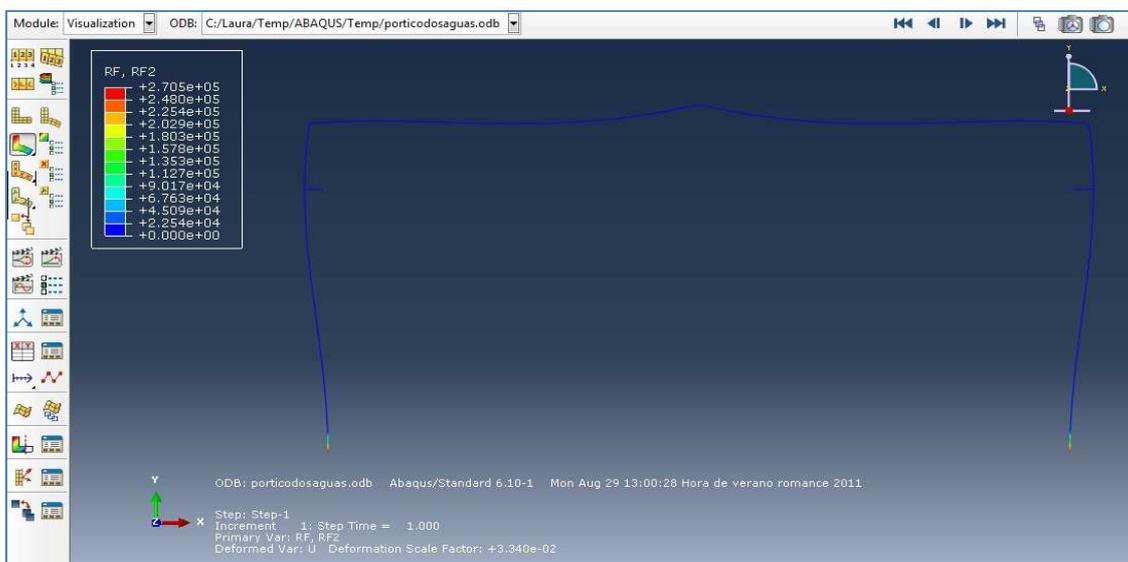
### 3.4.8. Creación del trabajo de análisis

Una vez configurado el análisis, se abre el módulo *Job* para crear un trabajo que esté asociado con el modelo y someter ese trabajo a análisis. Para ello:

- Se entra en el módulo *Job* y se pincha en el icono . Aparece la ventana *Create Job* con la lista de los modelos que están disponibles en la base de datos de modelos.
- Se le da un nombre al trabajo y se hace clic en *Continue* para crearlo.
- Aparece la ventana *Edit job*.
  - *Description: Análisis del pórtico 2*
  - *Job type: Full analysis*
  - *Run mode: Background*
  - *Submit time: Immediately*
- Se hace clic en *OK* para crear el trabajo.
- Se pincha sobre el icono , junto al icono  para abrir el *Job manager* y se pulsa en *Submit* para comenzar el análisis.
- Una vez concluido con éxito el análisis, se pincha en el botón *Results* de la ventana *Job Manager* para ver los resultados.

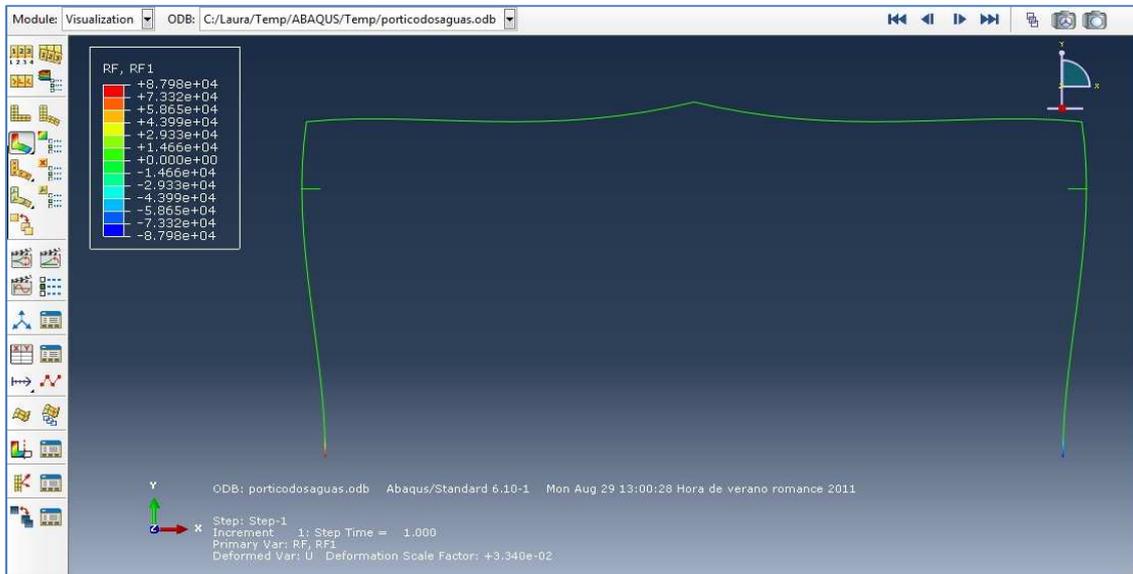
### 3.4.9. Visualización de los resultados del análisis

Los resultados que ofrece el programa para la componente vertical del esfuerzo sobre los elementos son:



Las reacciones máximas están en los apoyos, como era de esperar. El valor de la reacción en el apoyo de la izquierda es de 270511 N y en el apoyo de la derecha es de 270455 N.

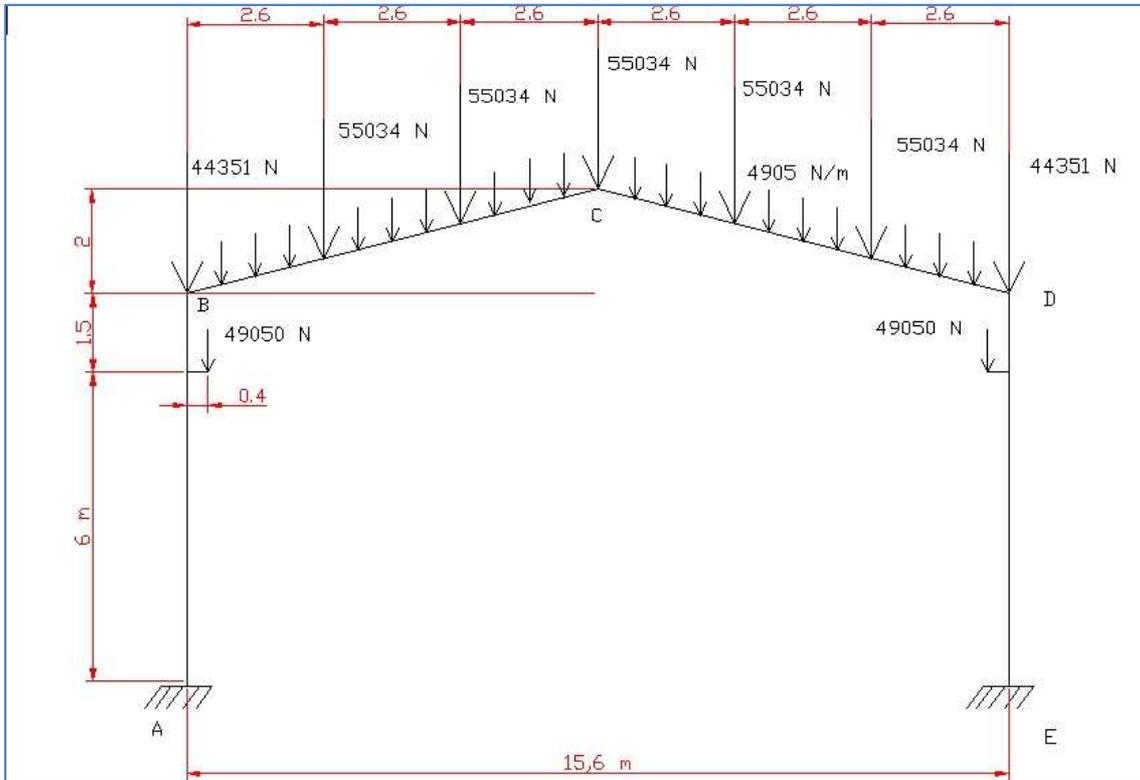
Ahora se selecciona del menú desplegable de *Abaqus* la opción RF1 para ver la reacción en los apoyos en la dirección del eje X.



El valor para este esfuerzo en el apoyo de la izquierda es de 87979.8 N y en el de la derecha es de -87979.8 N. La diferencia se debe a las características del método de los elementos finitos, que aproxima las funciones reales por otras de menor dificultad de cálculo y la diferencia entre una función y otra nunca es 0.

A continuación se procederá a resolver el ejercicio por la teoría clásica, mediante el método de Cross.

### 3.4.10. Comparación con la teoría clásica de cálculo



Por tratarse de un sistema simétrico, cargado simétricamente, con analizar la mitad del pórtico es suficiente.

Como la sección es igual para la viga y el pilar, se considera que  $I = 1$  para ambos miembros.

1) Se obtienen los coeficientes de rigidez relativa:

$$K_{DE} = \frac{I}{L} = \frac{1}{7.5} = K_{BA}$$

$$K_{BC} = \frac{I}{L} = \frac{1}{\sqrt{(2.6 \times 3)^2 + 2^2}} = \frac{1}{8.05} = K_{CD}$$

2) Se calculan los coeficientes de reparto:

$$\rho_{ij} = \frac{k_{ij}}{\sum k}$$

$$\rho_{BA} = \frac{k_{BA}}{k_{BA} + k_{BC}} = \frac{1/7.5}{1/7.5 + 1/8.05} = 0.52$$

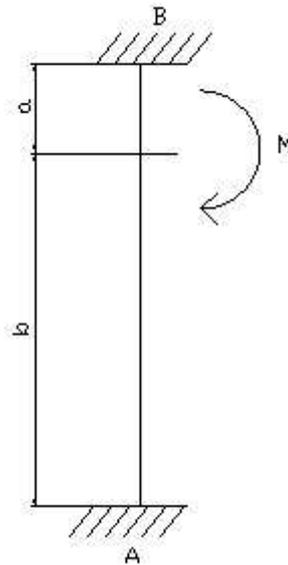
$$\rho_{BC} = \frac{k_{BC}}{k_{BC} + k_{BA}} = \frac{1/8.05}{1/8.05 + 1/7.5} = 0.48$$

El coeficiente de reparto de A y E es 0 por ser un empotramiento (absorbe todo el momento).

Se comprueba que la suma de los coeficientes de reparto es igual a 1.

3) Se hallan los momentos de empotramiento perfecto:

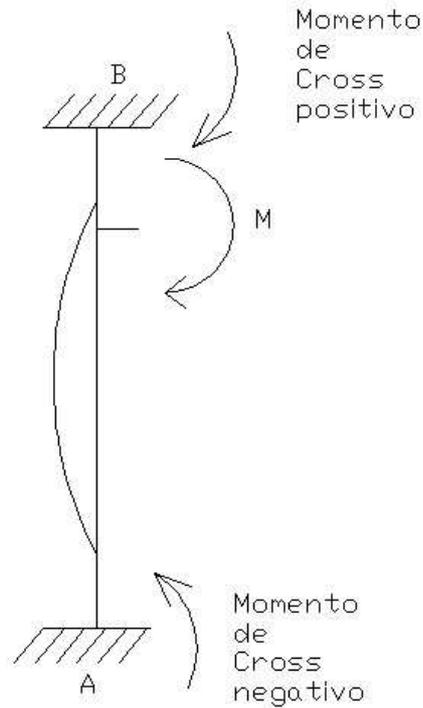
- Para el pilar AB será:



$$M_{BA} = -\frac{M \cdot b}{l^2} (3a - l) = -\frac{49050 \cdot 0.4 \cdot 6}{7.5^2} (3 \cdot 1.5 - 7.5) = 6278.4 \text{ m} \cdot \text{N}$$

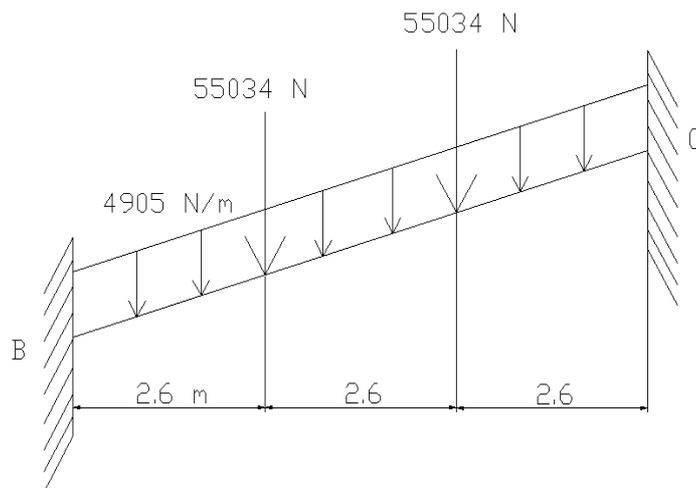
$$M_{AB} = -\frac{M \cdot a}{l^2} (3b - l) = \frac{49050 \cdot 0.4 \cdot 1.5}{7.5^2} (3 \cdot 6 - 7.5) = -5493.6 \text{ m} \cdot \text{N}$$

La deformación en el pilar será:



- Para el dintel BC, el momento de empotramiento será:

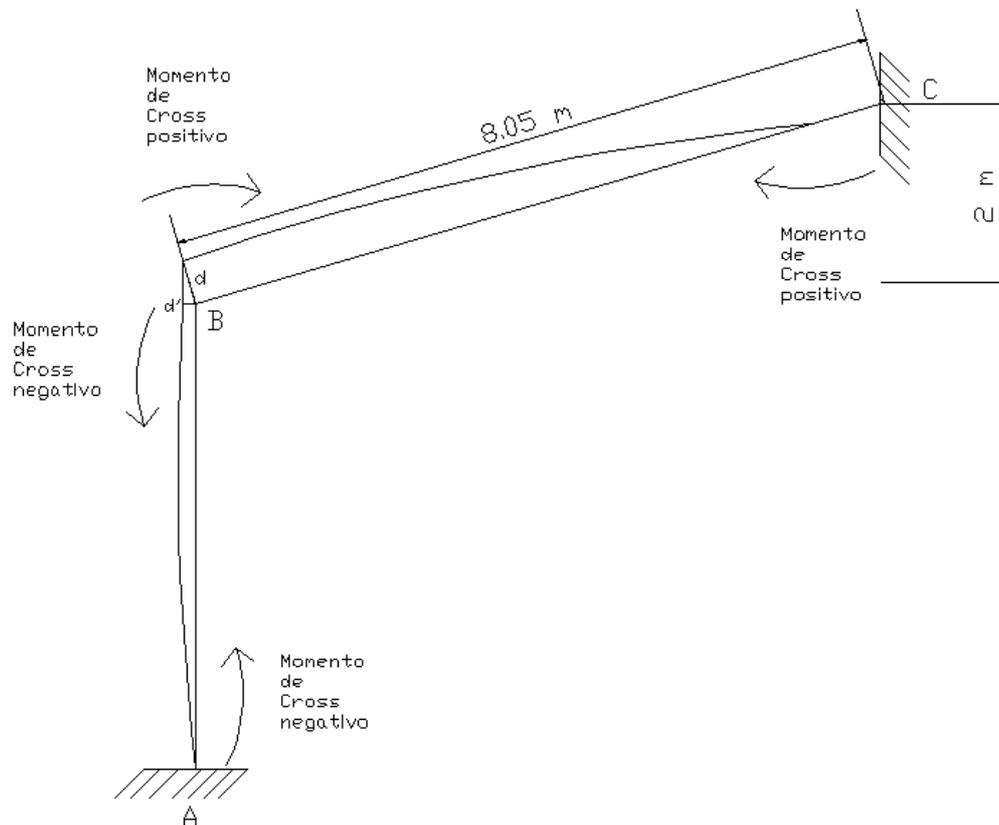
Se estimará la longitud a proyección horizontal por tener la carga en la dirección del eje Y. Las cargas en B y C están aplicadas sobre los apoyos, por lo que no afectan a los momentos de empotramiento.



$$M_{BC} = -M_{CB} = \frac{2 \cdot P \cdot L}{9} + \frac{\omega l^2}{12} = \frac{2 \cdot 55034 \cdot 7.8}{9} + \frac{4905 \cdot 7.8^2}{12} = 120270.62 \text{ N}\cdot\text{m}$$

		B		
	A	BA	BC	C
$\rho$	0	0.52	0.48	0
$M_o$	-5493.6	6278.4	120260.62	-120270.62
1 <sup>er</sup> reparto		-65800.2904	-60738.7296	
1 <sup>er</sup> transporte	-32900.1452			-30369.3648
Momento de Cross M	-38393.7452	-59521.8904	59521.8904	-150639.9848

Aunque se trate de un sistema simétrico, cargado simétricamente, va a tener desplazamiento provocado por el descenso del nudo C, que obliga a un desplazamiento horizontal de B y D.



Al ser  $d$  perpendicular a  $BC$  y  $d'$  perpendicular a  $BA$ , siendo el ángulo formado por  $d$  y  $d'$  el mismo que forman las rectas de longitud 8.05 y 2, se cumplen la siguiente relación:

$$\frac{d}{8.05} = \frac{d'}{2}$$

Este desplazamiento origina momentos internos. Se supone un momento arbitrario en BC de 981000 N·m. Por lo tanto, al ser la relación entre el momento en una barra empotrada por un extremo, que está sufriendo un momento  $M = \frac{6 \cdot E \cdot I \cdot d}{L^2}$  y ser la relación entre las deformaciones conocida, se puede conocer el momento en la barra AB:

$$M_{BC} = 100 \Rightarrow 100 = \frac{6 \cdot E \cdot I \cdot d}{L_{BC}^2}$$

$$M_{AB} = \frac{6 \cdot E \cdot I \cdot d'}{L_{AB}^2}$$

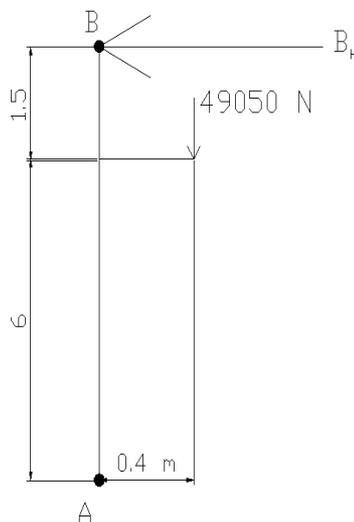
Dividiendo miembro a miembro y sustituyendo  $d = 4.025d'$ :

$$\frac{981000}{M_{AB}} = \frac{6 \cdot E \cdot I \cdot 4.025d' / 8.05^2}{6 \cdot E \cdot I \cdot d' / 7.5^2} \Rightarrow M_{AB} = 280784 \text{ N}\cdot\text{m}$$

	B			
	A	BA	BC	C
$\rho$		0.52	0.48	
$M_0$	-280784	-280784	981000	981000
1 <sup>er</sup> reparto		-364112.32	-336103.68	
1 <sup>er</sup> transporte	-182056.16			-168051.84
Momento de Cross $M'$	-462840.16	-644896.32	644896.32	812948.16

se obtienen las cortantes de las acciones exteriores (momentos M) para hallar el factor K:

- En el pilar



$$Q_{BA} = Q_0 + \left( -\frac{M_{BA} + M_{AB}}{L_{AB}} \right)$$

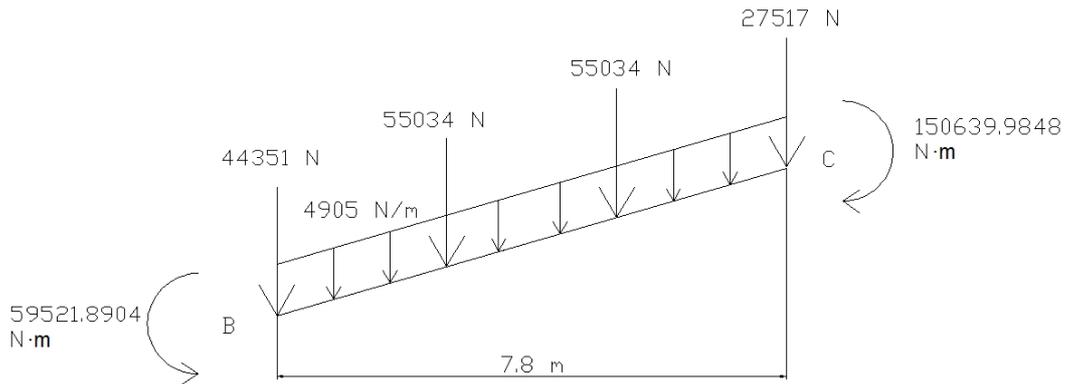
$$\sum M_A = 0 = 7.5 B_H - 49050 \cdot 0.4$$

$$B_H = 2616 \text{ N} \leftarrow = Q_0$$

$$Q_{BA} = 2616 \leftarrow + \left( - \frac{-59521.8904 - 38393.7452}{7.5} \right)$$

$$Q_{BA} = 2616 \leftarrow + 13055.4181 \leftarrow = 15671.4181 N \leftarrow$$

- En el dintel



La inclinación del dintel provoca una reacción horizontal en B, que se determinará a partir de la vertical de C:

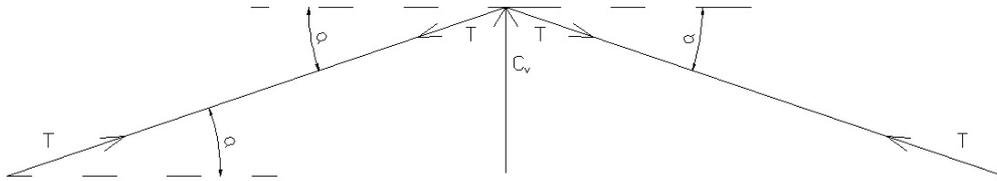
$$Q_{CB} = Q_o + \left( - \frac{M_{CB} + M_{BC}}{L_{BC}} \right)$$

$$Isostática = Q_o = 27517 N + 55034 N + 4905 N / m \cdot \frac{7.8 m}{2} = 101678.5 N \uparrow$$

$$Hiperestática = \left( - \frac{M_{CB} + M_{BC}}{L_{BC}} \right) = \left( - \frac{150639.9848 - 59521.8904}{7.8} \right) = 11681.68072 N \uparrow$$

$$Q_{CB} = 101678.5 \uparrow + 11681.68072 \uparrow = 113360.18072 N \uparrow = C_v$$

Esta reacción corresponde a la mitad del pórtico. La total, al ser simétrico, será el doble y, haciendo el diagrama de cuerpo libre del cumbrero:



$$\text{tag}(a) = \frac{2}{7.8} \Rightarrow a = 14.38^\circ$$

$$\sum F_V = 0 = C_v - 2 \cdot T \cdot \text{sen}(a) \Rightarrow T = \frac{113360.1807 \cdot 2}{2 \cdot \text{sen}(14.38)} = 456450.0566 \text{ N} \rightarrow$$

Conocida  $T$ , se puede hallar la componen horizontal sobre B:

$$B_H = T \cdot \cos(a) = 456450.0566 \text{ N} \cdot \cos(14.38) = 442149.4358 \text{ N}$$

La cortante horizontal en B es:

$$Q_B = B_H + Q_{BA} = 442149.4358 \text{ N} \rightarrow +15671.4181 \text{ N} \leftarrow = 426478.0177 \text{ N} \rightarrow$$

Ahora se obtienen las cortantes de los momentos de desplazamiento (momentos  $M'$ ):

- En el pilar:

$$Q'_{BA} = \left( -\frac{M_{BA} + M_{AB}}{L_{AB}} \right) = -\frac{-644896.32 - 462840.16}{7.5} = 147698.1973 \text{ N} \leftarrow$$

- En la viga:

$$Q'_{BC} = \left( -\frac{M_{BC} + M_{CB}}{h_{BC}} \right) = -\frac{644896.32 + 812948.16}{2} = 728922.24 \text{ N} \leftarrow$$

La cortante horizontal en B será:

$$Q'_B = 147698.1972 \leftarrow +728922.24 \leftarrow = 876620.4372 \text{ N} \leftarrow$$

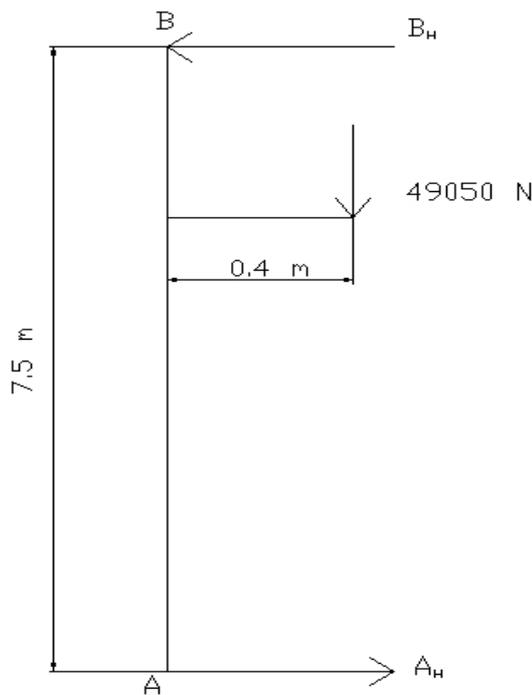
Para el equilibrio de fuerzas cortantes horizontales en B, se tiene:

$$Q_B + k \cdot Q'_B = 0; 426478.0177 \rightarrow +k \cdot 876620.4372 \leftarrow = 0;$$

$$k = 0.486$$

	A	BA	BC	C
M	-38393.7452	-59521.8904	59521.8904	-150639.9848
M'	-462840.16	-644896.32	644896.32	812948.16
M+K·M'	-263334.063	-372941.5019	372941.5019	244452.821
Signo de los momentos resistentes	+	-	-	+

Ahora ya se pueden calcular las fuerzas cortantes:



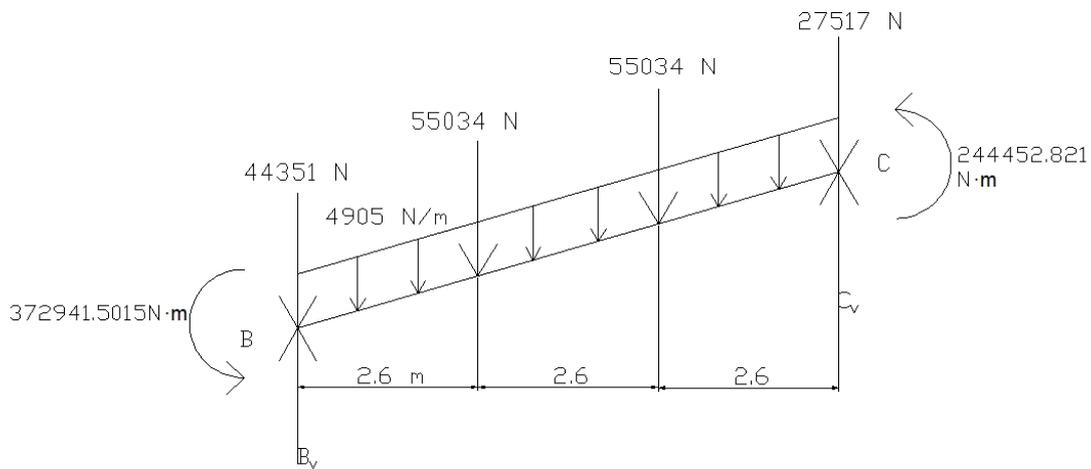
$$\sum M_A = 0; 49050 \text{ N} \cdot 0.4 \text{ m} - B_H \cdot 7.5 \text{ m} \Rightarrow B_H = 2616 \text{ N} = A_H = Q_o$$

$$Q_{AB} = Q_o + \left( -\frac{M_{AB} + M_{BA}}{L_{AB}} \right) = 2616 \rightarrow + \left( -\frac{-263334.063 - 372941.5019}{7.5} \right) \rightarrow = 87452.742 \text{ N} \rightarrow$$

El esfuerzo cortante en el pilar ED será el mismo pero de signo contrario por el equilibrio de fuerzas en el pórtico, que no está sometido a ninguna otra fuerza en el sentido del eje X.

$$Q_{ED} = 87452.742N \leftarrow$$

Las cortantes en BC se hallan a través de las reacciones verticales:



$$\sum M_C = 0 = 7.8 \cdot B_v - 44351 \cdot 7.8 - 372941.5015 - 55034 \cdot (2.6 + 5.2) - 4905 \cdot 7.8 \cdot \frac{7.8}{2} - 244452.821;$$

$$B_v = 197667.62N \uparrow$$

$$\sum M_B = 0 = 372941.5015 + C_v \cdot 7.8 - 27517 \cdot 7.8 - 55034 \cdot (2.6 + 5.2) - 4905 \cdot 7.8 \cdot \frac{7.8}{2} + 244452.821;$$

$$C_v = 22527.38 \uparrow$$

También:

$$B_v = B_{Vo} + \left( -\frac{M_{BC} + M_{CB}}{L_{BC}} \right) = 118514.5 \uparrow + \left( -\frac{372941.5015 + 244452.821}{7.8} \right) \uparrow = 197667.62N \uparrow$$

$$C_v = C_{Vo} + \left( -\frac{M_{BC} + M_{CB}}{L_{BC}} \right) = 101680.5 \uparrow + \left( -\frac{372941.5015 + 244452.821}{7.8} \right) \downarrow = 22527.38 \uparrow$$

Las cortantes a BC se obtienen descomponiendo las anteriores:

$$Q_{BC} = B_V \cdot \cos(a) = 197667.62 \cdot \cos(14.38) = 191474.676 N \uparrow$$

$$Q_{CB} = C_V \cdot \cos(a) = 22527.38 \cdot \cos(14.38) = 21821.595 N \uparrow$$

Las reacciones verticales en los apoyos serán iguales por ser el pórtico simétrico en su geometría y en su carga y serán de:

$$44351N + 55034N + 55034N + 27517N + 4905N / m \cdot 7.8m + 49050 = 269245N$$

Si se comparan estos resultados con los obtenidos por el programa de elementos finitos:

$$\frac{270511}{269245} = 1.0047 \Rightarrow Error = \frac{270511 - 269245}{269245} = 0.0047$$

$$\frac{270455}{269245} = 1.004494 \Rightarrow Error = \frac{270455 - 269245}{269245} = 0.004494$$

Si ahora se comparan los resultados para los esfuerzos cortantes en los apoyos, al ser iguales pero de signo contrario, el error será el mismo y se obtiene:

$$\frac{87979.8}{87452.742} = 1.00603 \Rightarrow Error = \frac{87979.8 - 87452.742}{87452.742} = 6.027 \cdot 10^{-3}$$

Se concluye, por lo tanto, que el error obtenido para los esfuerzos en los apoyos es de  $10^{-3}$  en todos los casos.

## 4. EJERCICIO FINAL: TRANSMISIÓN Y AISLAMIENTO DEL SONIDO EN RECINTOS

### 4.1. Conceptos elementales de acústica

La acústica posee una terminología propia. A continuación, se hará una breve descripción de los conceptos más usuales.

#### 4.1.1. Sonido

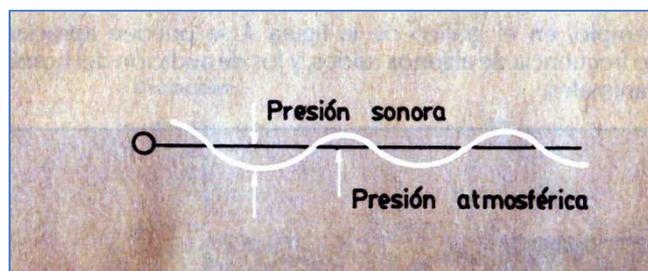
Es la sensación percibida por el oído humano, producida por rápidas fluctuaciones de la presión del aire.

Estas fluctuaciones son producidas por objetos que vibran y que transmiten esta vibración a las partículas del aire. De ahí que el sonido no se transmita en el vacío, necesita la presencia de las partículas de un medio para poder transmitirse. El sonido se propaga en el aire, aproximadamente, a 340 m/s, en el agua a 1500 m/s y en el acero a 5000 m/s.

Estas fluctuaciones de la presión en el aire se pueden comparar con un movimiento armónico simple. Las variaciones de la presión del aire, provocadas por las vibraciones del cuerpo emisor, responden a una ecuación de la forma:

$$P = P_0 \cdot \cos(\omega t + \varphi)$$

Por lo tanto, el sonido consiste en pequeñas variaciones de presión respecto de la presión atmosférica.

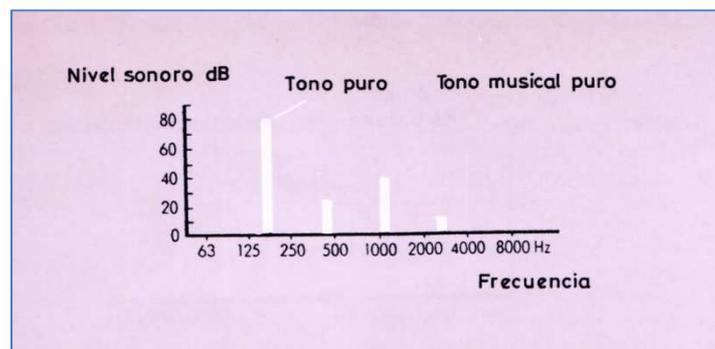


#### 4.1.2. Ruido y tonos

El ruido es el sonido indeseado y, por tanto, molesto. El sonido puede estar compuesto por un solo tono, como el producido por un diapasón, pero, en general, está compuesto por muchos tonos de diferentes amplitudes y frecuencias.

Un tono puro se representa como una columna cuya posición es la frecuencia y cuya altura es el nivel sonoro.

El elemento que mejor caracteriza un sonido es su espectro, que es la representación en función de los tonos que lo componen y sus amplitudes.

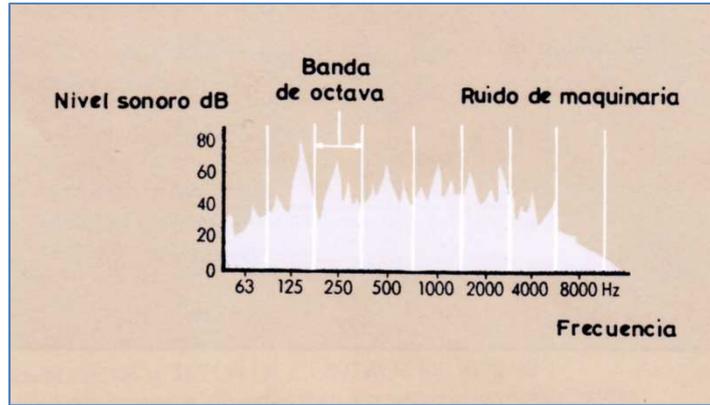


#### 4.1.3. Frecuencia

La frecuencia de una onda sonora es el número de vibraciones en la unidad de tiempo. Se mide en Hertz (Hz). El sonido tiene un margen muy amplio de frecuencias, pero se considera que el margen audible para el ser humano está entre 20 Hz y 20.000 Hz.

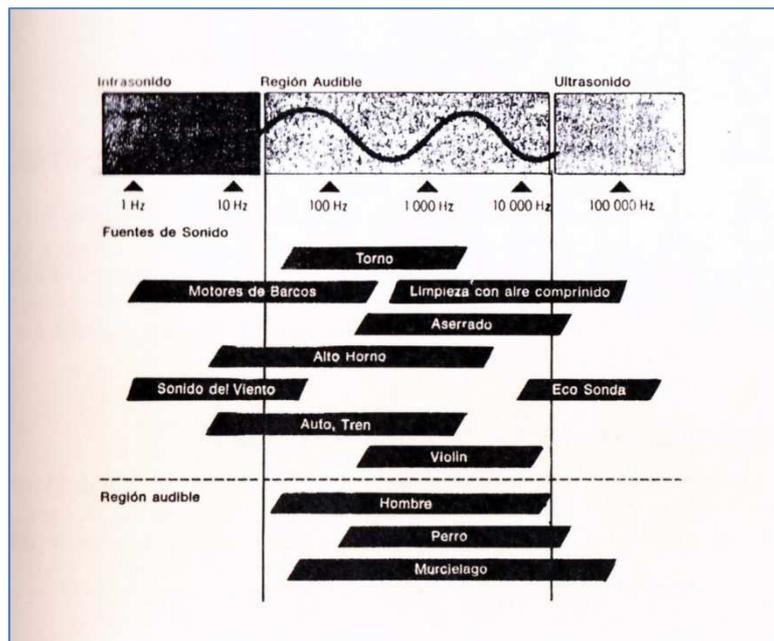
Para las bajas frecuencias, la vibración de las partículas del aire es lenta y se producen tonos graves, mientras que en altas frecuencias vibran rápidamente y se originan tonos agudos.

La imagen inferior es el espectro de un ruido cualquiera. Se caracteriza por estar formado por todas las frecuencias.



#### 4.1.4. Infrasonidos y ultrasonidos

Los infrasonidos son sonidos con frecuencias inferiores a 20 Hz. Los ultrasonidos, en cambio, son sonidos de frecuencias superiores a 20.000 Hz. En ambos casos, se trata de sonidos inaudibles para el ser humano. En la imagen inferior, figuran los márgenes de frecuencia de algunos ruidos y los de audición del hombre y algunos animales.



#### 4.1.5. Decibelios

Al ser el sonido una variación de la presión del aire debido a que las partículas que lo forman están vibrando, las unidades de medida para el sonido serán las unidades de presión, es decir, Pa para el SI.

El oído humano es capaz de detectar presiones que oscilan entre  $20\mu\text{Pa}$  y  $100\text{ Pa}$ , es decir, con una relación entre ellos mayor de un millón a 1. Por este motivo, la aplicación de escalas lineales es inviable. Por ello, se creó el decibelio, dB, que sigue una escala logarítmica y tiene la siguiente definición

$$n = 10 \cdot \log \frac{R}{R_0}$$

donde:

n: Número de decibelios

R: Magnitud que se está midiendo

$R_0$ : Magnitud de referencia

Otro motivo para utilizar una escala logarítmica es el hecho de que el oído humano tiene una respuesta al sonido que se parece a una función logarítmica, es decir, la sensación que se percibe es proporcional al logaritmo de la excitación. Un claro ejemplo de este hecho es que al colocar juntas dos fuentes de ruido idénticas, no producen el doble de sensación que una sola.

#### 4.1.6. Presión sonora y nivel de presión sonora

Las variaciones de presión producidas por la propagación de una onda sonora en el aire son muy pequeñas comparadas con la presión atmosférica. La mínima presión audible para el hombre es de  $20\ \mu\text{Pa}$  y está superpuesta a la presión ambiente atmosférica, que es del orden de  $10^5\text{ Pa}$ .

La presión sonora es la magnitud más fácilmente medible en una onda sonora.

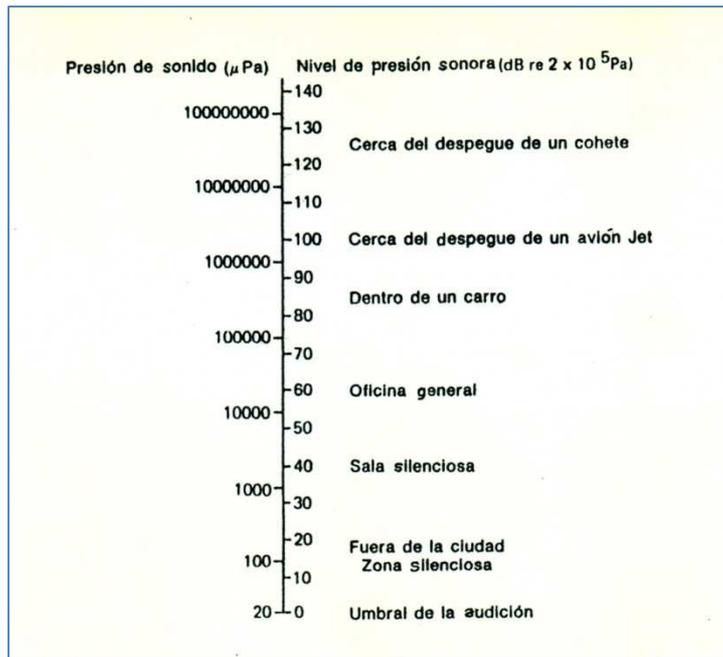
El nivel de presión sonora, NPS, se mide en dB y es:

$$L_p = NPS(dB) = 20 \cdot \log \frac{P_{rms}}{P_0}$$

donde:

$P_{rms}$ : valor cuadrático medio de la presión que se está midiendo.

$P_0$ : presión de referencia, mínima presión audible para el ser humano.



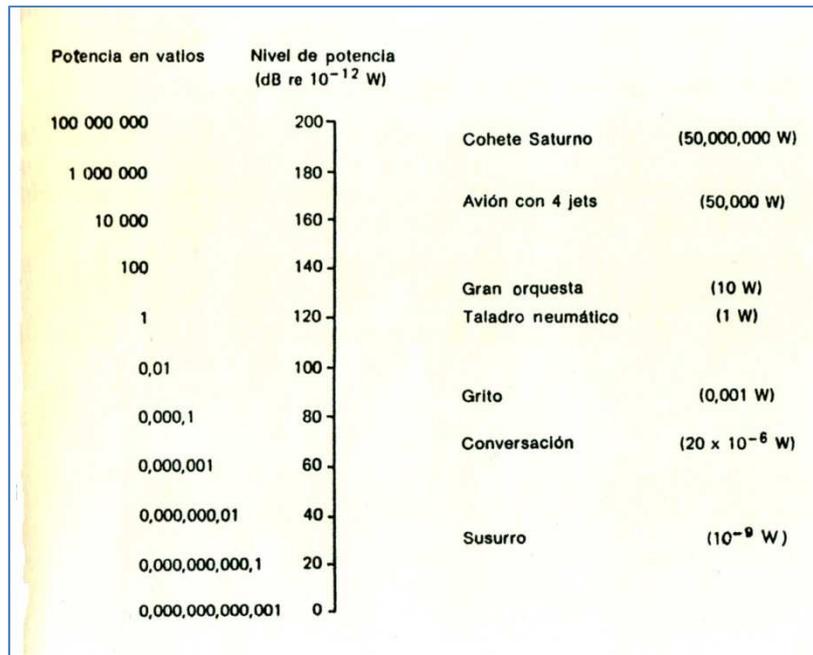
La potencia sonora es una propiedad física de la fuente de ruido y no depende de nada más. La presión sonora, en cambio, depende no sólo de la fuente de ruido, sino también del recinto donde está situada, la distancia, las condiciones ambientales del entorno y la orientación del receptor.

El nivel de potencia sonora es una medida de la energía acústica emitida por la fuente sonora y se define como:

$$L_w = SWL(dB) = 10 \cdot \log \frac{W}{W_0}$$

W: Potencia sonora que se mide.

W<sub>0</sub>: Potencia de referencia, de valor 10<sup>-12</sup>W.



#### 4.1.7. Intensidad sonora y nivel de intensidad sonora

La intensidad sonora o flujo de energía es una magnitud vectorial que describe la dirección y el flujo neto de energía acústica en una posición dada. Sus unidades son energía por unidad de tiempo y por unidad de área, es decir, potencia sonora por unidad de área, W/m<sup>2</sup>.

Analíticamente, está definida como:

$$\vec{I}(t) = p(t) \cdot \vec{u}(t)$$

donde:

I(t): vector intensidad sonora.

p(t): presión sonora.

u(t): vector velocidad de las partículas en movimiento.

Una de las propiedades de la intensidad sonora es que permite diferenciar la parte del campo sonoro que se propaga, la parte activa, y la parte que no se propaga, parte reactiva. La presión sonora no posee esta propiedad. De esta forma, un medidor de intensidad sonora solo responde a la parte activa del campo sonoro.

El nivel de intensidad sonora se define como:

$$L_I = NI(dB) = 10 \cdot \log \frac{I}{I_0}$$

donde:

I: intensidad sonora que se está midiendo.

I<sub>0</sub>: intensidad de referencia, 10<sup>-12</sup> W/m<sup>2</sup>.

#### 4.1.8. Ruido procedente de varias fuentes

El ruido que procede de varias fuentes sonoras combinadas es de un nivel mayor que el de una fuente sola. Si se tienen dos fuentes sonoras iguales, la potencia sonora es el doble, pero el nivel de potencia sonora sólo aumenta en 3dB. Por lo tanto, hay que tener en cuenta que los decibelios no son valores directamente sumables por ser cantidades logarítmicas.

El proceso de cálculo es convertir los decibelios de cada fuente a potencia sonora, sumar las potencias y volver a obtener el nivel de potencia sonora. Por ejemplo, para dos fuentes de ruido de 65 dB (A) y 70 dB (B), el nivel de potencia sonora total es:

$$L_w = 10 \cdot \log \frac{W}{W_0}$$

$$L_{wA} = 65dB \rightarrow 65 = 10 \cdot \log \frac{W}{10^{-12}}; W = 10^{\frac{65}{10}} \cdot 10^{-12} = 3.16 \cdot 10^{-6} W$$

$$L_{wB} = 70dB \rightarrow 70 = 10 \cdot \log \frac{W}{10^{-12}}; W = 10^{\frac{70}{10}} \cdot 10^{-12} = 10^{-5} W$$

Si se suman las potencias sonoras y se obtienen los dB:

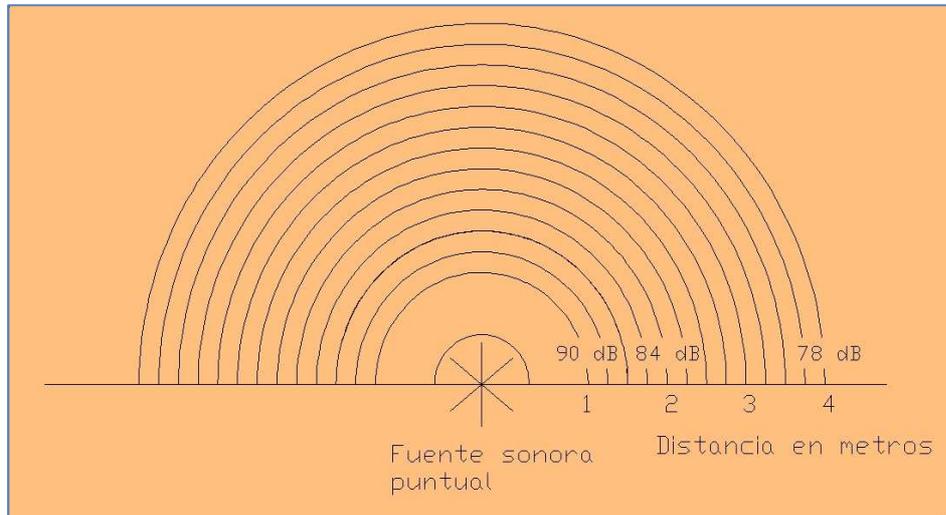
$$W_A + W_B = 3.16 \cdot 10^{-6} W + 10^{-5} W = 1.316 \cdot 10^{-5} W$$

$$L_{w(A+B)} = 10 \cdot \log \frac{1.316 \cdot 10^{-5}}{10^{-12}} = 71.2dB$$

#### 4.1.9. Atenuación con la distancia

El sonido pierde fuerza con la distancia al foco de origen. De hecho, el sonido que se propaga de una fuente sonora omnidireccional de dimensiones reducidas en el aire libre, se atenúa 6 dB cada vez que se dobla la distancia a la fuente. De esta forma, para una fuente sonora puntual, como la de la figura, que está radiando

omnidireccionalmente en el espacio libre, si produce 90 dB a 1 metro, el nivel de presión sonora a 2 metros será de 84 dB, a 4 metros será de 78 dB y así sucesivamente.



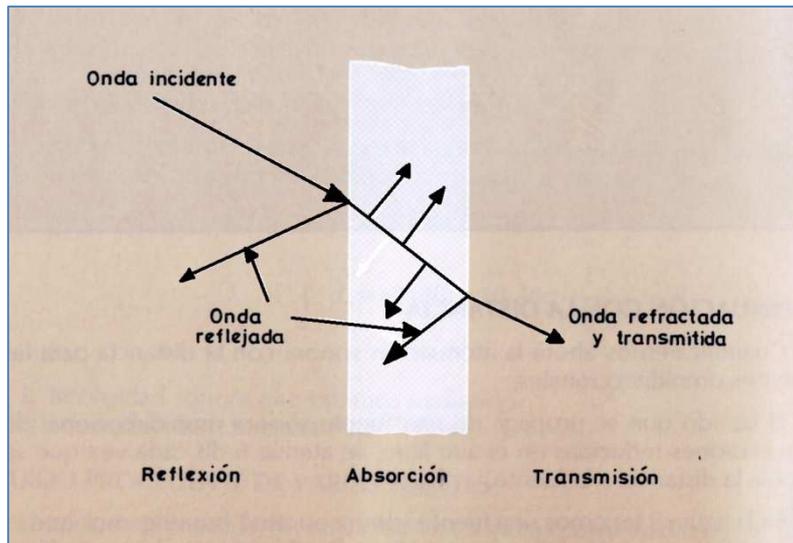
#### 4.1.10. Reflexión, absorción y difracción

##### Reflexión

Cuando las ondas sonoras chocan contra una superficie, una parte de la energía se refleja, otra parte se transmite y otra parte es absorbida por la superficie. Por lo tanto, la presión sonora instantánea en cualquier punto es debida no solo a la radiación directa de la fuente sonora, sino también al sonido indirecto procedente de todas las reflexiones que se producen.

Si la energía absorbida y la energía transmitida son bajas, la gran parte de la energía ha sido reflejada y se trata de una superficie reflectante, acústicamente dura, que se comporta de un modo similar a los espejos con la luz.

Esto quiere decir que para problemas de control de ruido, se debe tener presente que este tipo de superficies aumentan el nivel de presión sonora en el interior.



### Absorción

Cuando una onda sonora choca contra una superficie, una parte de la energía se disipa al ser absorbida por la misma.

La capacidad de absorción de una superficie depende de parámetros tales como rugosidad, porosidad, flexibilidad y, en algunos casos, sus propiedades resonantes.

La eficacia de una superficie o material absorbente se expresa en función del coeficiente de absorción, que es el cociente entre la energía absorbida y la energía incidente. De esta forma, si este coeficiente vale 1, se trata de la absorción perfecta y si vale 0, no hay absorción y se trata de la reflexión perfecta.

$$\alpha = \frac{E.\text{absorbida}}{E.\text{incidente}}$$

El coeficiente de absorción varía con la frecuencia de la onda sonora, por lo que es necesario conocer el espectro del ruido para juzgar el efecto que producirá el material absorbente sobre el ruido.

### Difracción

Para entender este concepto, se debe primero hablar de la longitud de onda y su relación con la frecuencia de la onda y su velocidad de propagación. Las relaciones matemáticas entre longitud de onda, frecuencia y periodo son:

$$\lambda = \frac{c}{f} = c \cdot T, \quad T = \frac{1}{f}$$

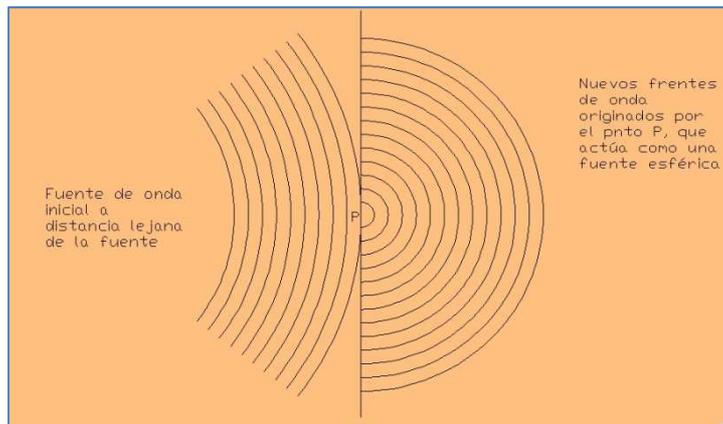
donde:

$\lambda$ : longitud de onda, distancia recorrida por la onda en su sentido de propagación durante un período completo.

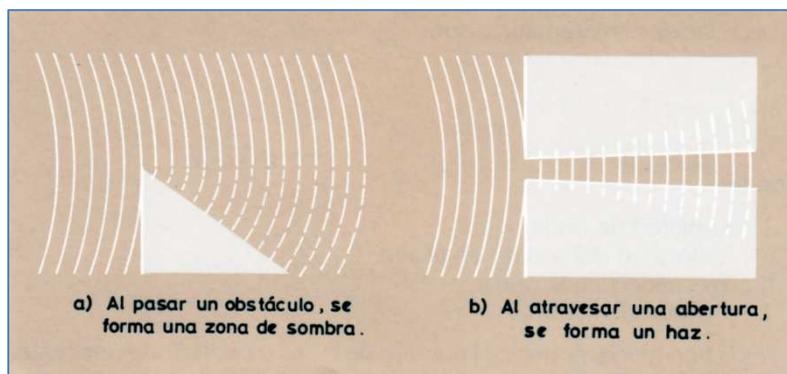
c: velocidad del sonido en el medio.

f: frecuencia de la onda o número de oscilaciones por unidad de tiempo.

T: período de la onda, tiempo necesario para que se produzca un ciclo completo u oscilación.



Cuando una onda sonora encuentra un obstáculo que es pequeño en relación con la longitud de onda, la onda lo rodea y pasa casi como si ese obstáculo no existiera, pero si la longitud de onda es pequeña (frecuencia alta), entonces se produce una zona considerable de sombra acústica donde no se recibe sonido. En las imágenes inferiores, se pueden ver dos ejemplos de difracción en los que, al ser baja la frecuencia, un orificio actúa como un regenerador de la onda mientras que, para altas frecuencias, los obstáculos generan zonas de sombra.



## 4.2. Acústica arquitectónica

Las vibraciones producidas por una fuente sonora situada en un espacio ilimitado, provocan perturbaciones en la atmósfera que la rodea en forma de variaciones de presión que se propagan en todas las direcciones desde la fuente. Si la fuente produce el sonido permanentemente, éste se hace más intenso según nos acercamos a la misma y se debilita si nos alejamos. Al no existir ondas reflejadas, las vibraciones de las partículas de aire disminuyen en amplitud con la distancia a la fuente, como ya se explicó en el capítulo de atenuación con la distancia. Además, cuando se trata de ruidos al aire libre, debe tenerse en cuenta la existencia de viento, ya que el sonido será más intenso en la dirección a favor del mismo.

Una de las mayores dificultades ante la que nos encontramos cuando se intenta escuchar un sonido en el exterior es la falta de habilidad de las personas para escuchar solamente ese sonido, ya que se percibirán los sonidos del ambiente, como tráfico rodado y aéreo, el ruido creado por las personas, industrias, etc. Al estar en el exterior, el sonido se verá afectado por los agentes atmosféricos. Para realizar alguna mejora en las condiciones de audición en el exterior, se puede poner una cubierta alrededor de la fuente. Se logran así dos beneficios en el campo sonoro: en primer lugar, se crea una barrera que protege la fuente de sonidos extraños y, en segundo lugar, esta cubierta recoge el sonido que se radia hacia la parte superior y posterior de la fuente, dirigiéndolo hacia el punto de recepción. Por supuesto, al receptor le llegan los sonidos presentes en el ambiente y está también sometido a los agentes atmosféricos. La protección sobre la fuente proporciona dos mejoras sobre la misma, ya que los sonidos se amplifican y se reflejan, volviendo de nuevo a la fuente y, simultáneamente, se mezcla el sonido, de forma que cuando sale de la protección es más coherente.

Los antiguos griegos, egipcios y romanos ya conocían este principio elemental y lo utilizaban al construir sus estadios al aire libre. Sus construcciones con asientos situados a diferentes niveles hacia arriba, ofrecían múltiples ventajas, como es el que se eliminan los sonidos procedentes de fuentes sonoras distantes que se encuentren en la parte posterior del estadio. Por otra parte, los sonidos que proceden de la parte posterior del escenario, también desaparecen al levantar una pared en la parte posterior del mismo. Existe una ganancia en intensidad, ya que los oídos de los espectadores no están apantallados por la cabeza de las personas que se encuentran delante. La intensidad en el fondo del auditorio es, aproximadamente, la misma que si no hubiera público entre la fuente y la última fila. A pesar de las ventajas que tienen este tipo de espacios, sigue existiendo el problema del ruido ambiente y la influencia de los agentes atmosféricos.

Para resolver estos problemas, basta con levantar paredes laterales y techo por encima de la superficie que ocupan los espectadores. Así mismo, si estas superficies están cubiertas con materiales que absorben totalmente el sonido, las condiciones sonoras no habrán cambiado, puesto que el sonido se radia en todas direcciones y no hay reverberaciones al ser absorbido por las paredes. De esta forma, se logra mejorar la audición del sonido producido por la fuente, que se escucha tal y como lo origina la misma, sin ninguna clase de modificación sonora creada por el recinto cerrado. Un local de este tipo, que tiene sus superficies interiores recubiertas con materiales que absorben toda la energía que incide sobre ellas, se llama “*recinto anecoico*”.

Un recinto, cuyas paredes no tienen estas características, recibe el nombre de “*recinto reverberante*”. La existencia de superficies límites que rodean total o parcialmente a la fuente, cambia el carácter del campo sonoro, ya que el volumen de aire encerrado entre esas superficies, no solo está excitado mientras la fuente esté emitiendo, sino que puede continuar en ese estado de vibración después de que la misma haya dejado de emitir.

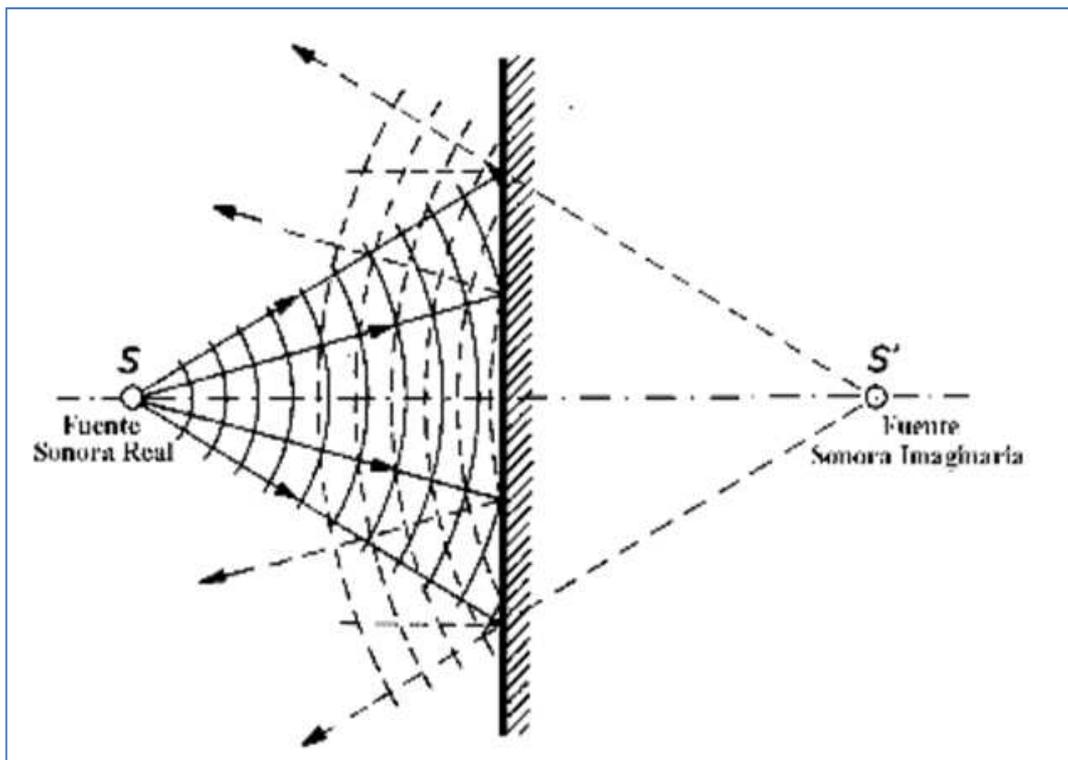
El sonido y la calidad de la audición en un recinto cerrado dependen del aislamiento y el acondicionamiento acústicos. El primer punto consiste en obtener un buen aislamiento, tanto contra el ruido aéreo como contra el ruido estructural entre los diferentes locales, para lo que es necesario tener en cuenta, en el momento del diseño, las leyes fundamentales del aislamiento acústico, considerando los materiales que se emplean para construir las paredes divisorias, el espesor de las mismas, la existencia de paredes dobles, puertas, ventanas, la perforación de paredes, techo o suelo para los servicios de calefacción, potencia eléctrica, aire acondicionado, etc. Es decir, se trata de impedir que las perturbaciones sonoras pasen de un recinto a otro, bien transmitiéndose a través del aire o por las estructuras.

El segundo punto a tener en cuenta es el de obtener un buen acondicionamiento acústico de los recintos, para lo cual se tratarán internamente las paredes, puertas, ventanas, techo y suelo, y se considerará su forma geométrica, así como sus dimensiones, pues su frecuencia crítica dependerá de ellas. Este es un punto básico a la hora de elegir los materiales. Toda estructura tiene una frecuencia crítica y, si el ruido vibra en una frecuencia próxima a ella, la estructura no aislará del ruido, sino todo lo contrario, aumentará ese ruido al vibrar a la misma frecuencia que él. También será necesario un grado de difusión sonora uniforme en todos los puntos del mismo, considerando que sus propiedades se deben a las reflexiones de las ondas en todas las superficies límites.

#### *4.2.1. El campo sonoro en recintos*

Cuando una fuente sonora emite energía, las ondas producidas se propagan radialmente en todas las direcciones a partir de ella. Al encontrar un obstáculo (superficies interiores), cambian de dirección, es decir, se reflejan. En la figura inferior,

se presenta el fenómeno de la reflexión de las ondas, originadas por la fuente  $S$ , sobre una superficie plana. Las líneas curvas representan un tren de ondas difundiéndose en las direcciones indicadas por las flechas continuas, mientras que las discontinuas presentan el comportamiento de las ondas una vez reflejadas. Como se ve en la figura, la reflexión de las ondas en una pared tiene un comportamiento similar a las ondas procedentes de una fuente imaginaria  $S'$ . Si la superficie reflectante no absorbe nada y es perfectamente rígida, no habrá pérdida de energía en la reflexión y la onda reflejada producirá la misma presión sonora, en un punto dado, que la que se originaría si la fuente imaginaria tuviera la misma potencia sonora de salida que la fuente real.

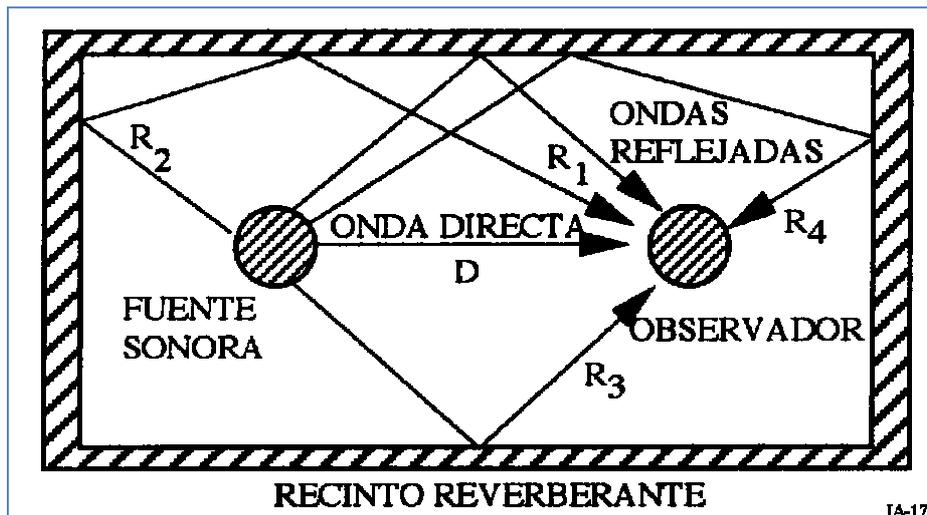


Sin embargo, no existe una superficie física que sea un reflector perfecto, sino que, o bien se pondrá en movimiento por efecto de la onda incidente o, si tiene estructura porosa, permitirá la propagación de las ondas en el interior del material. Si sucede cualquiera de estos dos fenómenos, las ondas reflejadas tendrán menos energía que las ondas incidentes, diciéndose que parte de esta energía es absorbida por la superficie.

El sonido producido por una fuente continua dentro de un recinto incide sobre las paredes del mismo, reflejándose una parte, tendiendo estas reflexiones a aumentar el nivel de presión sonora en el recinto. Los materiales absorbentes sonoros son aquellos que reducen el nivel de energía de las múltiples reflexiones que persisten en el tiempo en un local.

En un recinto con una fuente sonora puntual y con paredes laterales, suelo y techo parcialmente reflectantes, el campo sonoro dentro del mismo estará formado por dos partes:

- El sonido directo  $D$  que va desde la fuente al observador, que es el mismo que habría al aire libre si no existieran perturbaciones.
- Los sonidos reflejados  $R_1, R_2$ , etc. que van desde la fuente al receptor después de una o más reflexiones en las superficies limítrofes.



De acuerdo con lo expuesto, el campo sonoro se determina a partir tanto de la potencia de la fuente, como de las propiedades reflectantes de las superficies del recinto. La calidad sonora de un recinto está determinada en parte por la capacidad de absorción de los materiales que recubren sus superficies límites. Esta capacidad de absorción se debe a las pérdidas de energía en la superficie o en el espesor del material, dependiendo de su estructura, densidad, elasticidad y otras propiedades físicas.

#### 4.2.2. Materiales para acondicionamiento y aislamiento acústico

Los materiales y estructuras para tratamiento acústico son aquellos que tienen la propiedad de absorber o reflejar una parte importante de la energía de las ondas sonoras que chocan contra ellos.

El aislamiento acústico consiste en impedir la propagación de una señal sonora a través del aire, mediante diferentes obstáculos reflectores, para lo que son necesarias paredes duras y pesadas, que reflejan el sonido, pero no lo absorben. También se puede realizar el amortiguamiento del sonido, mediante la absorción del mismo. Es difícil conseguir en la realidad una estructura que refleje todo el sonido, sin que absorba una parte. La pérdida por transmisión  $PT$  indica la capacidad de una pared para atenuar las ondas. La capacidad que tiene una pared para impedir que el sonido

se transmita a través de ella, se da mediante su aislamiento acústico normalizado  $R$ , dado en dB a las frecuencias de 125, 250, 500, 1000, 2000 y 4000 Hz, que nos indica el aislamiento acústico que presenta esa pared entre dos recintos adyacentes.

El aislamiento de vibraciones consiste en impedir la propagación de las vibraciones, mediante sistemas que vibren en concordancia de fase, es decir, con cuerpos de dimensiones pequeñas frente a la longitud de onda.

Los materiales usados para aislar las edificaciones del ruido aéreo, que es el sonido no deseado transmitido por el aire, son ladrillos de diferentes tipos, yeso, cartón-yeso, fibras de diferentes densidades, etc. Un factor importante a la hora de elegir los materiales de las paredes maestras con relación a su aislamiento acústico a ruido aéreo, es la masa de la pared por metro cuadrado de superficie. En la práctica, para masas iguales, las paredes de madera son menos conductoras de sonido que los ladrillos, que, a su vez, dan mejores resultados que el concreto. Desde el punto de vista del ruido aéreo, las paredes maestras y fachadas de los edificios, que se hacen pesadas y gruesas por razones de solidez, pueden asegurar suficiente aislamiento acústico a ruido aéreo; sin embargo, muy frecuentemente esas paredes sirven para transmitir vibraciones a través de la estructura. Los métodos más simples de defensa son el uso de materiales aislantes en la estructura de los edificios y el empleo de rellenos de materiales densos o plásticos (gomas, corcho). El primer método reduce la posibilidad de la transmisión indirecta de ruidos por medio de vibraciones longitudinales, el segundo impide la distribución de las vibraciones longitudinales y de las flectoras; el espesor de la capa elástica puede elegirse entre 25 y 40 mm. Algunas veces, se emplean muelles de metales especiales como rellenos elásticos.

Un método más efectivo para luchar contra los ruidos que penetran a través de los elementos de la construcción de un edificio es tener una separación total entre la estructura del edificio y el recinto que debe protegerse del ruido. Este método se emplea cuando se necesita un aislamiento muy bueno, como en estudios de radio, televisión, etc. Ese sistema de protección recibe el nombre de "flotante" y tiene al recinto aislado totalmente de los elementos sustentadores de la construcción y descansando sobre artificios de plástico o suspendidos de ellos. La atenuación introducida por la conexión oscilante da como resultado una gran reducción del ruido aéreo, percusivo o vibratorio.

Para aumentar el aislamiento en edificios sin aumentar la masa de las paredes, se suelen emplear las capas múltiples y de materiales porosos. Es deseable que los dos elementos de pared que forman una construcción compleja, siempre que sea posible, sean de diferentes materiales, masa, espesor y elasticidad. Tales medidas reducen la posibilidad de la aparición de resonancias que causan depresiones en la característica de frecuencia del aislamiento. En el caso de una pared ligera de dos capas, se puede aumentar a un nivel similar al de una pared grande y sólida colocando en la cavidad una capa de material poroso blando. Aparte del aislamiento adicional, se introduce un desorden dentro del sistema que reduce las resonancias, mejorando el rendimiento del sistema.

Se utiliza en la actualidad un método muy eficaz a la hora de aislar paredes del ruido aéreo. Consiste en sustituir las paredes por una malla reticular de acero unida por resortes a suelo y techo, a la que se unen placas de pladur. De esta forma, las vibraciones provocadas por la fuente sonora chocan contra las placas unidas a la malla metálica, que vibran y dispersan la energía en los muelles que unen la estructura al edificio. De esta forma, la energía de la onda se dispersa y no avanza hacia la habitación contigua. Este sistema no es eficaz para techos y suelos, expuestos a impactos (pisadas, movimientos de muebles, etc.).

Una técnica utilizada para aislar suelos y techos es el techo suspendido y el suelo flotante. Un techo flotante, suspendido sobre resortes, puede aumentar el aislamiento si su masa no es muy pequeña, si la capa de aire entre el techo y el suelo tiene un espesor de 10 cm y si el puente del techo flotante tiene ranuras ocupadas con rellenos elásticos donde se apoyan las paredes. Un suelo flotante presenta una protección contra los impactos de ruido, debiendo estar el suelo completamente aislado de la pared y del verdadero suelo soporte de carga. Por ese motivo, el falso suelo se coloca sobre rellenos blandos resistentes (fibra de vidrio, corcho o caucho, gomas), separado de la pared por rellenos similares. Así, con un suelo flotante y debajo de un techo flotante, el suelo se vuelve una construcción de tres capas, cuyo aislamiento total es mucho más elevado que cualquier suelo ordinario. La colocación de alfombras que absorban la energía del ruido disminuye la transmisión del sonido a través de suelos y techos.

### 4.3. Criterios para la estimación de la molestia del ruido

Resulta complicado evaluar la molestia del ruido, dado que es un parámetro subjetivo. Por ese motivo, para obtener una evaluación de la molestia, se han elaborado unas referencias sobre las que comparar las medidas de ruido que se realicen: son las escalas subjetivas de medida. Algunas escalas consisten simplemente en una sola medida, otras requieren un conocimiento del espectro del ruido, otras necesitan unas estadísticas temporales y otras se componen de una mezcla de todas las anteriores. Es importante la elección de la escala de medida, que depende de cada aplicación en particular. Los resultados de unas escalas a otras serán muy diferentes.

Estas consideraciones dividen los métodos de clasificación en dos grupos: las escalas y los procedimientos.

Las escalas describen sólo las características físicas del estímulo acústico. Una escala ampliamente utilizada es la de ponderación A.

Los procedimientos intentan normalizar métodos e incluyen factores externos no acústicos, aunque importantes, que afectan a la respuesta de las personas dentro del contexto social en el que se produce el ruido.

A continuación, se detallan algunas de las escalas utilizadas, ordenadas por el nivel de complejidad.

#### *4.3.1. Nivel de presión sonora global*

Consiste en la medida sin ponderación del nivel de presión sonora en el margen audible de frecuencias, que normalmente se encuentra entre 20 Hz y 20 kHz. Tiene una correlación pobre con la respuesta subjetiva del oído humano.

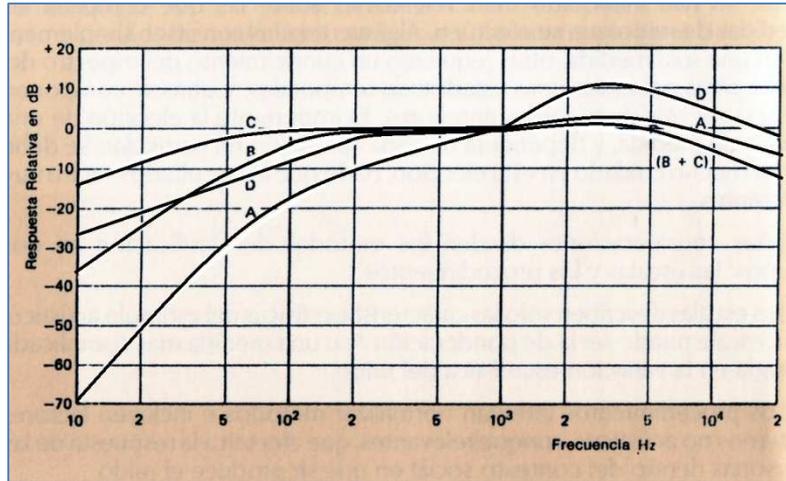
#### *4.3.2. Nivel de presión sonora ponderada A. Otras ponderaciones*

La presión es medida por un micrófono calibrado y un amplificador, o por un sonómetro, que incorporen un filtro eléctrico que modifique la respuesta en frecuencia, intentando seguir aproximadamente la respuesta subjetiva del oído humano. Este hecho, junto con la facilidad de realización del filtro, ha llevado a su adopción como medida normalizada en muchas normativas nacionales e internacionales.

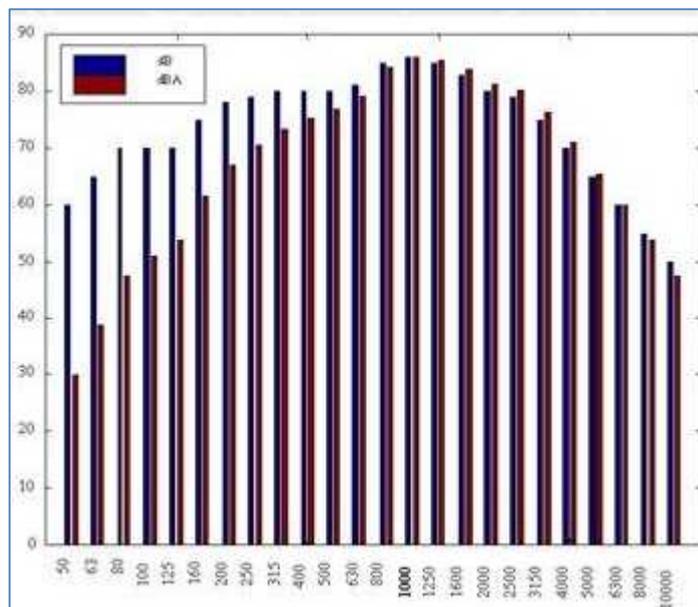
Existen otras ponderaciones en frecuencia que están normalizadas internacionalmente: la ponderación B (la menos utilizada) sigue aproximadamente la curva de 70 phon (medida del nivel de sonoridad) y la ponderación C la de 100 phon (utilizada en la ponderación de niveles de pico), mientras que la A sigue la de 40 phon.

La ponderación D se usa para evaluar el ruido producido por aviones. Y aún hallamos otras menos utilizadas como la E y la SI. Esta última pretende evaluar la interferencia en la conversación y ocupa la zona del espectro donde predominan las frecuencias de conversación, entre los 200 Hz y los 2kHz.

Análisis comparativos han demostrado que, independientemente del nivel, para la mayoría de los ruidos, tanto la molestia como la peligrosidad para el órgano de audición quedan mejor determinadas cuando se emplea la ponderación A, por lo que es la más utilizada. Además, puede ser incorporada en los instrumentos portátiles más pequeños.



A continuación, se puede ver la diferencia existente entre las medidas para dB y dB(A) en la misma situación de presión acústica. Se puede observar que las barras de la zona izquierda de la gráfica, la zona de las bajas frecuencias, son sensiblemente inferiores en los resultados expresados en dBA (barras rojas). Esto se debe a que el oído humano atenúa las bajas frecuencias por su menor sensibilidad ante ellas. Sin embargo, las frecuencias medias permanecen inalteradas prácticamente.



#### 4.3.3. $L_{Aeq}$ , nivel sonoro equivalente

$L_{Aeq}$  es la energía media ponderada A de un ruido, promediado durante el tiempo de medida. Es el nivel continuo que tiene la misma energía acústica ponderada A que el ruido fluctuante real durante el mismo período de tiempo, y se define como:

$$L_{Aeq} = 10 \cdot \log \frac{1}{T} \int_0^T \left( \frac{PA(t)}{p_0} \right)^2 dt$$

donde:

T: Tiempo total de medida.

PA (t): Presión acústica instantánea ponderada A.

$p_0$ : Presión de referencia, 20 $\mu$ Pa.

Otro parámetro derivado de  $L_{Aeq}$  es el  $L_N$ , que es el nivel equivalente excedido durante el N% del período de medida.

Estos dos parámetros,  $L_{Aeq}$  y  $L_N$ , forman los datos básicos para escalas de ruido más complejas.

#### 4.3.4. $L_{DN}$ , nivel sonoro promedio día-noche

Es el  $L_{Aeq}$  con una ponderación de 10 dB para el ruido producido entre las 22:00 y las 07:00 horas. Esta escala fue promovida por la Agencia de Protección del medio ambiente de los Estados Unidos y se basa en el aumento de la molestia producida por el ruido durante la noche.

#### 4.3.5. $L_{NP}$ , nivel de contaminación de ruido

Este parámetro está formado por dos términos. El primero es una medida del nivel de ruido equivalente  $L_{Aeq}$  y el segundo refleja el aumento de la molestia provocado por las fluctuaciones de dicho nivel. Se define como:

$$L_{NP} = L_{Aeq} + k\sigma$$

donde:

$L_{Aeq}$ : Nivel equivalente de ruido durante el período de medida.

$\sigma$ : Desviación estándar del nivel instantáneo durante el mismo período.

k: Constante de valor 2.56, obtenida por el creador de la escala D.W. Robinson después de varios estudios de respuesta subjetiva al ruido de tráfico y aviones.

#### 4.3.6. TNI, índice de ruido de tráfico

La unidad base de medida es el nivel ponderado A, medido durante un período de 24 horas. Se determinan previamente los niveles estadísticos  $L_{10}$  y  $L_{90}$ , que son aquellos niveles que se han excedido durante el 10% y el 90% del tiempo, respectivamente. El  $L_{90}$  es un promedio del nivel de ruido de fondo y el  $L_{10}$  es un promedio de los niveles de pico. El TNI será:

$$TNI = 4(L_{10} - L_{90}) + L_{90} - 30$$

Al igual que en el nivel de contaminación de ruido, se produce un énfasis en el hecho de que una parte importante de la molestia se atribuya a la variación del nivel de ruido en el tiempo.

#### 4.3.7. SEL, nivel de exposición sonora

El nivel de exposición sonora es el nivel constante que, mantenido durante un segundo, tiene la misma energía ponderada A que el ruido está produciendo durante el período de medida. Es, por tanto, un nivel sonoro equivalente normalizado a la duración de 1 segundo. Se define como:

$$SEL = 10 \log \frac{1}{t_0} \int_{t_1}^{t_2} \left[ \frac{p_a(t)}{p_0} \right]^2 dt$$

donde:

$p_a(t)$ : presión instantánea ponderada A.

$p_0$ : presión de referencia 20  $\mu$ Pa.

$t_0$ : tiempo de referencia un segundo.

$t_2-t_1$ : intervalo de tiempo, lo suficientemente largo como para incluir todo el ruido significativo.

Este concepto es útil cuando se trata con entornos en los que se produce una gran variedad de tipos de ruido. En estos casos, el conocimiento del nivel de exposición sonora SEL tiene algunas ventajas. Cuando se quiera describir un ambiente ruidoso

mediante el nivel continuo equivalente  $L_{Aeq}$ , se puede calcular muy fácilmente a partir de varias medidas de SEL mediante la siguiente expresión:

$$L_{Aeq} = 10 \log \left[ \frac{1}{T} \sum_{i=1}^n 10^{(L_{AEi}/10)} \right]$$

donde:

n: número total de sucesos de ruido en el tiempo T.

$L_{AEi}$ : SEL para el suceso i.

Por lo tanto, el nivel de exposición sonora SEL tiene la ventaja de que los valores que se obtienen describen las fuentes individuales de ruido y el ambiente ruidoso de forma compatible, aunque se debe tener en cuenta que se utiliza siempre la ponderación A.

Existen otras medidas de ruido para el ruido de aviones como el NNI y el PNL que no se explican aquí.

#### 4.4. Criterios y escalas para determinar la molestia del ruido en comunidades

Cuando apareció el interés por evaluar la molestia del ruido en la sociedad, se empezó por hacer estudios a grupos de personas para averiguar el nivel de molestia ante distintos tipos de ruidos.

Al principio, solo se establecieron normas sobre los límites de ruido que no debían ser superados durante la noche, pero actualmente se evalúan parámetros que describen la molestia causada por las variaciones de ruidos intermitentes o fluctuantes, su duración y el momento del día en que se producen.

Las normativas de los distintos países tienen en cuenta estos criterios enumerados, pero varían de unos a otros.

La mayoría de los métodos constan de dos elementos:

- a) Un nivel de ruido medido y corregido según las características del mismo.
- b) Un criterio de niveles corregido, para tener en cuenta factores externos y sociales, con los que comparar.

Las correcciones que se efectúan en los criterios constituyen unas tolerancias respecto a los niveles de ruido permitidos por las normas y tienen en cuenta factores como la hora del día, el mes del año, el tipo de vecindario y, dependiendo de las normas, el tipo de aislamiento del sonido en edificaciones. Por ejemplo, la recomendación ISO sugiere un criterio de ruido exterior de 35 a 45 dB en áreas residenciales, donde las medidas del ruido de fondo no sean eficaces. Las correcciones recomendadas para diferentes tipos de distritos son las de la tabla inferior.

Tipo de zona	Correcciones al criterio base en dB(A)
Zonas rurales y zonas de hospitales	0
Zonas suburbanas y tráfico ligero	+5
Zonas urbanas	+10
Zonas urbanas con tiendas, negocios o calles principales	+15
Zona céntrica	+20
Zona industrial	+25

Otras correcciones que afectan a la hora del día son las de la tabla inferior.

Hora del día	Correcciones al criterio base en dB(A)
Mañana	0
Tarde	-5
Noche	-10 a -15

En el caso de edificios, se aplican las correcciones aproximadas por el aislamiento de fachadas y ventanas de la tabla inferior.

Estado de las ventanas	Corrección en dB(A)
Ventanas abiertas	-10
Ventanas simples cerradas	-15
Ventanas dobles cerradas	-20

Para el ruido en locales en áreas no residenciales, los criterios a seguir son los de la tabla inferior.

Tipo de recinto	Criterio de ruido en dB(A)
Grandes oficinas, almacenes, sala de espera, restaurantes silenciosos	35
Grandes restaurantes, oficinas con máquinas de escribir	45
Grandes recintos con máquinas de oficinas	55
Talleres	45-75

El otro elemento constitutivo de los métodos era el nivel de ruido medido, debidamente corregido según las características del ruido, duración y fluctuación. El ruido se mide con un sonómetro si es continuo o intermitente. Si la variación del ruido con el tiempo es compleja, el parámetro a utilizar es el nivel continuo equivalente,  $L_{Aeq}$ .

Las correcciones para ruidos impulsivos (el ruido impulsivo es aquel ruido cuya intensidad aumenta bruscamente durante un impulso; la duración de este impulso es breve en comparación con el tiempo que transcurre entre un impulso y otro) o para tonos puros, y su duración, se muestran en la tabla inferior.

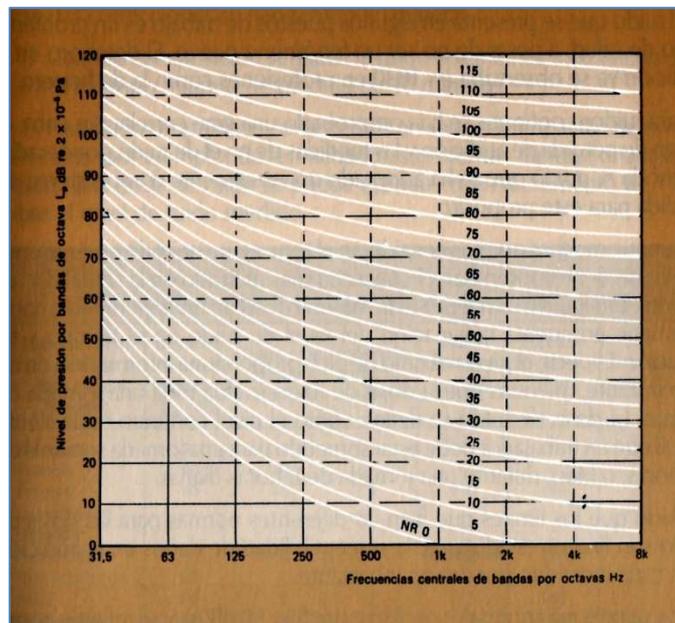
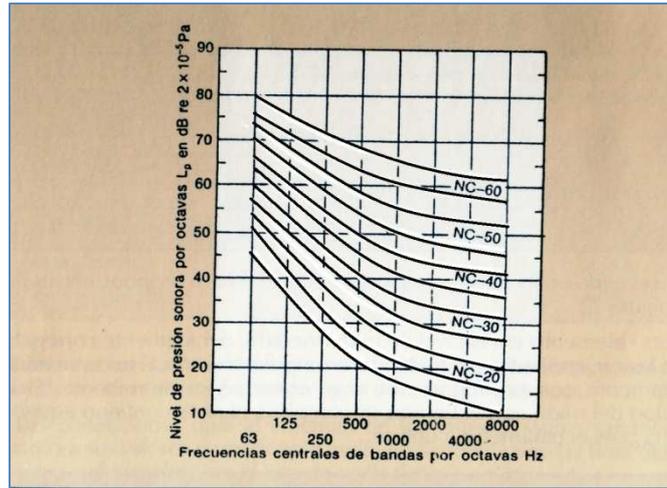
Principales características del ruido		Corrección en dB(A)
Factor de pico	Ruido impulsivo	+5
Carácter espectral	Tonos puros presentes	+5
Duración del ruido con nivel $L_A$ en tanto por ciento del período de tiempo.	Entre:	
	100 y 56%	0
	56 y 18%	-5
	18 y 6%	-10
	6 y 1.8%	-15
	1.8 y 0.6%	-20
	0.6 y 0.2%	-25
	Menos de 0.2%	-30

Cuando los valores medios corregidos se comparan con los de la norma, se obtiene la tabla siguiente:

Número de dB(A) que excede el nivel sonoro del criterio de ruido	Respuesta social estimada	
	Clase	Descripción
0	Ninguna	No se observan reacciones
5	Pequeña	Quejas esporádicas
10	Media	Quejas generalizadas
15	Fuerte	Avisos de respuesta
20	Muy fuerte	Respuestas de la sociedad

El espectro del ruido medio se compara con un grupo de curvas que permite identificar qué bandas de frecuencia son las realmente molestas. Existen diferentes tipos de curvas, como las NC, de American Noise Criteria, o las NR, de ISO.

En general, las medidas de ruido se efectúan en bandas de octava con las correcciones explicadas y se comparan con las curvas NR. Los gráficos con las curvas NC y NR, respetivamente, aparecen abajo.



Los valores NC recomendados para distintos ambientes están recogidos en la tabla inferior:

Ambiente	Rango de niveles NC considerados aceptables
Factorías (ingeniería pesada)	55-75
Factorías (ingeniería ligera)	45-65
Cocinas	40-50
Piscinas, áreas de deporte	35-50
Centros comerciales, tiendas	35-45
Restaurantes, bares, cafeterías y cantinas	35-45
Oficinas mecanizadas	40-50
Oficinas de uso general	35-45
Oficinas privadas, bibliotecas, salas de justicia, salones de clase en colegios	30-35

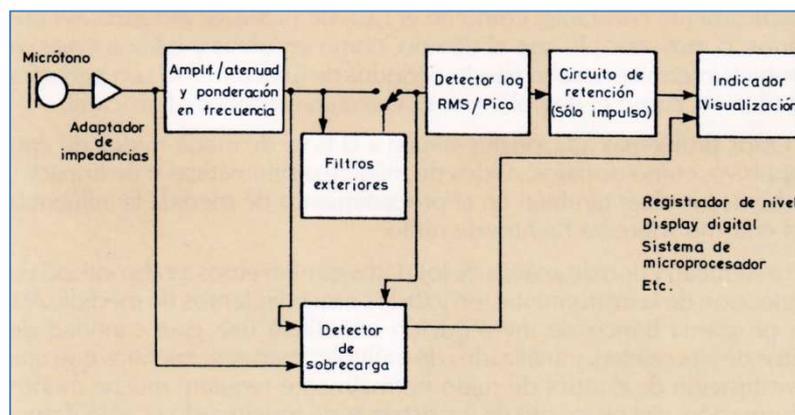
Viviendas, dormitorios	25-35
Hospitales, guarderías, teatros en funcionamiento	25-35
Cines	30-35
Teatros, salas de asamblea, iglesias	25-30
Salas de concierto	20-25
Estudios de grabación y radiodifusión	15-29

Ambiente	Rango de niveles NR considerados aceptables
Talleres	60-70
Oficinas mecanizadas	50-55
Gimnasios, polideportivos, piscinas	40-50
Restaurantes, bares, cafeterías	35-45
Oficinas privadas, bibliotecas, salas de justicia	30-40
Cines, hospitales, iglesias, salas de conferencias pequeñas	25-35
Aulas, estudios de TV	20-30
Salas de concierto, teatros	20-25
Clínicas de diagnóstico, cuarto para audiometría	10-20

## 4.5. Sonómetro

Para la medida del ruido acústico existe una gran variedad de sistemas distintos, incluyendo aquellos que están formados por un conjunto de instrumentos interconectados con los que es posible afrontar la mayoría de los problemas que se presenten.

Aunque cada equipo es distinto, básicamente todos consisten en un transductor, una sección de análisis y una unidad de visualización.



La sección de análisis es la más compleja y se compone de una gran variedad de circuitos para acondicionar la señal eléctrica, ponderarla e integrarla si es preciso. Para el caso más sencillo, consiste en una ponderación en frecuencia de acuerdo a alguna de las redes de ponderación normalizadas, por ejemplo, la ponderación A.

El transductor suele ser un micrófono, que es el encargado de transformar las variaciones de energía acústica en señal eléctrica. El micrófono debe presentar la misma sensibilidad (relación de transformación de presión acústica en tensión eléctrica) en todo el rango de frecuencias (20 a 20000 Hz). También se puede utilizar un acelerómetro o un sensor de fuerza en su lugar.

Una vez que el transductor convierte la señal acústica en señal eléctrica, un detector de sobrecarga es el encargado de generar un mensaje de error en caso de que el margen dinámico de la señal captada supere el margen de funcionamiento de alguna de las etapas posteriores, con lo que la medida resultante no sería correcta.

Si no existe error ninguno, la medida sigue adelante. La primera etapa después del detector de sobrecarga es la red de ponderación en frecuencia. Aquí, la señal pasa a través de un filtro cuya respuesta en frecuencia varía de forma análoga a la sensibilidad del oído humano. Se pretende que el nivel de presión sonora medido refleje el nivel subjetivo percibido por el oído humano. Los sonómetros suelen incorporar las cuatro escalas de ponderación sonora recogidas en las normas internacionales.

Los filtros que se encuentran a continuación se emplean en aplicaciones en las que se requiera un análisis en frecuencia de la señal acústica. Los filtros permiten evaluar la composición del ruido por bandas de frecuencia. Están normalizados y se utilizan de 1 octava y 1/3 de octava. Para las medidas más habituales, suele ser suficiente con una resolución espectral de 1/3 de octava. Para otras aplicaciones, ecualización de salas, por ejemplo, donde se requiera una resolución mayor, existen sonómetros y analizadores de espectro en tiempo real con filtros de ancho de banda inferior al tercio de octava (1/12, 1/16, etc.).

La sección de salida es habitualmente un medidor calibrado con un tiempo de respuesta normalizado, el detector RMS. Este componente tiene una respuesta temporal determinada. Están normalizados tres tipos de respuestas, según aparecen en la norma IEC:

- *Fast*. Respuesta rápida. Se utiliza para las medidas de ruido fluctuante. La constante de tiempo para este tipo de respuesta es de 125 ms.
- *Slow*. Respuesta lenta. Se utiliza para medir ruidos que no fluctúan rápidamente. La constante de tiempo es de 1 s.
- *Impulse*. Respuesta impulsiva. Se utiliza únicamente para medir ruidos impulsivos, con una constante de tiempo de 35 ms.

Las unidades de visualización solían ser de aguja. En la actualidad, se dispone de unidades de lectura digitales, pantallas de rayos catódicos, etc. Incluso existe la posibilidad de conectar con ordenadores para el almacenamiento masivo de datos y su postprocesado.

El sonómetro portátil es, probablemente, la mejor opción a la hora de elegir un sistema de medida completo y preciso y que incluya todos los elementos mencionados. Existe una gran variedad de modelos, que van desde el más sencillo que efectúa únicamente medidas ponderadas A, a los más complejos, que incluyen todas las redes de ponderación normalizadas y facilidades para medir ruidos impulsivos, utilizar filtros, o integradores para obtener  $L_{Aeq}$  o el SEL.

Los sonómetros actuales permiten medir diferentes características del ruido. Algunas de ellas son:

- Valor máximo con constantes de tiempo *fast* o *slow* y *reset* automático cada 1 segundo o manual mediante pulsador.
- $L_{Aeq}$  para períodos fijos de medida de 1 minuto o períodos variables de cualquier duración.
- Valor máximo de pico, necesario para la prevención de la pérdida auditiva.
- Impulsos para evaluar la percepción humana al ruido impulsivo.

Los sonómetros se clasifican según su grado de precisión en clase 0, 1, 2 y 3, siendo los de clase 0 los de máxima precisión y los de clase 1 de gran precisión.

Los avances en electrónica han permitido construir sonómetros con mayor número de funciones en un espacio muy reducido. Estos sonómetros incluyen ponderaciones A, C, lineal y lineal de banda muy ancha (permite el paso de la señal sin modificación), respuestas RMS, *fast*, *slow* e *impulse*, y constantes de tiempo de pico (*peak*) de tan solo 50  $\mu$ s. Son capaces de medir y calcular simultáneamente  $L_{Aeq}$ , SEL, nivel de presión actual y los niveles máximo y mínimo obtenidos durante la medición.

En la actualidad, existen sonómetros modulares. Estos aparatos tienen un ordenador introducido en la caja del sonómetro para poder medir y efectuar operaciones con las medidas tomadas.



El sonómetro de la imagen es un sonómetro integrador promediador de clase 1. Puede funcionar como sonómetro o como analizador de espectro de sonido en tiempo real por bandas de tercio de octava y octava. Este sonómetro pertenece a los sonómetros moduladores de los que antes se hablaba. Permite medir todas las funciones simultáneamente con todas las ponderaciones frecuenciales. Tiene las funciones necesarias para calcular los índices básicos de evaluación acústica de la mayoría de países del mundo: niveles de exposición sonora, niveles continuos equivalentes, niveles de pico, etc.

#### **4.6. Simulación en *ABAQUS* de la transmisión del ruido provocado por un bar a una vivienda adyacente**

Se pretende desarrollar con el programa de elementos finitos *Abaqus* un bar adyacente a una vivienda, con cuatro focos de ruido en las esquinas del mismo, simulando los altavoces de música. Se emplearán para ello varias disposiciones constructivas y materiales de uso común en la construcción.

##### *4.6.1. Ejercicios previos al análisis final*

Antes de llevar a cabo la simulación de un bar y una vivienda en *Abaqus*, se han desarrollado varios ejercicios previos para aprender a usar las herramientas propias del sonido dentro del programa. Existen algunas diferencias con los ejercicios desarrollados con anterioridad que se explicarán según vayan apareciendo en el análisis.

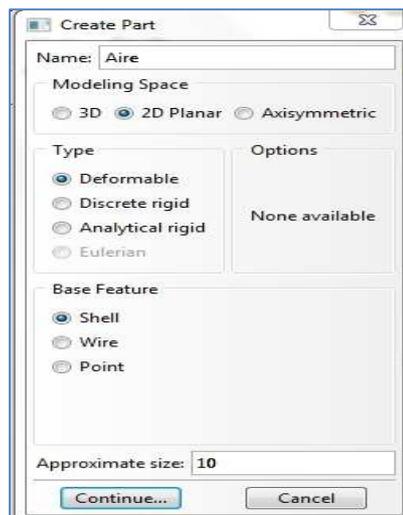
#### 4.6.1.1. Ejercicios en 2D

El primer ejercicio que se ha realizado es una simplificación en 2D de dos masas de aire separadas por un elemento de ladrillo para las distintas frecuencias. Se han tomado las frecuencias 125, 250, 500, 1000, 1500 y 2000 Hz.

##### 4.6.1.1.1. Creación de una parte

Se inicia el programa *Abaqus/CAE*. Se dibuja la geometría con el módulo *Part*:

- Se hace clic en el icono  del menú del módulo.
- Aparece la ventana *Create part*.
  - *Name: Aire*
  - *Modeling Space: 2D Planar*
  - *Type: Deformable*
  - *Base Feature: Shell*
  - *Approximate Size: 10*



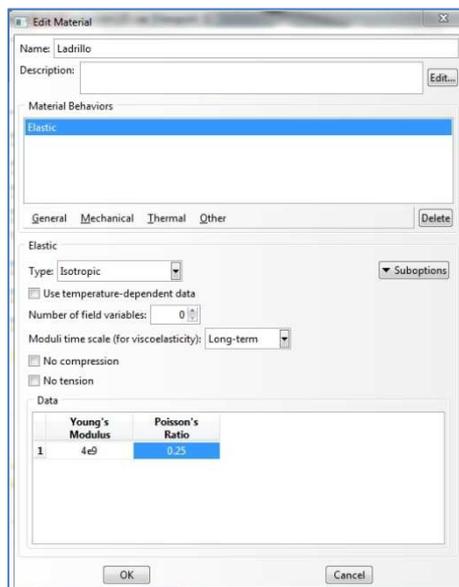
- Para este primer ejercicio, se simularán dos masas de aire de  $3 \times 4 \text{ m}^2$  y un elemento de división entre ellas de ladrillo de  $0,3 \times 3 \text{ m}^2$ . Por lo tanto, se dibujará un rectángulo de  $3 \times 4 \text{ m}^2$  para *Aire* haciendo clic en el icono  e introduciendo las coordenadas  $(-4, 1.5)$  y  $(0, -1.5)$ .
- Se hace clic en el icono  para desactivar la herramienta y en *Done* para salir del *Sketcher*.
- Se vuelve a hacer clic en  y se repiten los pasos para el segundo bloque de aire, que se llamará *Aire2*. Las coordenadas en este caso serán  $(0.3, 1.5)$  y  $(4.3, -1.5)$ .

- Se hace clic en  para desactivar la herramienta de dibujo y en *Done* para salir del *Sketcher*.
- De nuevo, se hace clic en  para crear la parte de ladrillo. Se nombra *Ladrillo*, y las coordenadas para esta última parte son (0, 1.5) y (0.3, -1.5).
- Se desactiva la herramienta de dibujo y se hace clic en *Done* para terminar el diseño de la geometría del modelo.

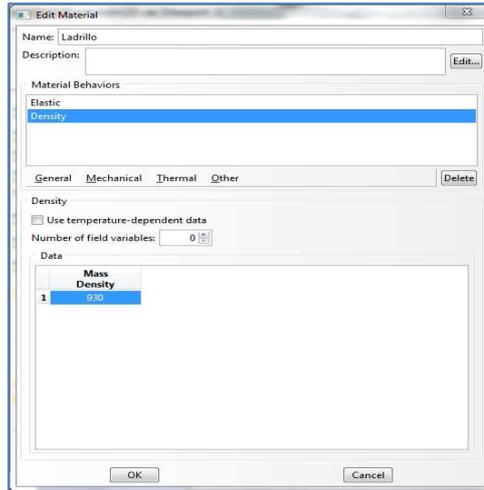
#### 4.6.1.1.2. Creación del material

El siguiente paso en el análisis es crear los materiales. Para definir los materiales del ejercicio se debe utilizar el módulo *Property*. Una vez dentro del módulo, los pasos a seguir son los siguientes:

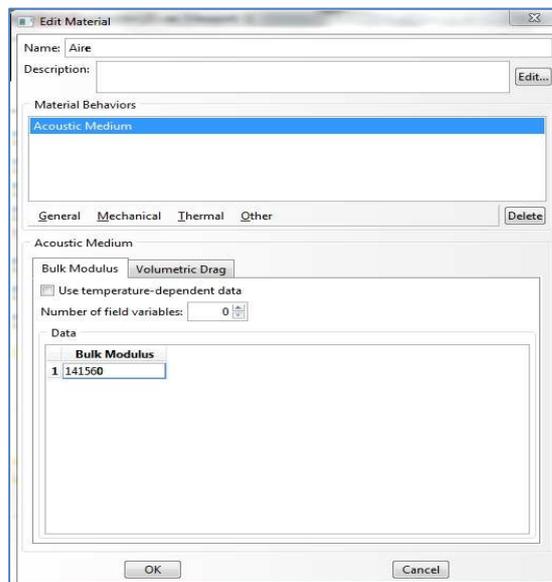
- Se activa la herramienta de módulo .
- Se abre la pestaña *Mechanical* → *Elasticity* → *Elastic*.  
 Para definir el ladrillo, se necesita su densidad y su módulo de Young. Según el CTE-DB-SE-F, apartado 4.6.5.2., el módulo de Young para la fábrica de ladrillo es  $E=1000 \cdot f_k$  y según el apartado 4.6.2. del mismo documento,  $f_k$  depende de la resistencia de las piezas y de la resistencia del mortero,  $f_b$  y  $f_m$ . Para bloques huecos de  $f_b = 15 \text{ N/mm}^2$  y  $f_m = 10 \text{ N/mm}^2$ , la resistencia de la fábrica será  $f_k = 4 \text{ N/mm}^2$ . Por lo tanto, el módulo de Young para la pared de ladrillo hueco será  $E = 4000 \text{ N/mm}^2 = 4 \cdot 10^9 \text{ Pa}$ .
- Se introducen los valores del módulo de Young y del coeficiente de Poisson,  $E = 4 \cdot 10^9 \text{ Pa}$  y  $\nu = 0.25$ , como figura en la imagen inferior.



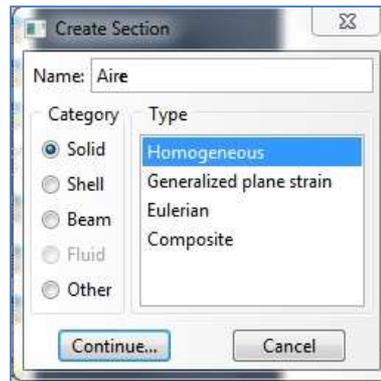
Se abre la pestaña *General* → *Density* y se introduce el valor de la densidad. La densidad que recoge el CTE para el LH doble es de  $930 \text{ kg/m}^3$ .



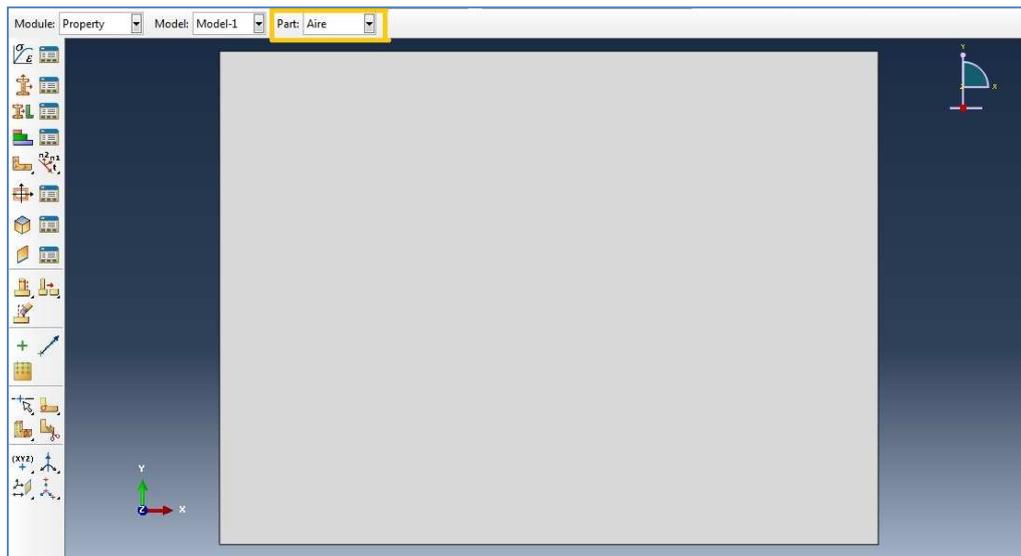
- Se presiona sobre *OK* para crear el material.
- Se hace clic en  para crear el aire. Para definir el aire, se necesita su densidad,  $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$  y su módulo de Bulk, 141560 Pa. Esta segunda propiedad la solicita el programa para definirlo como medio acústico.
- Se abre la pestaña *Other* → *Acoustic Medium* y se introduce el valor del Módulo de Bulk.



- Se abre la pestaña *General* → *Density* y se introduce el valor de la densidad,  $1.225 \text{ kg/m}^3$ .
- Se hace clic en el icono  del menú del módulo. La ventana *Create section* aparece en pantalla.



- Se nombra a la sección como *Aire*.
- Se selecciona *Solid* como *Category* y *Homogeneous* como *Type*.
- Se hace clic en *Continue* para crear la sección *Aire*.
- Se selecciona el material *Aire* en la siguiente ventana y se hace clic en *OK*.
- Se repiten los pasos para la sección de ladrillo.
- Se asignan las secciones a las partes del modelo con la función . En pantalla sólo aparece la última parte creada. Para poder ver las otras dos partes, hay que cambiar la parte en el menú desplegable señalado en amarillo en la imagen inferior.



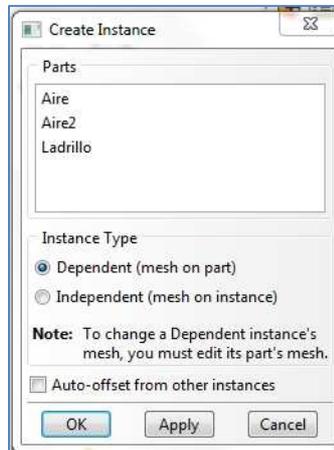
#### 4.6.1.1.3. Ensamblado del modelo

Al contrario que en los ejemplos desarrollados anteriormente, ahora tenemos más de una parte en el modelo y este paso es fundamental para que el programa entienda que están relacionadas entre sí. Ahora se definirán estas relaciones.

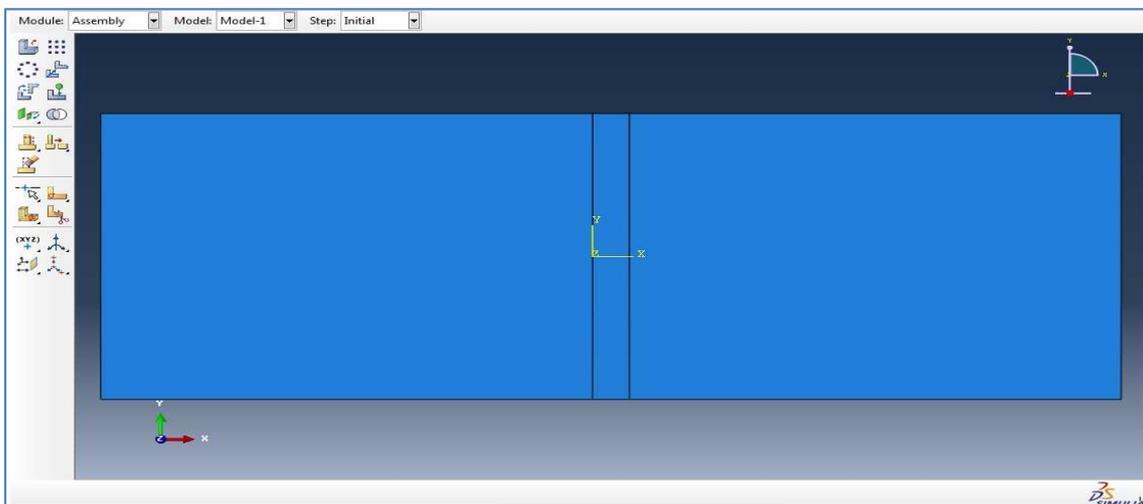
Para ensamblar el modelo se siguen los siguientes pasos:

- Se selecciona el módulo *Assembly* de la lista de módulos.

- Se hace clic en el icono  en el menú propio del módulo. Aparece la ventana *Create Instance*. Ahora, el programa ofrece las tres partes que se han creado. Hay que seleccionarlas una a una, pinchar en *Dependent* y hacer clic en *Apply*.



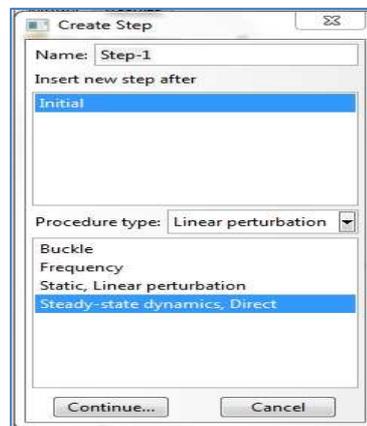
Una vez realizada esta última acción, el programa ofrece una imagen con los tres cuerpos juntos. Aparecen en esta posición por las coordenadas introducidas. Si se hubieran introducido otras, habría que utilizar las herramientas del módulo, como , para situar las partes del modelo en su posición correcta.



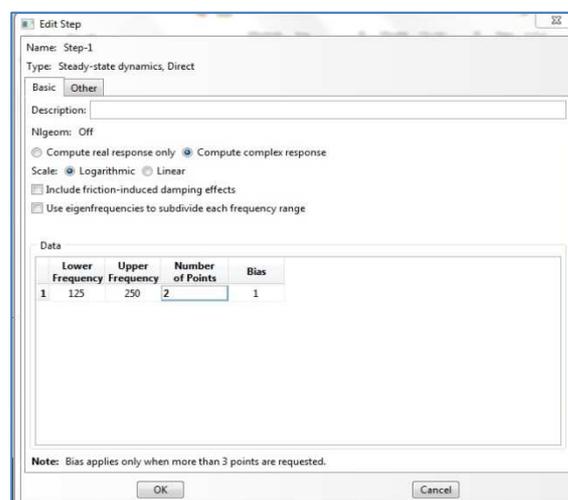
#### 4.6.1.1.4. Configuración del análisis

Una vez creado el modelo, se puede entrar en el módulo *Step* para la configuración del análisis. En esta ocasión, se necesitan dos pasos, como en los casos anteriores, pero el paso que se creará no será un paso estático general. Para crear el nuevo paso:

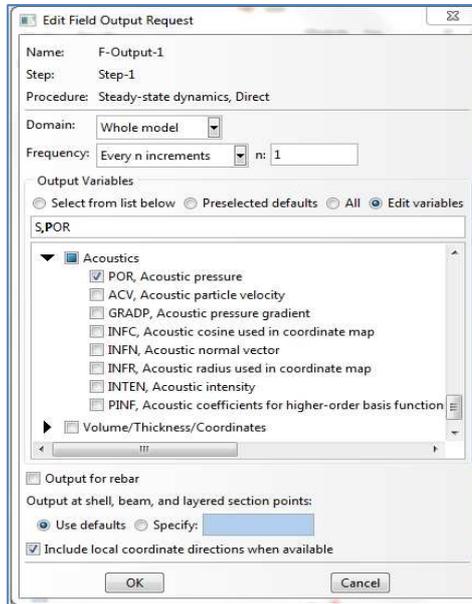
- Se selecciona el módulo *Step* en la lista de módulos.
- En el menú propio del módulo, se hace clic en el icono .
- Aparece la ventana *Create Step*, en la que figura el paso que genera el programa por defecto, *Initial*. Dentro de esta ventana, se acepta el nombre por defecto del nuevo paso (*Step1*) y se selecciona *Linear perturbation* como *Procedure Type* y *Steady-state dynamics, Direct* dentro de los tipos de paso que ofrece. Un paso definido como *Linear perturbation* solo puede tener una respuesta lineal dependiente de las condiciones de partida de ese paso y un paso *Steady-state dynamics, Direct* es el paso usado por *Abaqus* para calcular la respuesta lineal a una excitación armónica, que es lo que representa una onda de presión (sonido).
- Se hace clic en *Continue* para continuar con el análisis.



- Aparece la ventana *Edit Step*, en la que se elige el margen de frecuencias con las que se quiere trabajar, 125-250, el número de puntos que habrá en ese intervalo, 2 (para que nos dé solo los resultados de esas dos frecuencias), y el número de Bias.
- Se selecciona la opción de cálculo *Computer complex response* y *Logarithmic* como *Scale*.



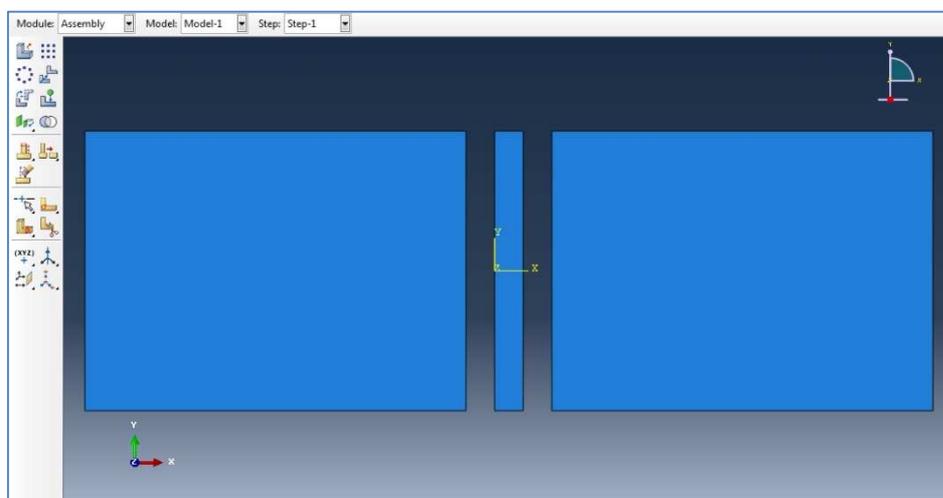
- Se modifican las variables de salida. Solo necesitamos la presión acústica, *POR*. Para ello, sobre el archivo que crea *Abaqus* para la salida de datos, se pincha en el triángulo al lado de *Acoustics* y se selecciona *POR*. En la línea de salida sólo se dejan las variables *S* y *POR*.



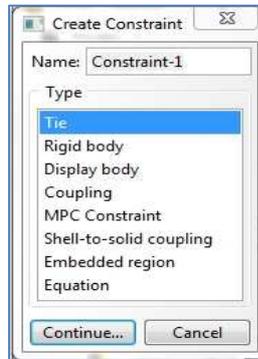
#### 4.6.1.1.5. Interactions

Al estar formado el modelo por varios cuerpos, se hace necesario definir las relaciones e interacciones entre ellos. Para esto, se utiliza el módulo *Interactions*. Los pasos a seguir son:

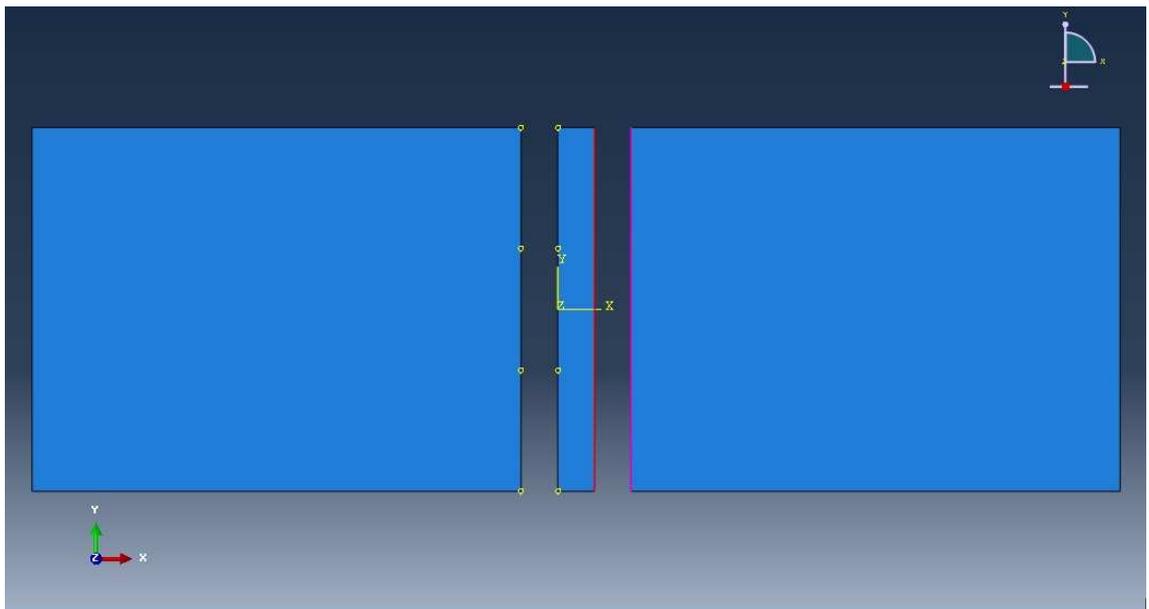
- Se selecciona el módulo *Interactions* de la lista de módulos.
- Se necesita tener los cuerpos separados entre sí para poder definir el contacto. Para ello, se vuelve al módulo *Assembly* y se utiliza la herramienta .



- Una vez separados los cuerpos, se vuelve al módulo *Interactions* y se define el contacto con la herramienta .
- Aparece la ventana *Create Constraint*. Se elige la opción *Tie* y se presiona en *Continue*.

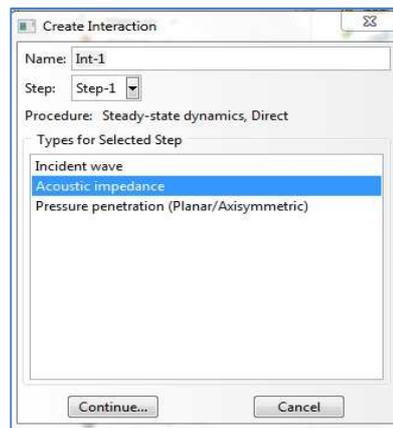


- Se pincha en *Surface* en la línea de comandos y se selecciona la *Master Surface* dentro del contacto, que es la superficie del cuerpo más rígido, en este caso, el ladrillo.
- Se vuelve a seleccionar *Surface* y se escoge la superficie del aire en contacto con el ladrillo como *Slave Surface*.
- Se hace clic en *Done* y aparece una ventana donde marca la *Slave Surface* en rosa y la *Master Surface* en rojo. Se hace clic en *OK* para aceptar la selección y crear el contacto.
- Se repite la misma operación para la otra masa de aire y la cara de ladrillo en contacto con ella.

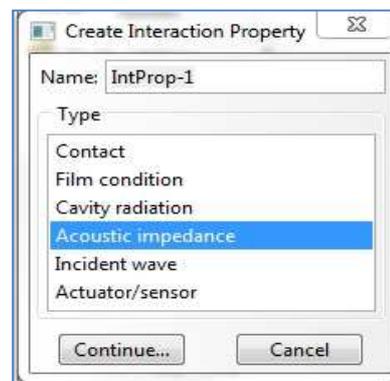


En la imagen superior, se ve de rojo la *Master Surface* y de rosa la *Slave Surface* del segundo contacto que se está creando. A la izquierda, se ven las dos líneas del aire y el ladrillo que marcan en contacto con círculos. Esta es la representación de *Abaqus* de las *Constraint*.

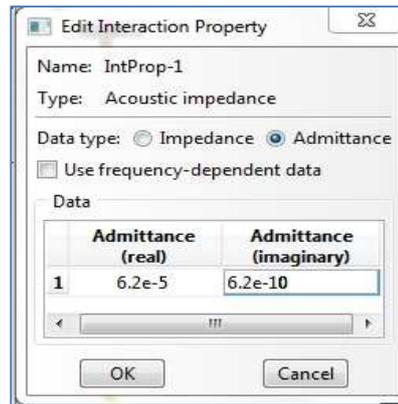
- Se pulsa en  para crear las interacciones entre los cuerpos.
- Aparece la ventana *Create Interaction* y se selecciona *Acoustic Impedance*.



- Se seleccionan las superficies del aire en contacto con el ladrillo y se hace clic en *Done*.
- Se selecciona *Nonreflecting* y se hace clic en *OK*.
- Se pulsa en  para definir las condiciones acústicas. Aparece la ventana *Create Interaction Properties* y se selecciona *Acoustic Impedance* de nuevo.



- En la siguiente pantalla, se selecciona *Admittance* y se introduce el valor de la admitancia del medio,  $6.2e-5$  en la componente real y  $6.2e-10$  en la componente imaginaria.

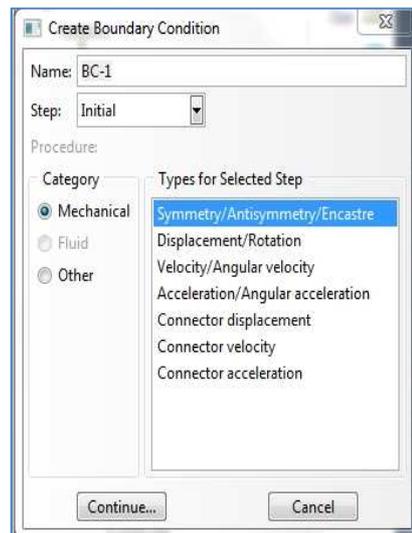


- Se mantienen los cuerpos separados para crear las cargas y las condiciones de contorno. Así se evitan errores al seleccionar los puntos donde se aplican las condiciones. Después, antes de realizar el análisis, se volverán a juntar en el módulo *Assembly*.

#### 4.6.1.1.6. Condiciones de borde

Para aplicar las condiciones de borde, se selecciona el módulo *Load* y se siguen los siguientes pasos:

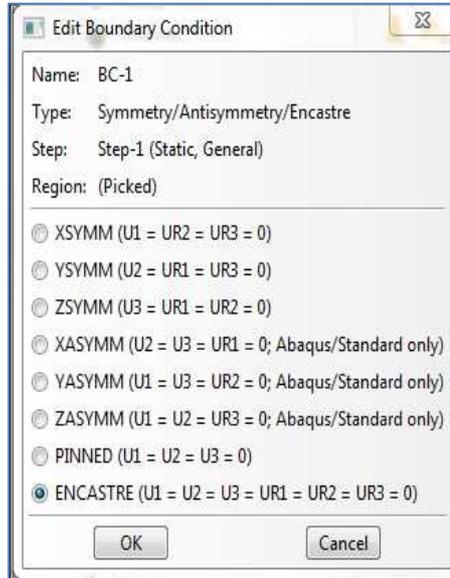
- En el menú del módulo, se utiliza la herramienta . Aparece la ventana *Create Boundary Condition*.



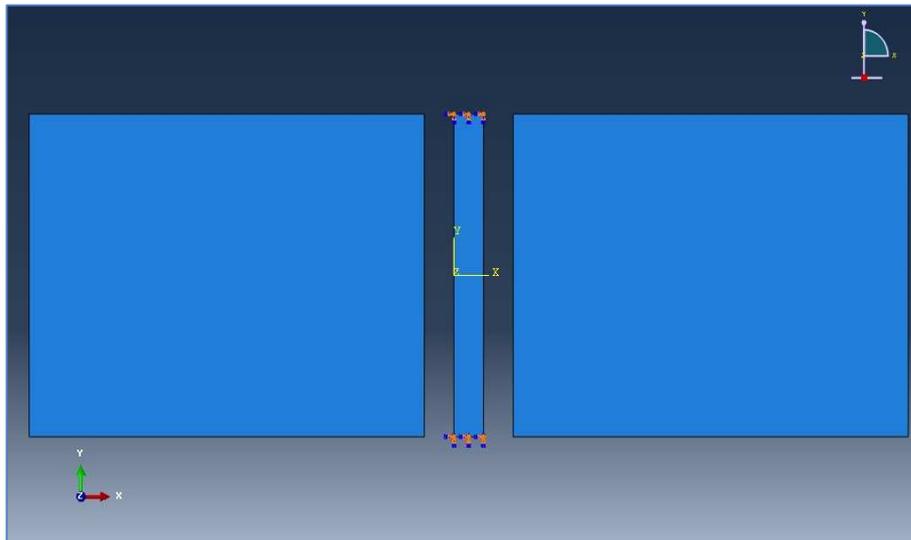
- En la ventana *Create Boundary Condition*:
  - Se selecciona el paso *Initial* como el paso en el que se aplicará la condición de contorno.
  - Se acepta *Mechanical* como la opción válida de la lista *Category*.
  - Se selecciona *Symetry/Antisymetry/Encastre* como el tipo de condición de borde y se hace clic en *Continue*.

*Abaqus* muestra mensajes en el área de avisos para guiar al usuario.

- Se hace clic sobre la línea superior y la línea inferior del cuerpo de ladrillo.
- Se pincha en *Done* en el área de avisos para indicar que se ha acabado la selección. Aparece la ventana *Create Boundary Condition*.



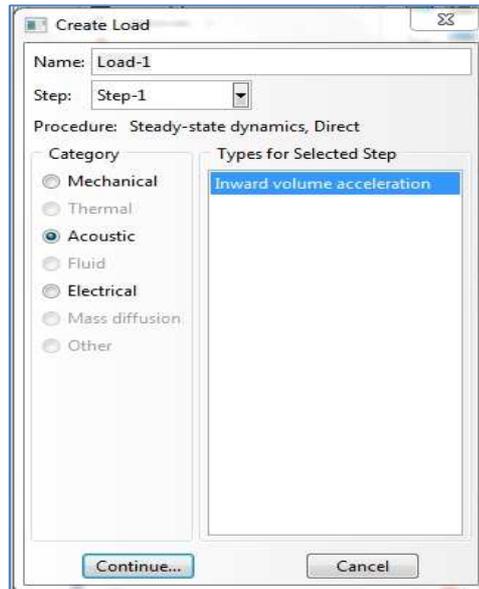
- En esta ventana, se selecciona la opción *ENCASTRE* y se hace clic en *OK* para crear los empotramientos.
- *Abaqus/CAE* crea flechas en los puntos en los que se han aplicado las condiciones de contorno para indicar los grados de libertad impedidos.



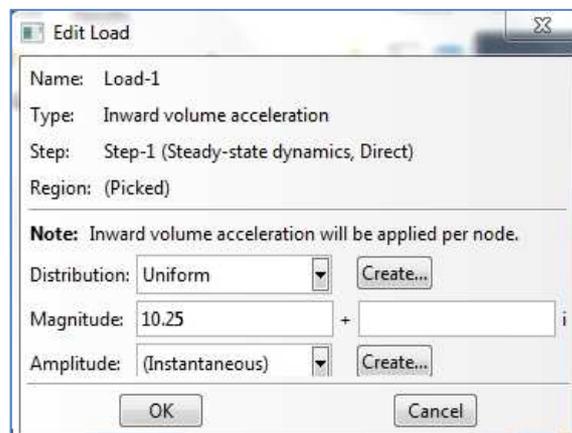
#### 4.6.1.1.7. Cargas de sonido

Los pasos a seguir para crear las cargas de sonido en la masa de aire de la izquierda son:

- Se hace clic en  y aparece la ventana *Create Load*.

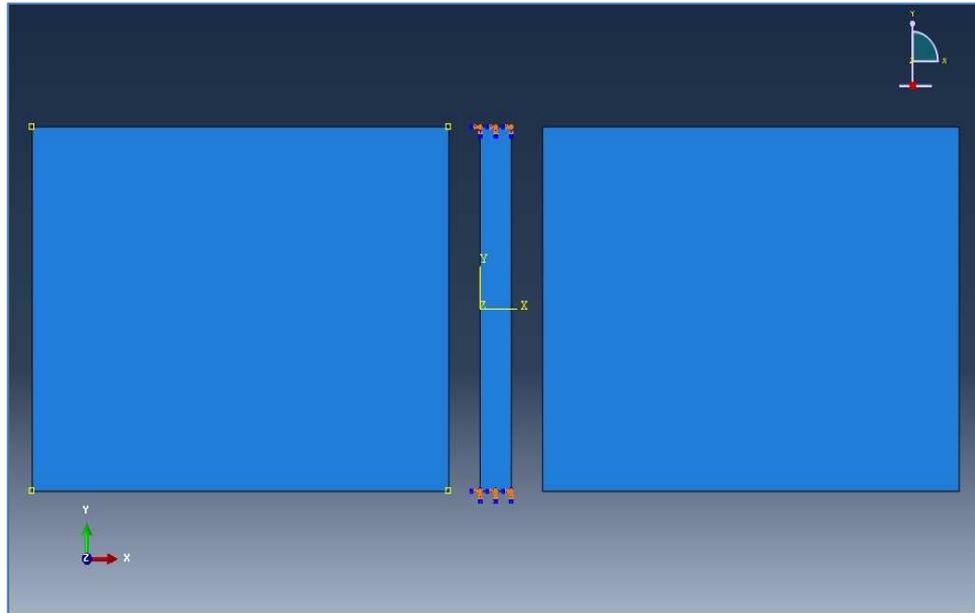


- Dentro de esta ventana, se selecciona *Acoustic* y la opción que aparece dentro de *Types for Selected Step* es *Inward volumen aceleration*.
- Se hace clic en *Continue* y se seleccionan los puntos de las cuatro esquinas de la masa de aire de la izquierda para simular cuatro altavoces en las esquinas de la habitación.
- Se hace clic en *Done* y aparece la ventana *Edit load*.



Dentro de esta ventana, se introduce el valor de  $10.25 \text{ m}^3/\text{s}^2$ . Esta aceleración acústica es equivalente a 91 dB de potencia sonora.

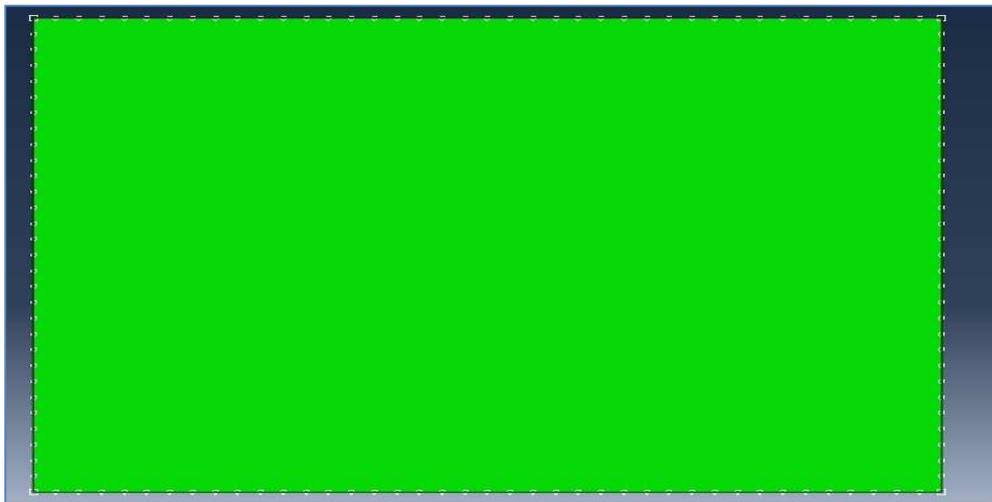
- Se hace clic en *OK* para crear las cargas. *Abaqus* representa estas cargas con cuadrados.



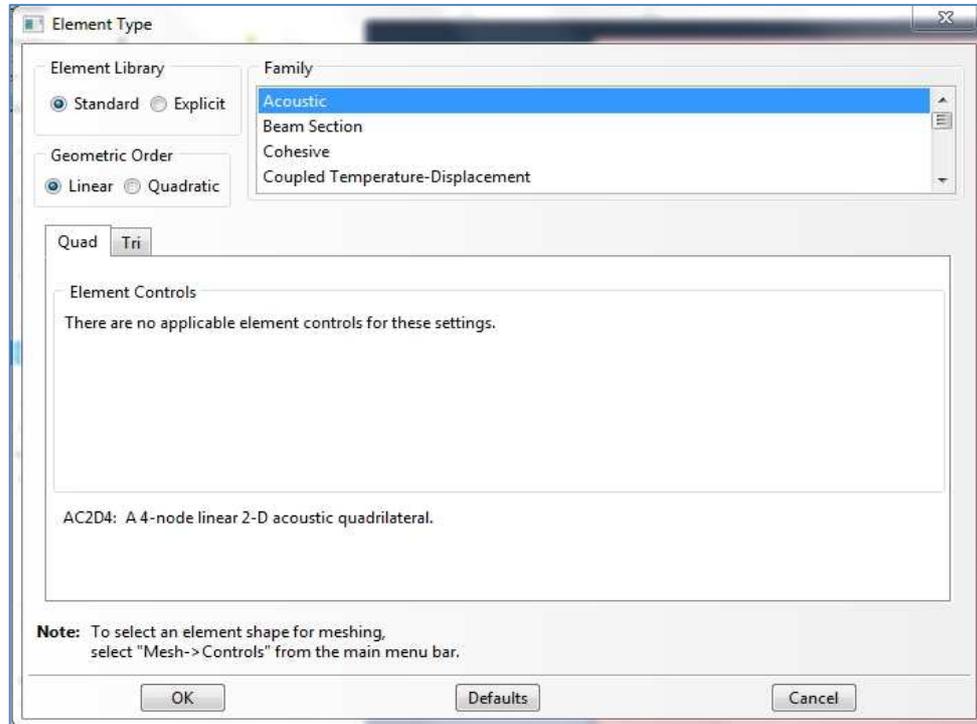
#### 4.6.1.1.8. Mallado del modelo

Para mallar el modelo, se empleará el módulo *Mesh*. Los pasos necesarios para mallar el cuerpo son:

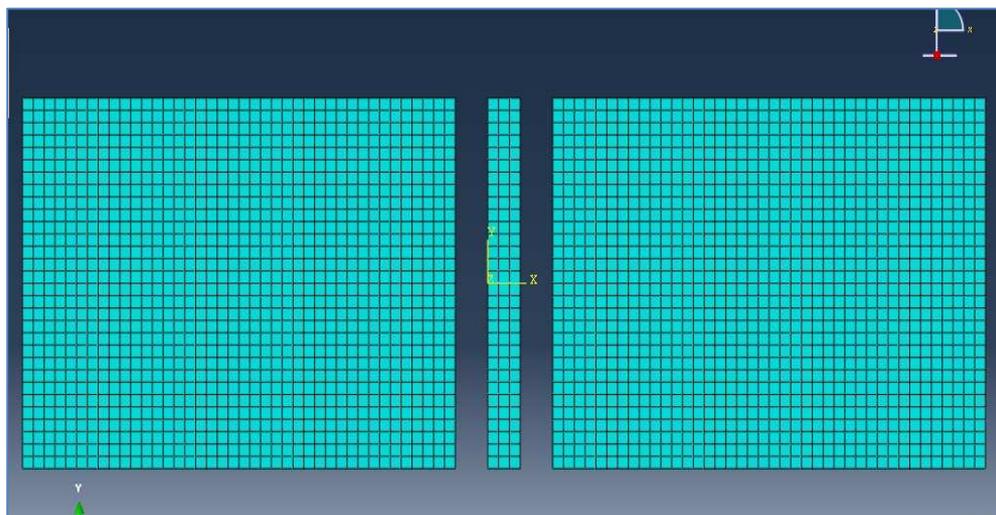
- Se inicia el módulo *Mesh*.
- Se pincha en el icono  y se selecciona *Structured* para las tres partes del modelo.
- Se hace clic en el icono del menú de módulo  y se malla a 0.1. Se hace clic en *OK* y se repite la operación para las tres partes que forman el modelo.



- Se pincha en el icono del menú de módulo  y se selecciona la parte *Aire*.
- Se presiona *Done* y aparece la ventana *Element Type*. Se eligen las opciones que aparecen en la imagen inferior y se pincha en *OK*.



- Se repiten los pasos para la otra masa de aire.
- Para la pared de ladrillo, se selecciona la opción *Plane Stress*.
- Se hace clic en el botón  para mallar el modelo. La imagen que se obtiene después de mallar los tres elementos es:



- Ahora se debe volver al módulo *Assembly* para volver a unir las partes del modelo.

#### 4.6.1.1.9. Creación del trabajo de análisis

Una vez configurado el análisis, se abre el módulo *Job* para crear un trabajo que esté asociado con el modelo y someter ese trabajo a análisis. Para ello:

- Se entra en el módulo *Job* y se pincha en el icono . Aparece la ventana *Create Job* con la lista de los modelos que están disponibles en la base de datos de modelos.
- Se le da un nombre al trabajo y se hace clic en *Continue* para crearlo.
- Aparece la ventana *Edit job*.
  - *Description: Ejemplo de sonido*
  - *Job type: Full analysis*
  - *Run mode: Background*
  - *Submit time: Immediately*
- Se hace clic en *OK* para crear el trabajo.
- Se pincha sobre el icono , junto al icono  para abrir el *Job manager* y se pulsa en *Submit* para comenzar el análisis.
- Una vez concluido con éxito el análisis, se pincha en el botón *Results* de la ventana *Job Manager* para ver los resultados.

#### 4.6.1.1.10. Visualización de los resultados del análisis

Los resultados que ofrece el programa para la presión acústica son los de la imagen inferior. Para los puntos donde se crean las aceleraciones sonoras y para la frecuencia de 250 Hz, la presión acústica es de 13.07 Pa, que corresponde a un color rojizo. En la masa izquierda del aire, donde se genera el ruido, hay puntos donde se alcanzan valores de 18.68 Pa, de color rojo, y de -18.99 Pa, de un color azul oscuro. Esto se debe a que, en esos puntos, se suman las presiones generadas por las fuentes, ya sea en su amplitud positiva o negativa. El que las presiones generadas por las fuentes se sumen o se resten, según la fórmula ya vista para la presión como movimiento armónico simple,

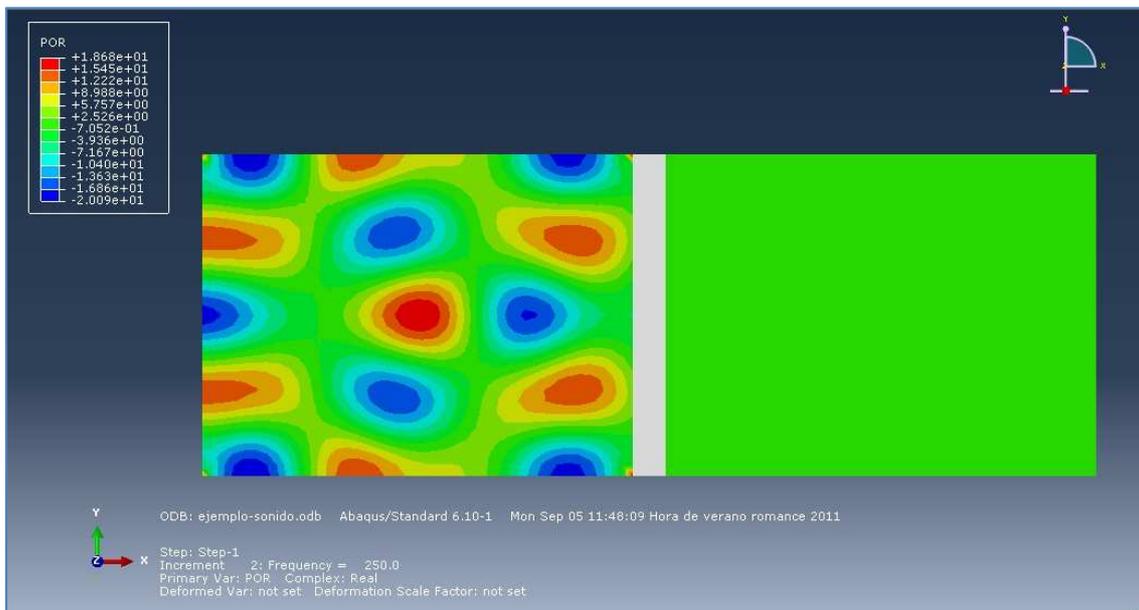
$$P = P_0 \cdot \cos(\omega t + \varphi)$$

depende del tiempo y de la frecuencia. Como la frecuencia es algo constante para cada caso (250 ó 125 Hz), depende del tiempo, que a su vez depende de la velocidad de

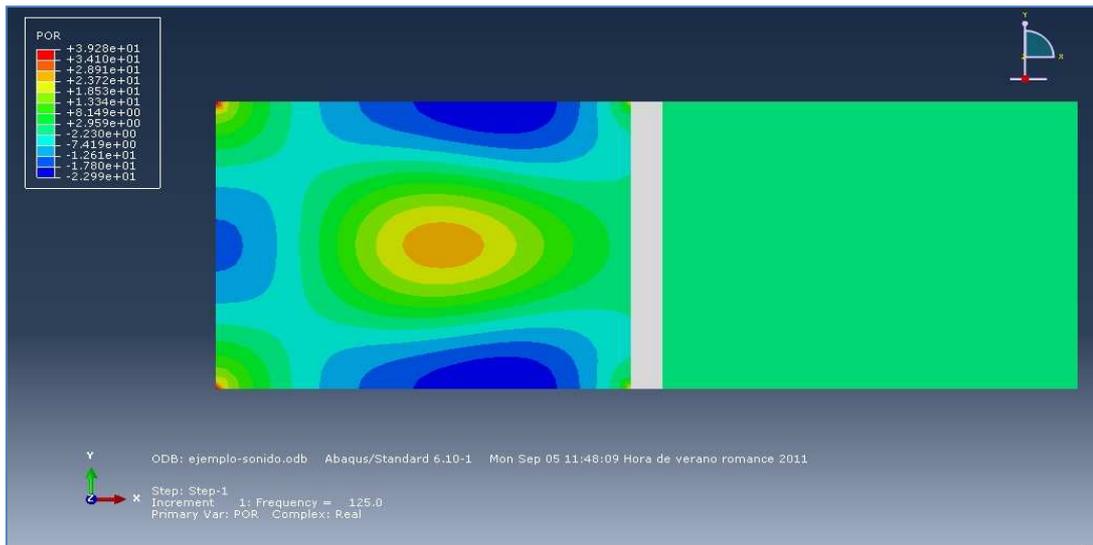
propagación del sonido en el aire, 340m/s, y del espacio entre la fuente y el punto de análisis.

Como se puede ver en la imagen inferior, para la frecuencia de 250 Hz, la masa derecha de aire tiene un color verde claro; por lo tanto, como máximo, en la habitación contigua habrá una presión acústica de 2.526 Pa. Si se toman nodos a 1 m de la pared divisoria, se comprueba que la presión está en torno a  $10^{-3}$  Pa (0.0058049 para el nodo situado en la abscisa 1.3 y ordenada 1.5, por ejemplo), mucho menor que la producida en la habitación donde se generan las cargas de ruido, por lo que la pared de ladrillo está actuando como aislante, ya que nunca se supera ese límite, lo que sí sucede en la habitación donde se genera el ruido.

El hecho de que las presiones sean positivas o negativas solo depende del signo del seno de la fórmula de la presión acústica. Si es un ángulo mayor de  $180^\circ$ , el seno será negativo.



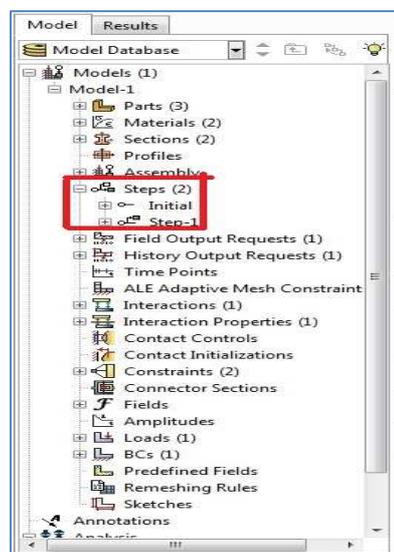
En la siguiente imagen se puede ver la distribución de las presiones acústicas para la frecuencia de 125 Hz:



De nuevo, la pared de ladrillo está actuando como aislante, pues en la masa de aire de la derecha, no se alcanzan valores altos de presión como se alcanzan en la masa de aire de la izquierda. En la masa de aire donde se genera el ruido, se alcanzan presiones de entre 23.72 y 28.91 Pa para el color anaranjado del centro y de entre -17.8 y 22.99 Pa para el color azul oscuro de los laterales, mientras que en la masa de aire de la derecha, solo se alcanza, como máximo, una presión de 2.959 Pa. Se comprueba que en la línea de los puntos de abscisa 1.3, la presión acústica está en torno a  $10^{-3}$  (0.00170324 Pa para el punto de coordenada  $Y= 0.4$  y  $X=1.3$ , por ejemplo); por lo tanto, se está produciendo el aislamiento esperado.

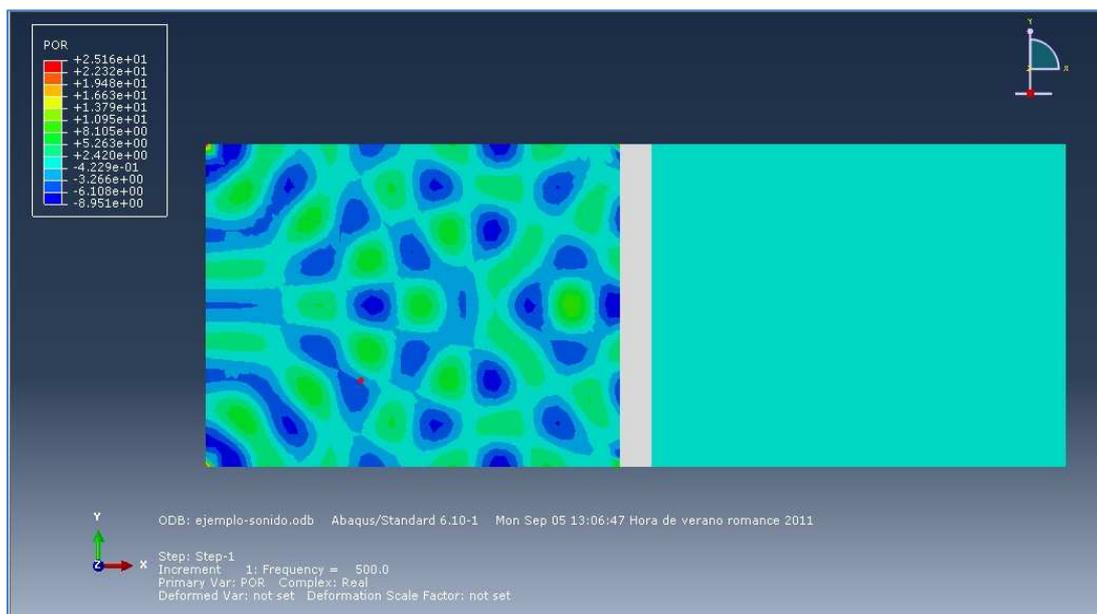
Para obtener los valores de presión acústica para el resto de frecuencias, basta con editar el paso creado:

- Se selecciona en el menú de la izquierda la pestaña *Steps*, resaltado en rojo en la imagen, se pulsa con el botón derecho sobre el *Step-1* y se selecciona *Edit*.

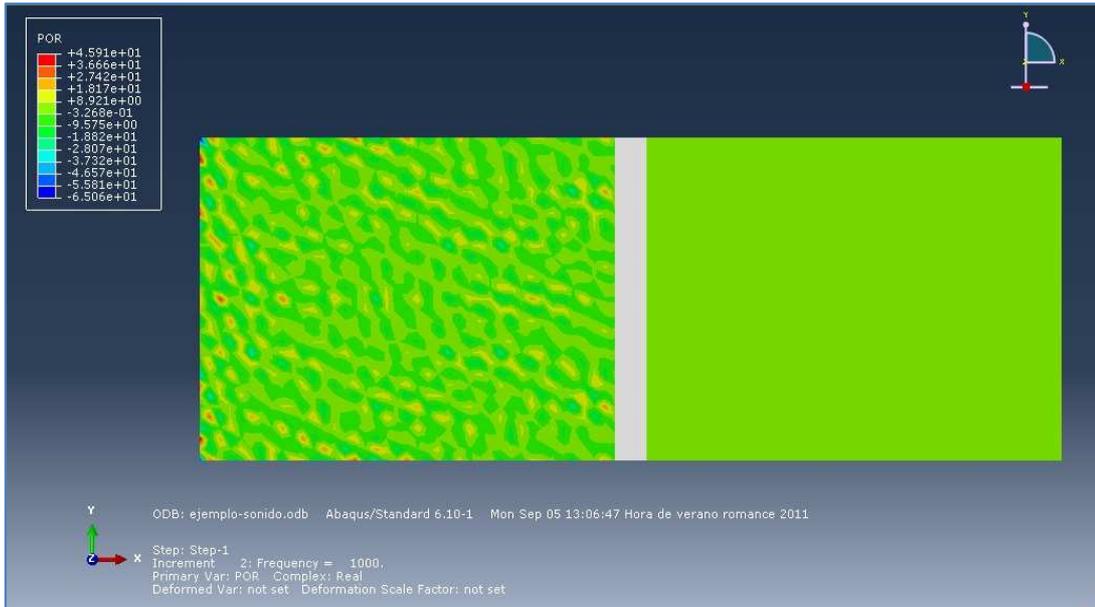


- Aparece la ventana *Edit Step* que apareció en la configuración del paso que se creó. Dentro de ella, se cambia el intervalo de frecuencias a 500-1000 Hz y se hace clic en *OK*.
- Se crea un nuevo trabajo de análisis y se analiza el nuevo modelo.
- Se vuelven a repetir estos pasos para las frecuencias de 1500-2000 Hz.

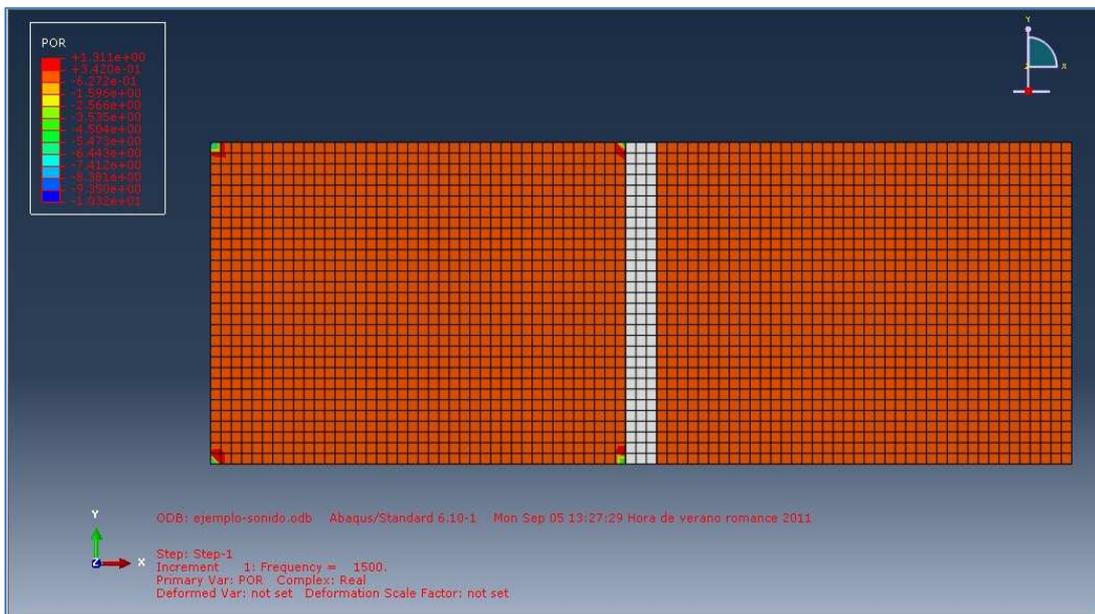
Los resultados obtenidos para las frecuencias de 500, 1000, 1500 y 2000 Hz son los representados en las imágenes inferiores:



Para la frecuencia de 500 Hz, se obtienen unos valores máximos en la masa de aire de la izquierda de 25.16 Pa para el color rojo, solo presente en los puntos donde se generan las cargas acústicas, y de -8.951 Pa para las masas de color azul oscuro. Sin embargo, en la masa de aire de la derecha, el valor máximo de la presión, según el color turquesa, será de 2.42 Pa. Se comprueba que en los puntos de la línea de abscisa 1.3, el valor de la presión está en torno a  $10^{-3}$  Pa (0.00121771 Pa para el punto de ordenada 0.6, por ejemplo).



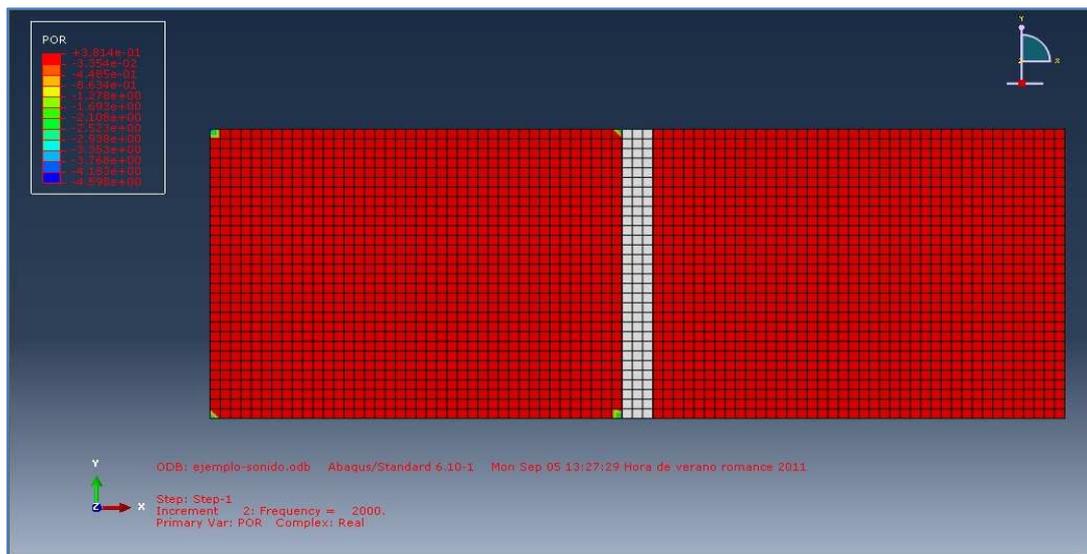
Para la frecuencia de 1000 Hz, se repite el patrón. En algunos puntos de la masa de aire de la izquierda, se alcanzan los valores más altos de presión de -65.06 Pa (color azul oscuro) y 45.91 Pa (color rojo), mientras que en la masa de la derecha, de color verde brillante, no se supera nunca la presión de 8.921 Pa, de hecho, en la línea de abscisa 1.3, el valor de la presión ronda el  $10^{-3}$  (-0.00450034 para el punto de coordenadas X=1.3 e Y=0.5, por ejemplo).



Para la frecuencia de 1500 Hz, se observa que el aislamiento es menor, ya que el color de la masa de aire de la izquierda (fuera de los puntos de creación de las cargas) y de la masa de la derecha es el mismo.

Sin embargo, si se obtiene el valor de nodos aleatorios a un lado y al otro del muro, se puede ver que las presiones son tan pequeñas, del orden de  $10^{-18}$  Pa, que no

producirían sonido alguno, ya que la mínima variación de la presión que puede detectar el ser humano es de  $2 \cdot 10^{-5}$  Pa. El valor de la presión en la masa de la derecha a 1 m de la pared es de  $10^{-13}$  Pa ( $-1.83569e-13$  Pa para el punto de ordenada 0.6, por ejemplo), mientras que a la izquierda del muro, también a 1 m de la pared divisoria, es de  $10^{-8}$  Pa ( $-2.69385e-8$  Pa para el punto de ordenada 1.4, por ejemplo). Por lo tanto, sí se está produciendo un aislamiento importante. Este desfase entre la leyenda y el valor de los nodos se debe a que *Abaqus* no ofrece un abanico cromático lo suficientemente ancho para cubrir todas las tensiones que se producen. De ahí, que haya que comprobar el valor de los nodos de forma puntual.

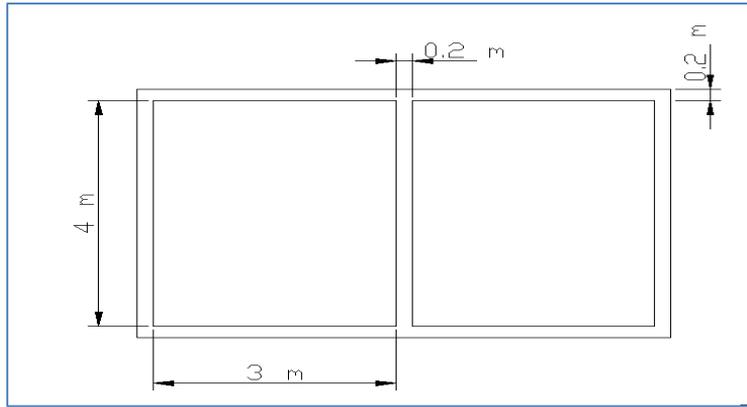


Para la frecuencia de 2000 Hz se obtienen los mismos resultados. El aislamiento parece inexistente, pues la masa izquierda y la derecha de aire comparten color. Pero, en realidad, si se obtienen los valores para los nodos a una distancia de 1 m, a un lado y otro de la pared, se ve que la presión para la masa de aire de la izquierda está en torno a  $10^{-12}$  Pa ( $-5.65195e-12$  Pa para el punto de ordenada 1.2, por ejemplo) y para la masa de la derecha ronda los  $10^{-15}$  Pa ( $-1.60308e-15$  Pa para el punto de ordenada 1.1, por ejemplo).

Por lo tanto, con este ejercicio se comprueba que la pared de ladrillo actúa como aislante. En los ejercicios posteriores, se irá haciendo más complejo el modelo, hasta llegar a un bar y una vivienda en 3D, y el análisis del aislamiento será más profundo.

#### 4.6.1.2. Ejercicios previos en 3D

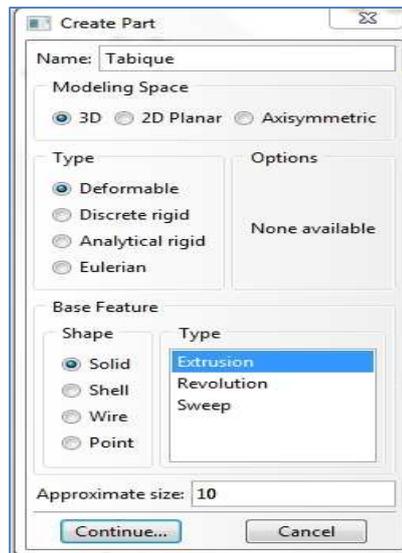
El siguiente ejercicio que se ha realizado es un modelo en 3D de dos habitaciones de  $4 \times 3 \times 3$  m<sup>3</sup> cada una, con un tabique de separación de 0.2 m de espesor.



#### 4.6.1.2.1. Creación de una parte

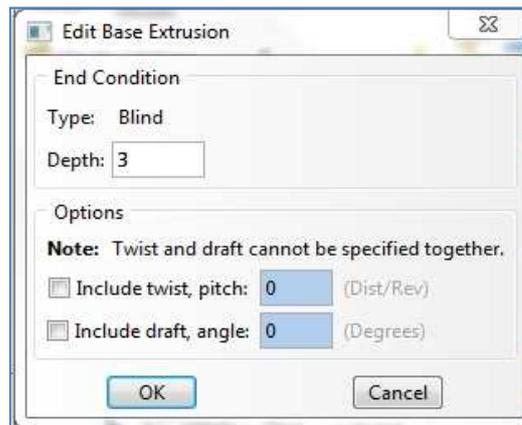
Se inicia el programa *Abaqus/CAE*. Se dibuja la geometría con el módulo *Part*:

- Se hace clic en el icono  del menú del módulo.
- Aparece la ventana *Create part*.
  - *Name: Tabique*
  - *Modeling Space: 3D*
  - *Type: Deformable*
  - *Base Feature, Shape: Solid*
  - *Base Feature, Type: Extrusion*
  - *Approximate Size: 10*

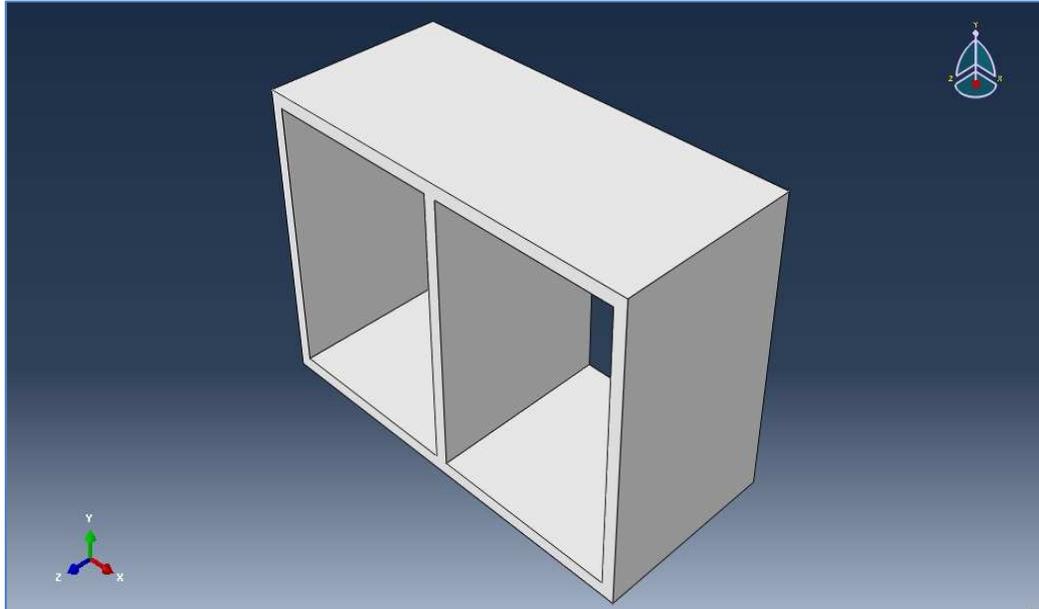


- Se hace clic en *OK* para abrir el *Sketcher*.
- Se hace clic sobre el icono  y se introducen las siguientes coordenadas para crear el tabique:

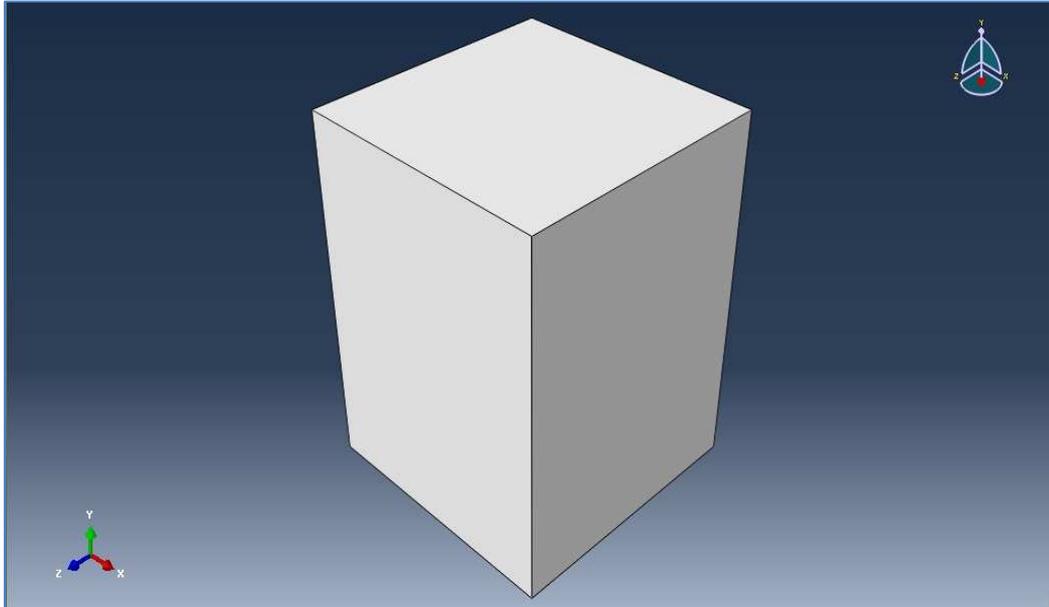
- (-3.3, 2.2)
- (3.3, 2.2)
- (3.3, -2.2)
- (-3.3, -2.2)
- Se hace clic con el botón derecho y se elige *Cancel Procedure* para dibujar el polígono que marca el borde exterior del conjunto de habitaciones.
- Ahora se dibujan las habitaciones dentro de este primer polígono. Se activa la herramienta para dibujar rectángulos y se introducen las siguientes coordenadas:
  - (-3.1, 2)
  - (-0.1, -2)
  - (0.1, 2)
  - (3.1, -2)
- Se hace clic en el icono  para desactivar la herramienta y en *Done* para salir del *Sketcher*.
- Aparece la ventana *Edit Base Extrusion*. Se introduce el valor 3 como altura del modelo y se hace clic en *OK*.



- El programa muestra una visual de cuerpo creado.



- Se hace clic en  para crear los volúmenes de aire dentro de las habitaciones.
- Aparece la ventana *Create part*.
  - *Name: Aire1*
  - *Modeling Space: 3D*
  - *Type: Deformable*
  - *Base Feature, Shape: Solid*
  - *Base Feature, Type: Extrusion*
  - *Approximate Size: 10*
- Se hace clic en la herramienta del Sketcher  y se introducen las coordenadas:
  - (-3.1, 2)
  - (-0.1, -2)
- Se hace clic en *Done* y se mete el valor de 3 m para la altura del modelo en la ventana *Edit Base Extrusion*.
- *Abaqus* muestra una visual del modelo.

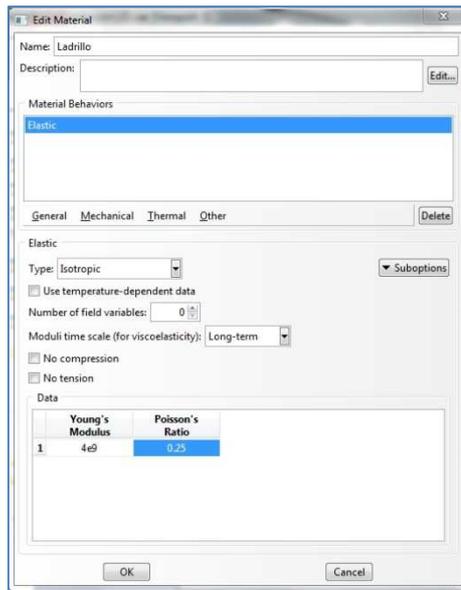


- Se vuelve a hacer clic en  y se repiten los pasos para el segundo bloque de aire, que se llamará *Aire2*. Las coordenadas en este caso serán:
  - (0.1, 2)
  - (3.1, -2)
- Se pincha en *Done*, se introduce el valor de 3 m para la altura y el programa nos muestra la misma imagen que nos mostró para *Aire1*.

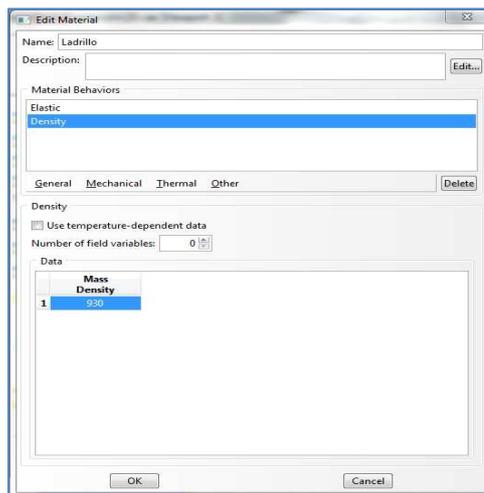
#### 4.6.1.2.2. Creación del material

El siguiente paso en el análisis es crear los materiales. Para definir los materiales del ejercicio se debe utilizar el módulo *Property*. Una vez dentro del módulo, los pasos a seguir son los siguientes:

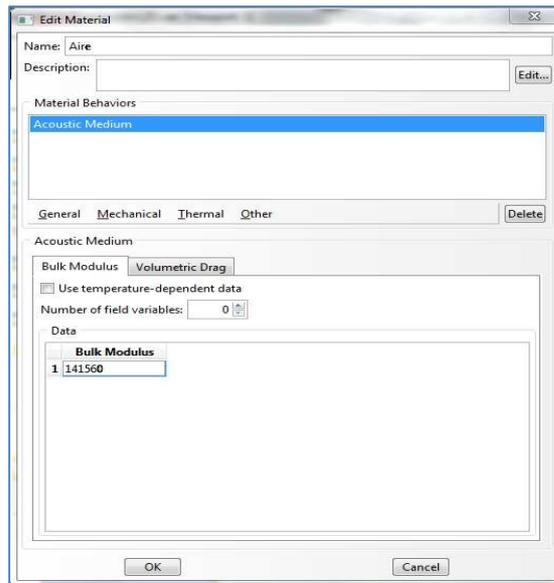
- Se activa la herramienta de módulo .
- Se abre la pestaña *Mechanical* → *Elasticity* → *Elastic*.  
Para definir el ladrillo, se necesita su densidad y su módulo de Young. Se introducen los valores utilizados para el ejercicio en 2D,  $E = 4e9$  Pa y  $\nu = 0.25$ , como figura en la imagen inferior.



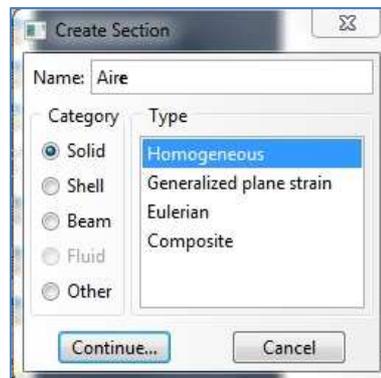
- Se abre la pestaña *General* → *Density* y se introduce el valor de la densidad,  $\rho = 930 \text{ kg/m}^3$ .



- Se presiona sobre *OK* para crear el material.
- Se hace clic en  para crear el aire. Para definir el aire, se necesita su densidad,  $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$  y su módulo de Bulk, 141560 Pa.
- Se abre la pestaña *Other* → *Acoustic Medium* y se introduce el valor del Módulo de Bulk.



- Se abre la pestaña *General* → *Density* y se introduce el valor de la densidad,  $1.225 \text{ kg/m}^3$ .
- Se hace clic en el icono  del menú del módulo. La ventana *Create section* aparece en pantalla.



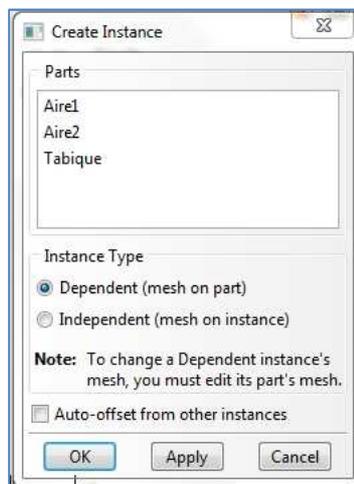
- Se nombra a la sección como *Aire*.
- Se selecciona *Solid* como *Category* y *Homogeneous* como *Type*.
- Se hace clic en *Continue* para crear la sección *Aire*.
- Se selecciona el material *Aire* en la siguiente ventana y se hace clic en *OK*.
- Se repiten los pasos para la sección de ladrillo.
- Se asignan las secciones a las partes del modelo con la función .

#### 4.6.1.2.3. Ensamblado del modelo

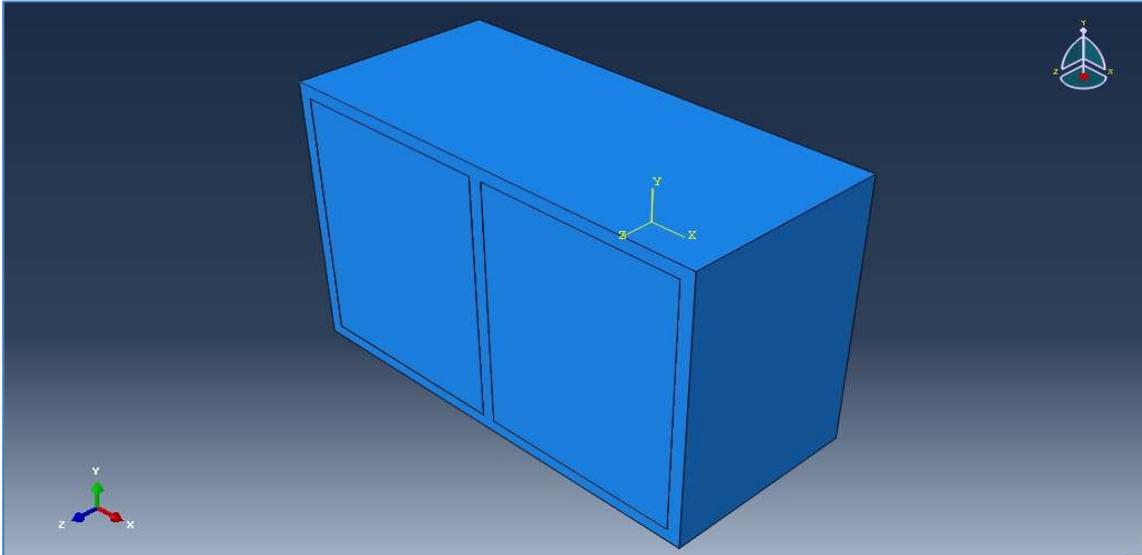
De nuevo, se tiene más de una parte en el modelo y este paso es fundamental para que el programa entienda que están relacionadas entre sí.

Para ensamblar el modelo se siguen los siguientes pasos:

- Se selecciona el módulo *Assembly* de la lista de módulos.
- Se hace clic en el icono  en el menú propio del módulo. Aparece la ventana *Create Instance*. Ahora, el programa ofrece las tres partes que se han creado. Hay que seleccionarlas una a una, pinchar en *Dependent* y hacer clic en *Apply*.



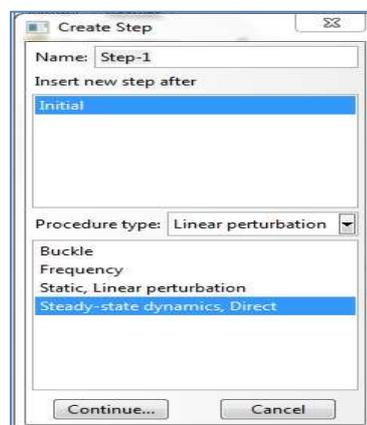
Una vez realizada esta última acción, el programa ofrece una imagen con los tres cuerpos juntos. Aparecen en esta posición por las coordenadas introducidas. Si se hubieran introducido otras, habría que utilizar las herramientas del módulo, como , para situar las partes del modelo en su posición correcta.



#### 4.6.1.2.4. Configuración del análisis

Una vez creado el modelo, se puede entrar en el módulo *Step* para la configuración del análisis. Para crear el nuevo paso:

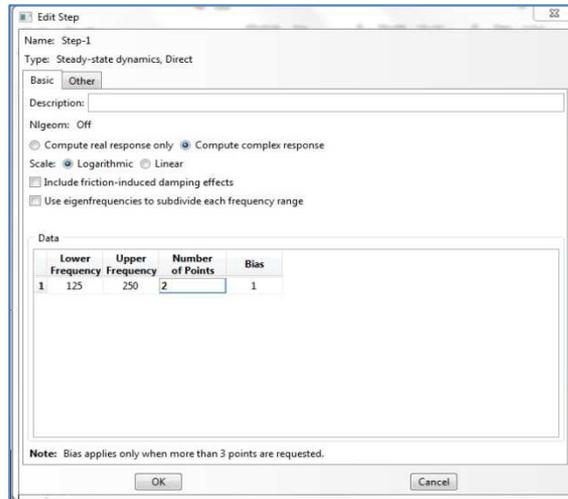
- Se selecciona el módulo *Step* en la lista de módulos.
- En el menú propio del módulo, se hace clic en el icono .
- Aparece la ventana *Create Step*, en la que figura el paso que genera el programa por defecto, *Initial*. Dentro de esta ventana, se acepta el nombre por defecto del nuevo paso (*Step1*) y se selecciona *Linear perturbation* como *Procedure Type* y *Steady-state dynamics, Direct* dentro de los tipos de paso que ofrece.
- Se hace clic en *Continue* para continuar con el análisis.



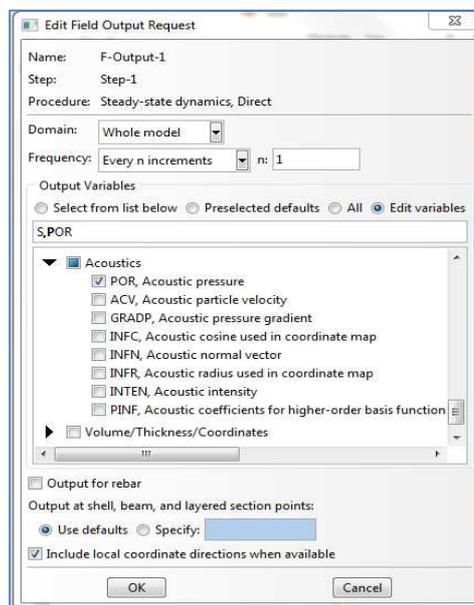
- Aparece la ventana *Edit Step*, en la que se elige el margen de frecuencias con las que se quiere trabajar, 125-250, el número de puntos que habrá en ese

intervalo, 2 (para que dé solo los resultados de esas dos frecuencias), y el número de Bias.

- Se selecciona la opción de cálculo *Computer complex response* y *Logarithmic* como *Scale*.



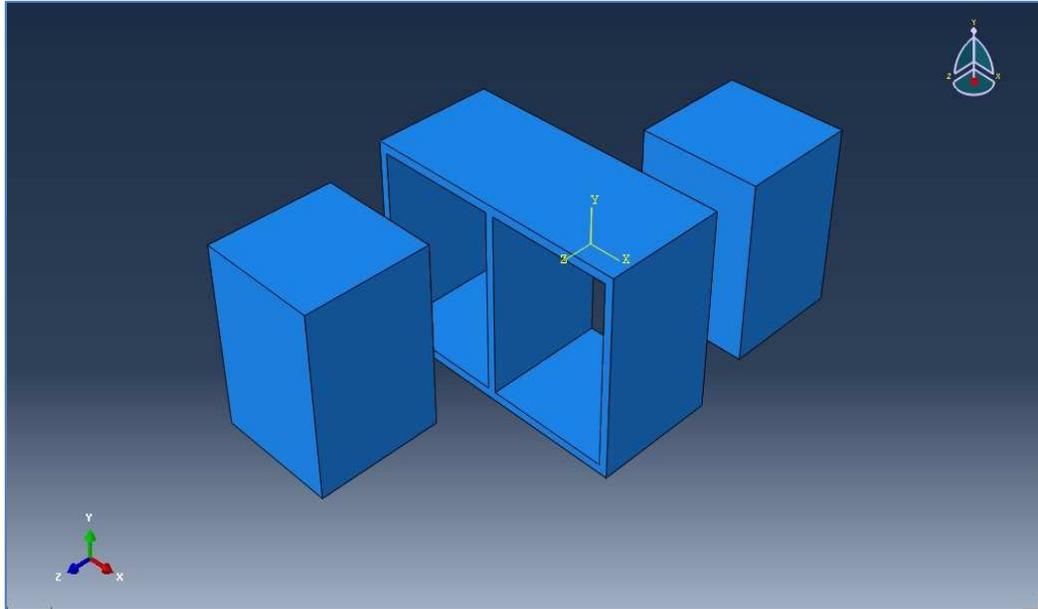
- Se modifican las variables de salida. Solo necesitamos la presión acústica, *POR*. Para ello, sobre el archivo que crea *Abaqus* para la salida de datos, se pincha en el triángulo al lado de *Acoustics* y se selecciona *POR*. En la línea de salida sólo se dejan las variables *S* y *POR*.



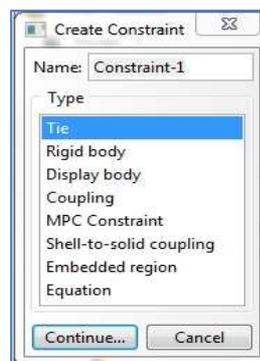
#### 4.6.1.2.5. Interactions

Al estar formado el modelo por varios cuerpos, se hace necesario definir las relaciones e interacciones entre ellos. Para esto, se utiliza el módulo *Interactions*. Los pasos a seguir son:

- Se selecciona el módulo *Interactions* de la lista de módulos.
- Se necesita tener los cuerpos separados entre sí para poder definir el contacto. Para ello, se vuelve al módulo *Assembly* y se utiliza la herramienta .

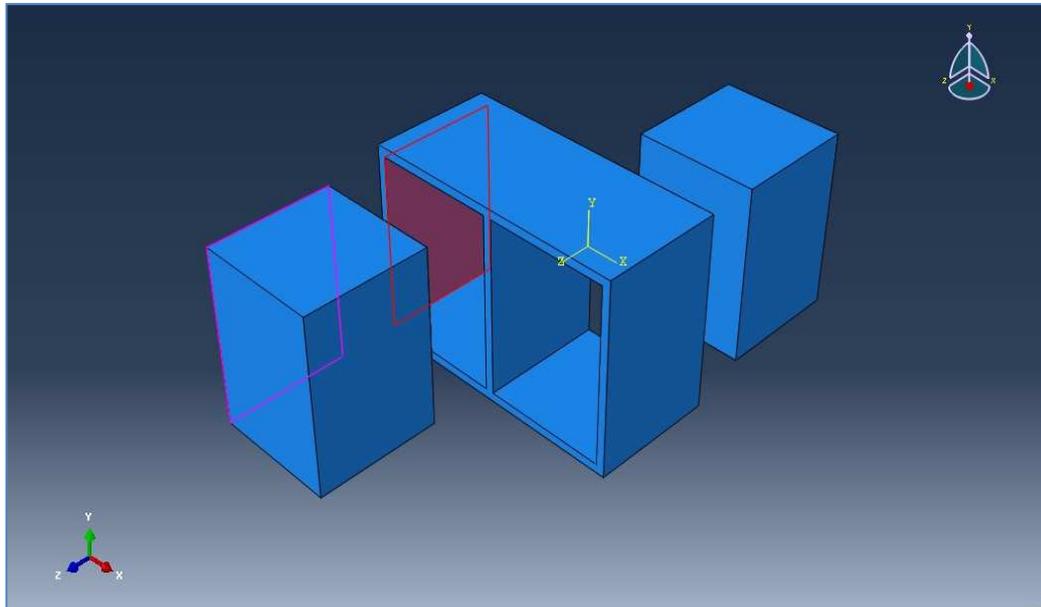


- Una vez separados los cuerpos, se vuelve al módulo *Interactions* y se define el contacto con la herramienta .
- Aparece la ventana *Create Constraint*. Se elige la opción *Tie* y se presiona en *Continue*.

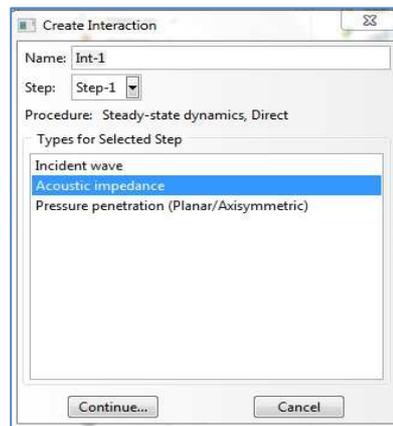


- Se pincha en *Surface* en la línea de comandos y se selecciona la *Master Surface* dentro del contacto, que es la superficie del cuerpo más rígido, en este caso, el tabique. Si no selecciona la superficie deseada, basta con activar la herramienta del menú de *Abaqus*  y permitirá seleccionar otra superficie oculta con los botones de la línea de comandos *Next* y *Previous*.
- Se hace clic en *Done* cuando esté seleccionada.
- Se vuelve a seleccionar *Surface* y se escoge la superficie del aire en contacto con el ladrillo como *Slave Surface*. Se hace clic en *Done* y aparece una ventana

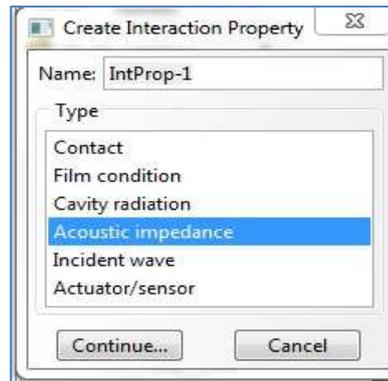
donde marca la *Slave Surface* en rosa y la *Master Surface* en rojo. Se hace clic en *OK* para aceptar la selección y crear el contacto.



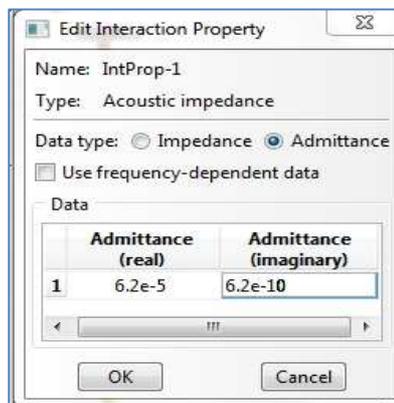
- Se repite la misma operación para todas las caras de los volúmenes de aire en contacto con el tabique.
- Se pulsa en  para crear las interacciones entre los cuerpos.
- Aparece la ventana *Create Interaction* y se selecciona *Acoustic Impedance*.



- Se seleccionan las superficies del aire en contacto con el ladrillo y se hace clic en *Done*.
- Se selecciona *Nonreflecting* y se hace clic en *OK*.
- Se pulsa en  para definir las condiciones acústicas. Aparece la ventana *Create Interaction Properties* y se selecciona *Acoustic Impedance* de nuevo.



- En la siguiente pantalla, se selecciona *Admittance* y se introduce el valor de la admitancia del medio,  $6.2e-5$  en la componente real y  $6.2e-10$  en la componente imaginaria.

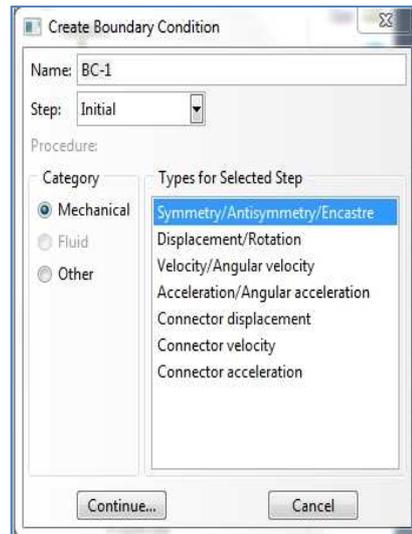


- Se mantienen los cuerpos separados para crear las cargas y las condiciones de contorno. Así se evitan errores al seleccionar los puntos donde se aplican las condiciones. Después, antes de realizar el análisis, se volverán a juntar en el módulo *Assembly*.

#### 4.6.1.2.6. Condiciones de borde

Para aplicar las condiciones de borde, se selecciona el módulo *Load* y se siguen estos pasos:

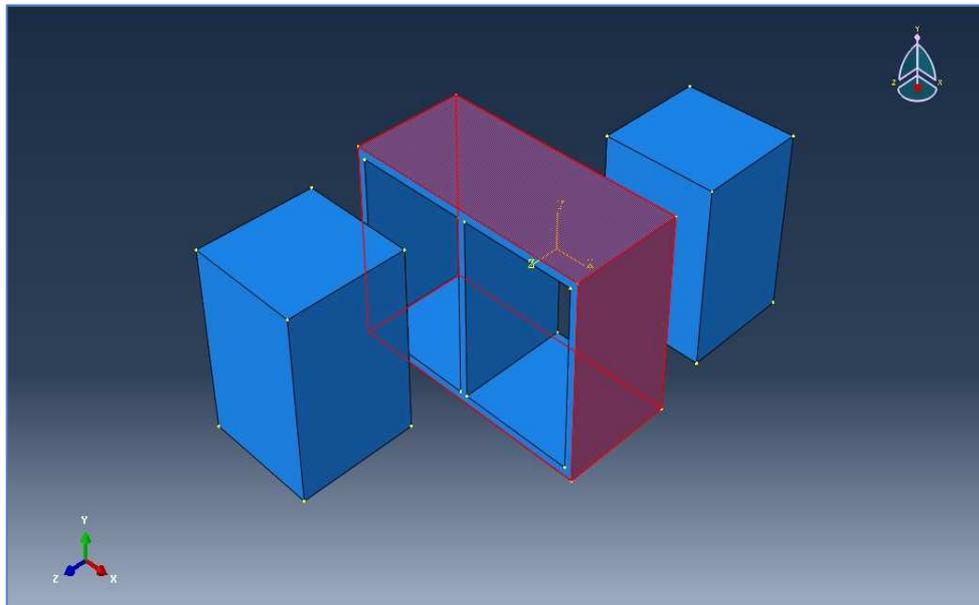
- En el menú del módulo, se utiliza la herramienta . Aparece la ventana *Create Boundary Condition*.



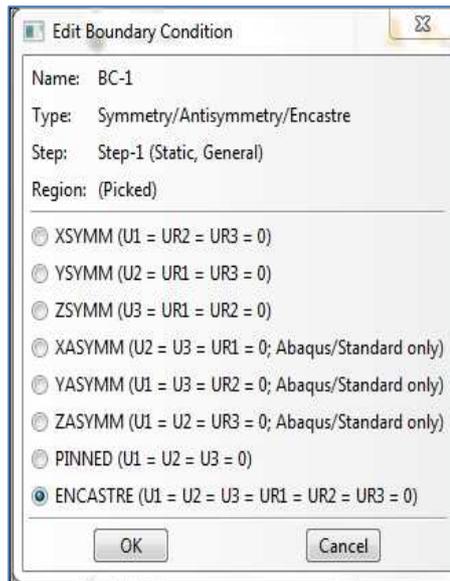
- En la ventana *Create Boundary Condition*:
  - Se selecciona el paso *Initial* como el paso en el que se aplicará la condición de contorno.
  - Se acepta *Mechanical* como la opción válida de la lista *Category*.
  - Se selecciona *Symetry/Antisymetry/Encastre* como el tipo de condición de borde y se hace clic en *Continue*.

*Abaqus* muestra mensajes en el área de avisos para guiar al usuario.

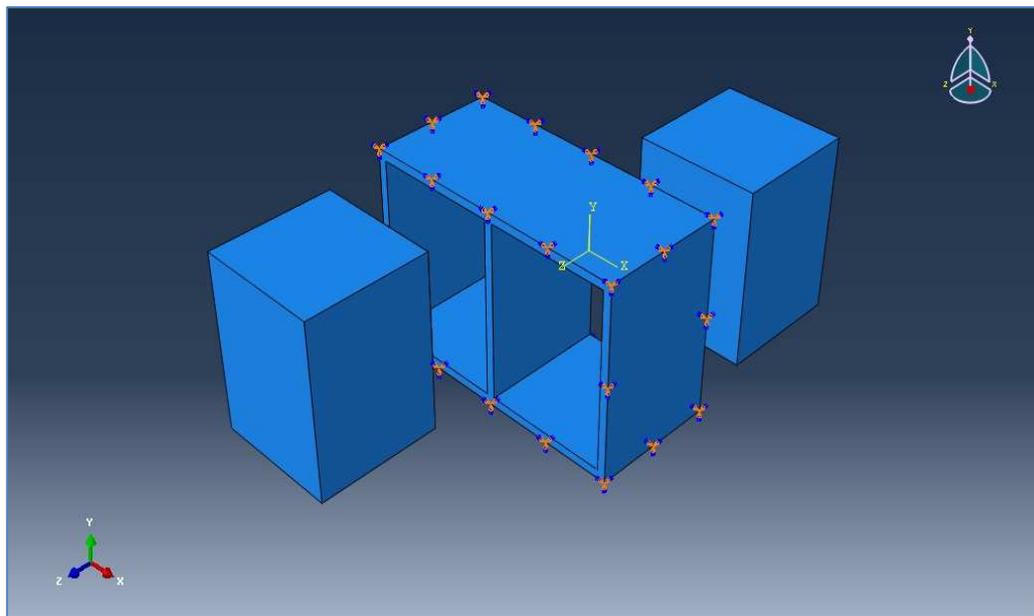
- Se seleccionan las cuatro superficies exteriores de los tabiques que conforman las habitaciones.



- Se pincha en *Done* en el área de avisos para indicar que se ha acabado la selección. Aparece la ventana *Create Boundary Condition*.



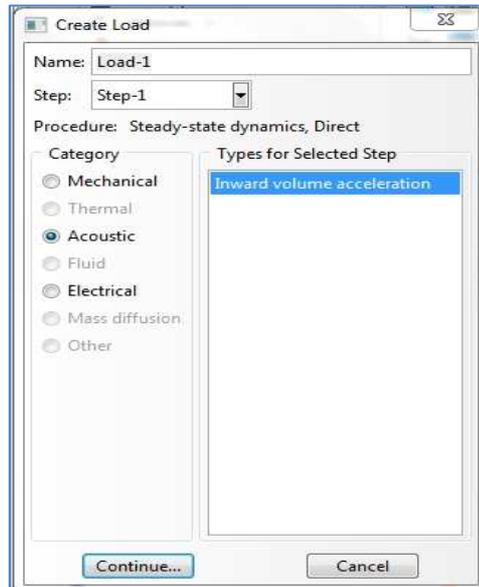
- En esta ventana, se selecciona la opción *ENCASTRE* y se hace clic en *OK* para crear los empotramientos.
- *Abaqus/CAE* crea flechas en los puntos en los que se han aplicado las condiciones de contorno para indicar los grados de libertad impedidos.



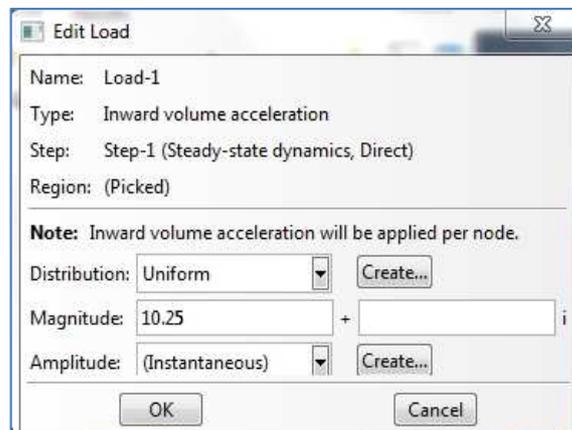
#### 4.6.1.2.7. Cargas de sonido

Los pasos a seguir para crear las cargas de sonido en la masa de aire de la izquierda son:

- Se hace clic en  y aparece la ventana *Create Load*.

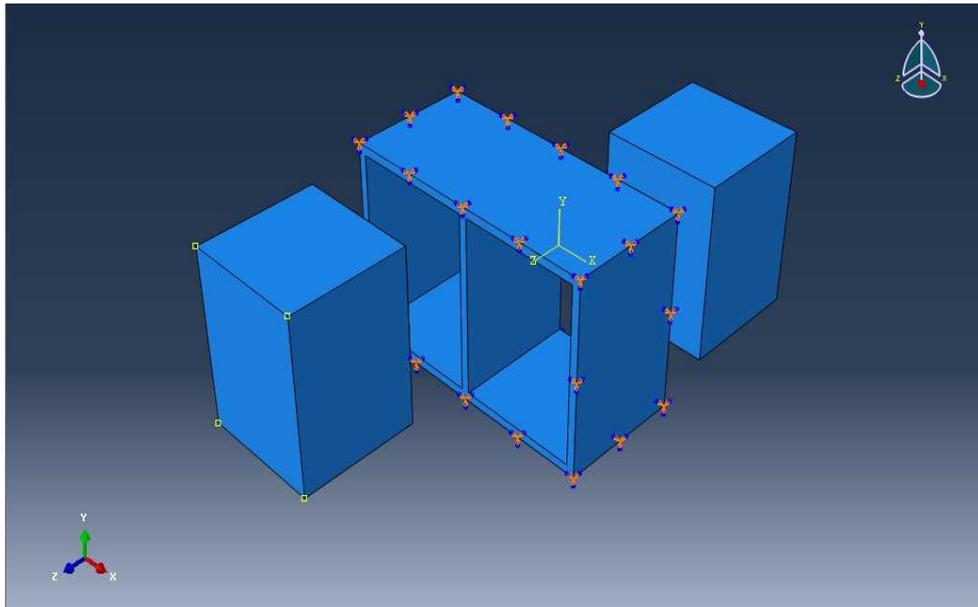


- Dentro de esta ventana, se selecciona *Acoustic* e *Inward volumen aceleration*.
- Se hace clic en *Continue* y se seleccionan los puntos de las cuatro esquinas de la masa de aire de la izquierda para simular cuatro altavoces en las esquinas del techo de la habitación.
- Se hace clic en *Done* y aparece la ventana *Edit load*.



Dentro de esta ventana, se introduce el valor de  $10.25 \text{ m}^3/\text{s}^2$ , ya utilizado en el ejercicio en 2D.

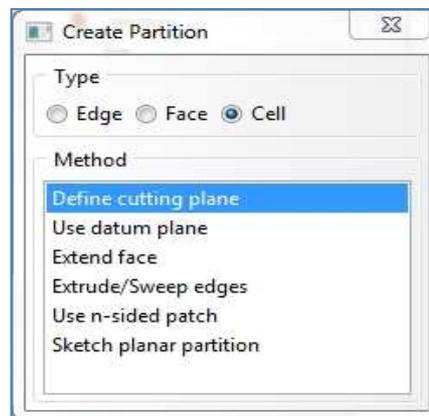
- Se hace clic en *OK* para crear las cargas. *Abaqus* representa estas cargas como cuadraditos.



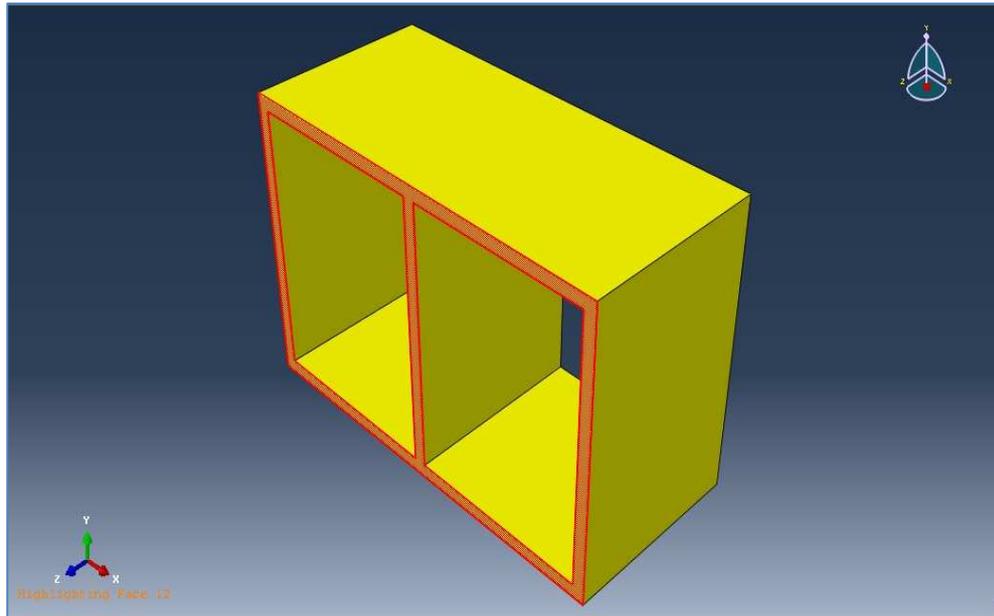
#### 4.6.1.2.8. Mallado del modelo

Para mallar el modelo, se empleará el módulo *Mesh*. Los pasos necesarios para mallar el cuerpo son:

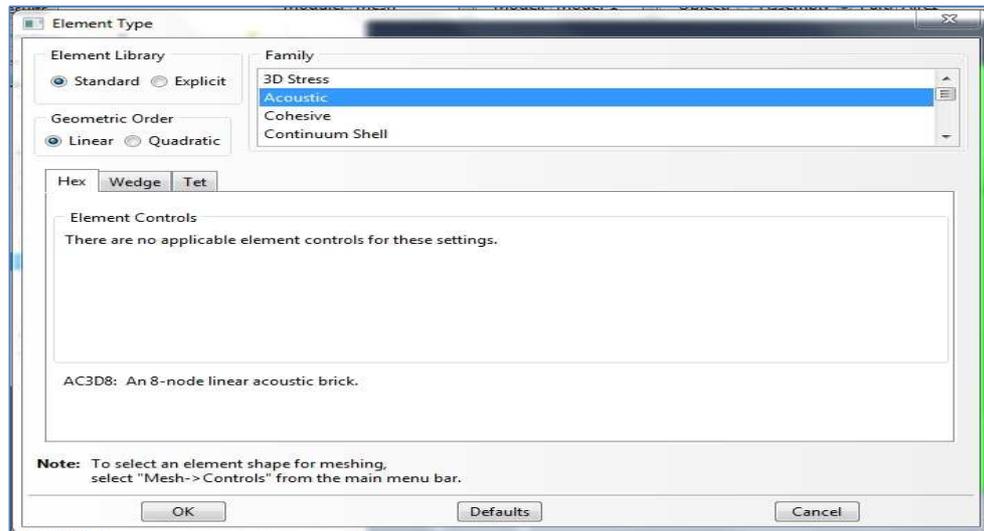
- Se inicia el módulo *Mesh*.
- Es necesario crear particiones en la parte de ladrillo para que pueda mallarlo. Se crean particiones *Tools*→*Partition* para aislar los codos, que es lo que genera distorsión.
- Se eligen las opciones que aparecen en la imagen inferior para crear las particiones.



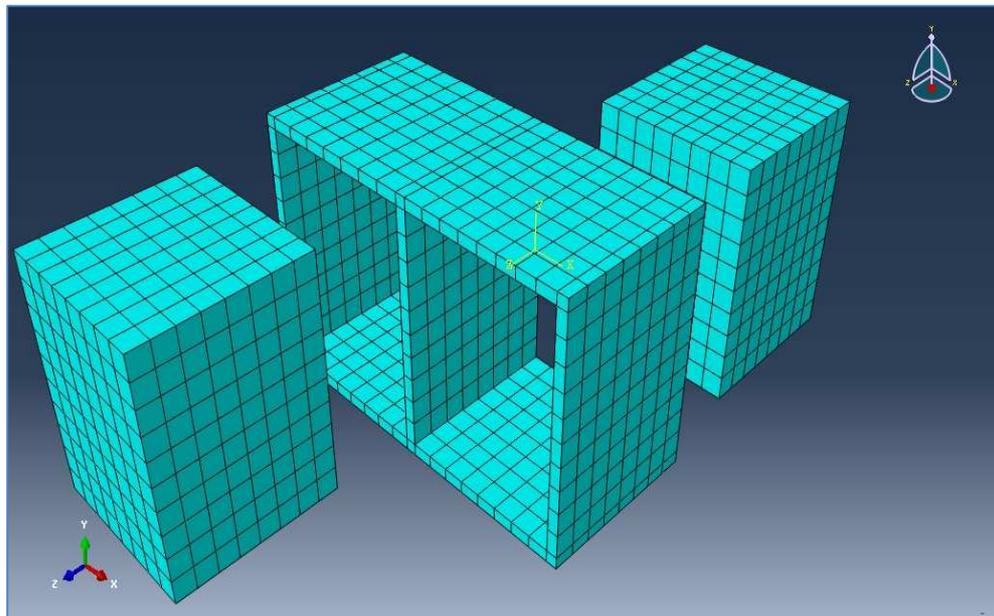
- Se selecciona la cara a dividir en el *Sketch*, la señalada en el dibujo, y la opción *Point&Normal* para hacer las particiones.



- Una vez hechas las particiones, la imagen que ofrece el programa es ya *Structured*.
- Se pincha en el icono  y se selecciona *Structured* para las tres partes del modelo.
- Se hace clic en el icono del menú de módulo  y se malla a 0.4. Esta vez el mallado es de mayor tamaño que en el ejercicio anterior porque el modelo es más complejo y no se desea que el análisis sea demasiado pesado. Solo se trata de un análisis previo al análisis final, donde no importará emplear muchos recursos, mientras que en estos ejercicios previos, solo se desea adquirir nociones básicas. Se hace clic en *OK* y se repite la operación para las tres partes que forman el modelo.
- Se pincha en el icono del menú de módulo  y se selecciona la parte *Aire1*.
- Se presiona *Done* y aparece la ventana *Element Type*. Se eligen las opciones que aparecen en la imagen inferior y se pincha en *OK*.



- Se repiten los pasos para la otra masa de aire.
- Para la pared de ladrillo, se selecciona la opción *3D Stress*.
- Se hace clic en el botón  para mallar el modelo. La imagen que se obtiene después de mallar los tres elementos es:



- Ahora se debe volver al módulo *Assembly* para poner las partes del modelo en su posición correcta.

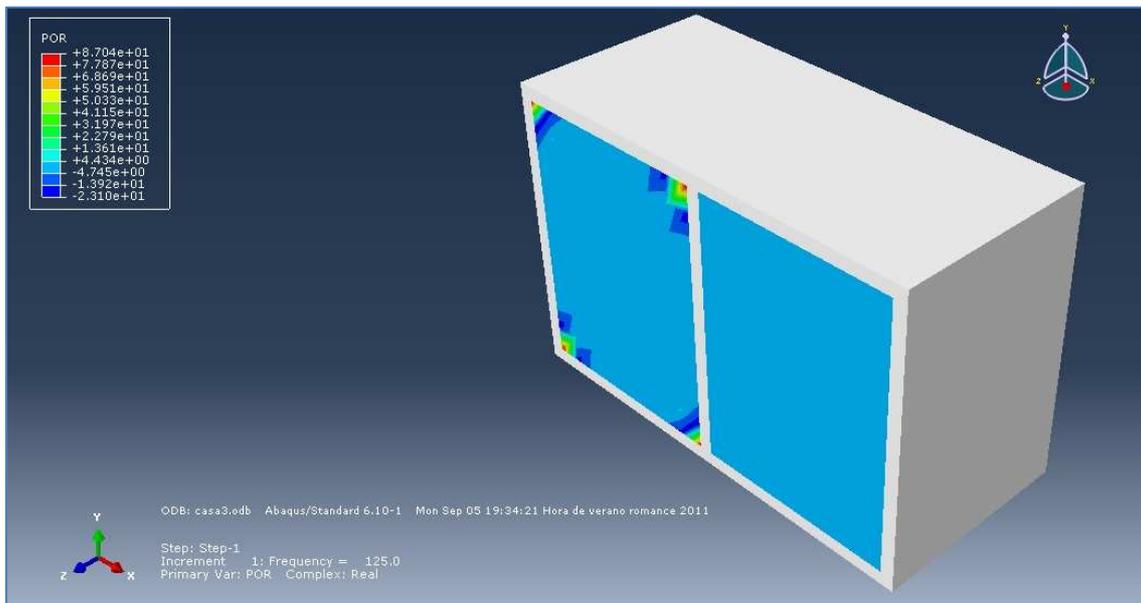
#### 4.6.1.2.9. Creación del trabajo de análisis

Una vez configurado el análisis, se abre el módulo *Job* para crear un trabajo que esté asociado con el modelo y someter ese trabajo a análisis. Para ello:

- Se entra en el módulo *Job* y se pincha en el icono . Aparece la ventana *Create Job* con la lista de los modelos que están disponibles en la base de datos de modelos.
- Se le da un nombre al trabajo y se hace clic en *Continue* para crearlo.
- Aparece la ventana *Edit job*.
  - *Description: Ejemplo de sonido 3D*
  - *Job type: Full analysis*
  - *Run mode: Background*
  - *Submit time: Immediately*
- Se hace clic en *OK* para crear el trabajo.
- Se pincha sobre el icono  , junto al icono  para abrir el *Job manager*, y se pulsa en *Submit* para comenzar el análisis.
- Una vez concluido con éxito el análisis, se pincha en el botón *Results* de la ventana *Job Manager* para ver los resultados.

#### 4.6.1.2.10. Visualización de los resultados del análisis

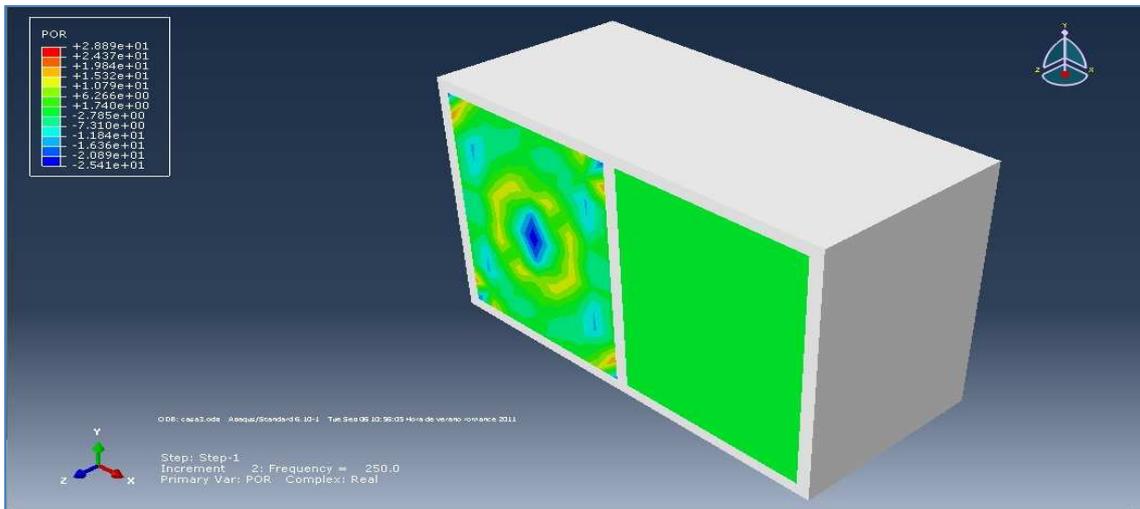
Los resultados que ofrece el programa para la presión acústica de la frecuencia 125 Hz son los de la imagen inferior:



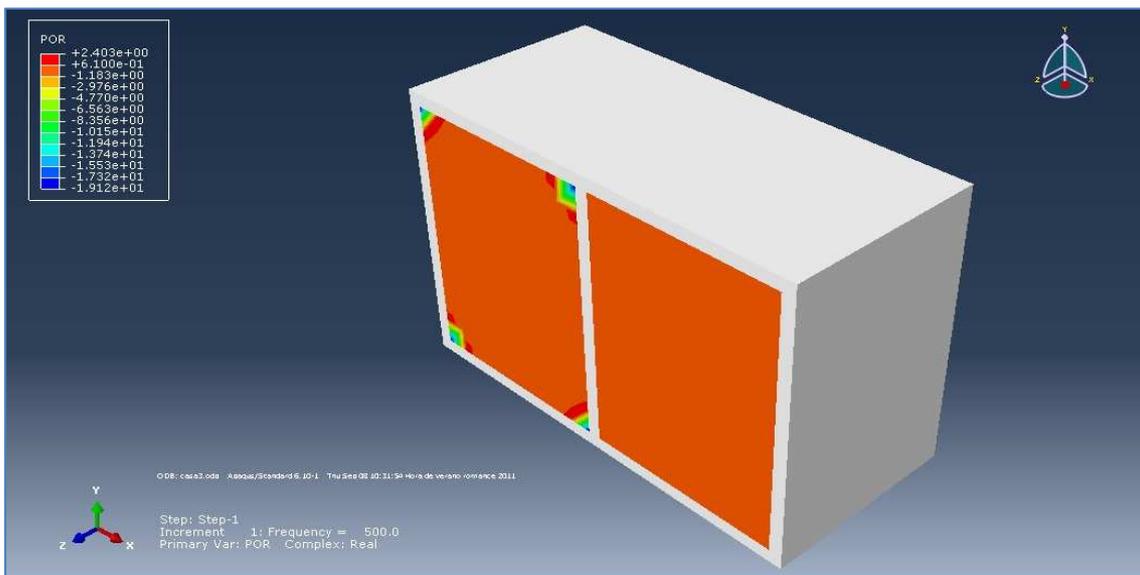
Si se toman valores para la presión acústica a 1 m de la pared, en la habitación izquierda, se observa que los valores más altos están cerca de los focos, pero

descienden con la distancia a ellos, siendo el más alto  $-4.09566$  Pa para los nodos de coordenadas  $(0.85, 1.6, 3)$  y  $(0.85, -1.6, 3)$  y el más bajo de  $0.320331$  Pa para los nodos de coordenadas  $(0.85, 0.4, 3)$  y  $(0.85, -0.4, 3)$ . Sin embargo, en la habitación de la derecha, la presión acústica está en torno a  $10^{-3}$  en todos los casos.

En la imagen inferior, se pueden ver los resultados para la frecuencia de 250 Hz. Se crea un foco de presión en el centro de la habitación, donde se alcanzan valores de  $-25.412$  Pa, la presión más alta de la habitación. En la habitación contigua, por el contrario, el valor de la presión más alto a 1 m del tabique central es de  $-0.411807$  Pa para el nodo  $(0.85,-1.6, 3)$  y, por el mapa de colores, la presión no es elevada en ningún caso.

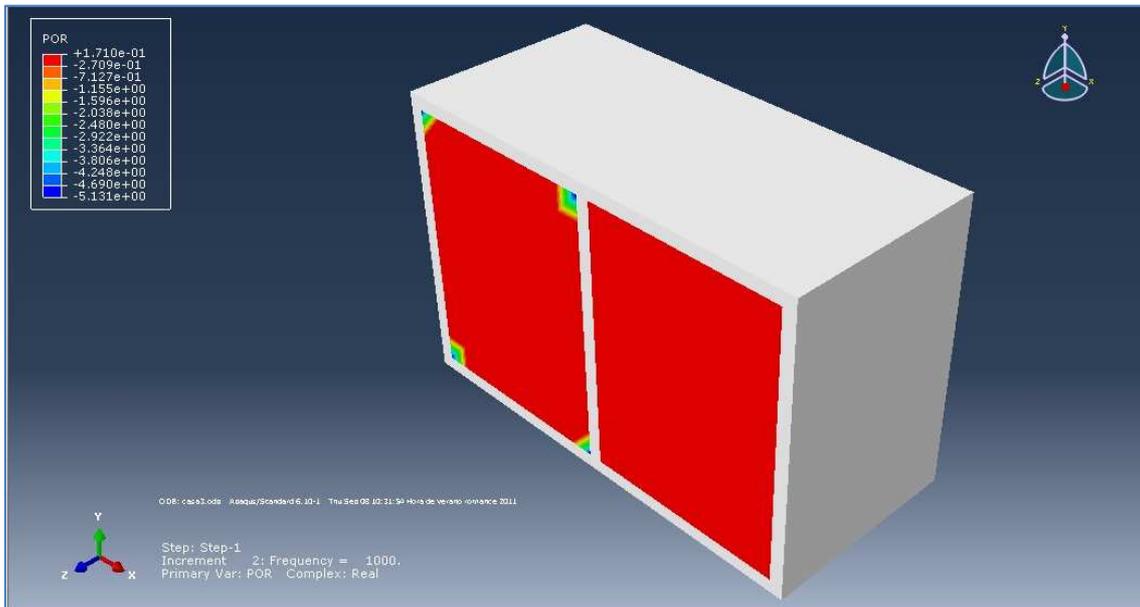


En la siguiente imagen, se pueden ver los resultados para la frecuencia de 500 Hz:

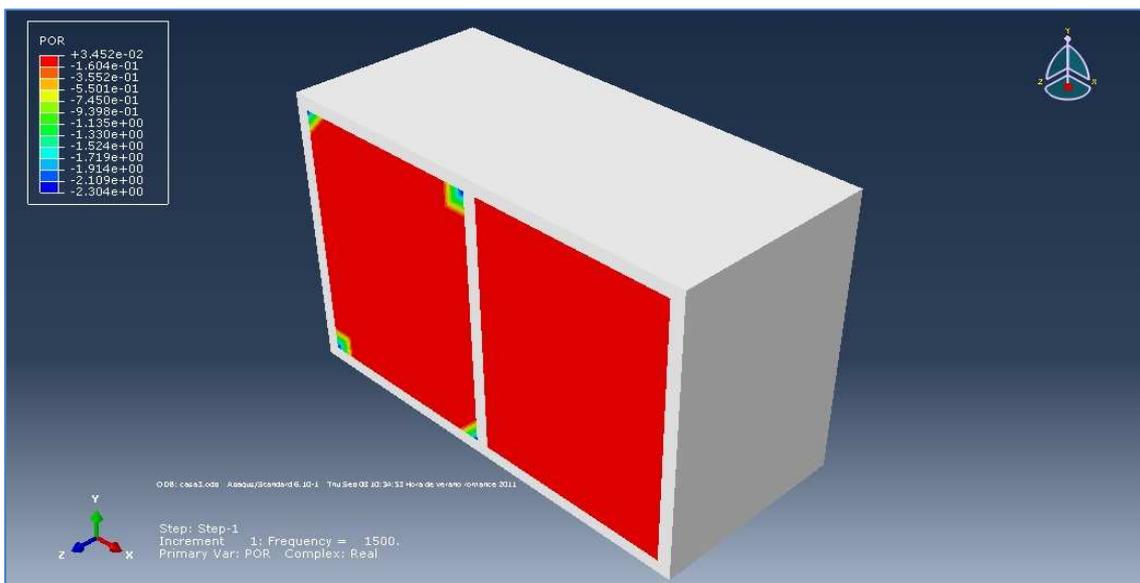


Para esta frecuencia vuelve a repetirse el patrón. La presión acústica es alta cerca de los focos y disminuye con la distancia a los mismos. La presión más alta, en la habitación de la izquierda, a 1 metro del tabique central, es de  $-0.0277845$  Pa para los

odos (-0.85, -1.6, 3) y (-0.85, 1.6, 3). Para la habitación de la derecha, sin embargo, la presión más elevada es de -0.000289283 Pa en el nodo (0.85, 1.6, 3).

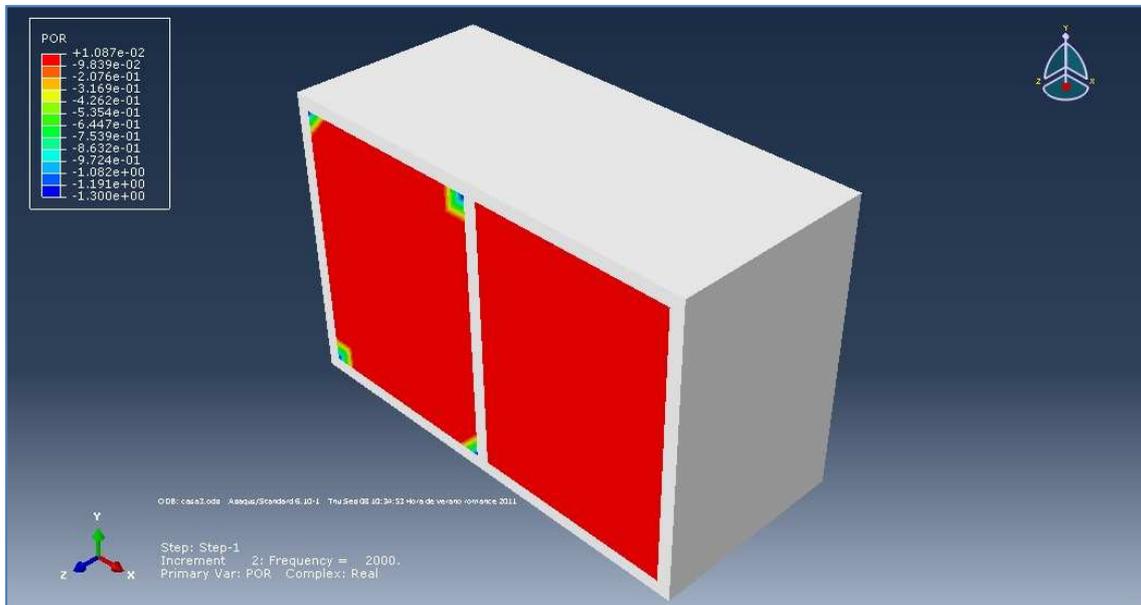


En la imagen superior, se ven los resultados para la frecuencia de 1000 Hz. Los valores más elevados de presión se obtienen para los puntos de generación de ruido, de -5.131 Pa, pero para el resto de la habitación, todos los valores son del orden de  $10^{-1}$  o menores. A 1 metro de la pared divisoria, el máximo valor es -0.000454026 Pa para los nodos (-0.85, -1.6, 3) y (-0.85, 1.6, 3). Para la habitación contigua, el mayor valor a 1 m del tabique divisorio es de  $-2.24644 \cdot 10^{-5}$  Pa para el nodo (0.85, -1.6, 3).



En la frecuencia de 1500 Hz, mostrada arriba, se repite el patrón mostrado por la frecuencia de 1000 Hz. Los focos de ruido tienen altas, presiones pero el resto de la

habitación no supera el valor de  $-0.1604$  Pa. A 1 metro de la pared divisoria, la máxima presión es de  $-4.05182 \cdot 10^{-5}$  Pa para el nodo  $(-0.85, 1.6, 3)$  y de  $-2.3506 \cdot 10^{-6}$  Pa para el nodo  $(0.85, -1.6, 3)$ , al otro lado de la pared.



Por último, la frecuencia de 2000 Hz muestra unos resultados similares. La máxima presión que se alcanza en la habitación donde se genera el ruido, a 1 m de la pared, es de  $-7.20304 \cdot 10^{-6}$  Pa para el nodo  $(-0.85, -1.6, 3)$  y de  $-8.85391 \cdot 10^{-9}$  Pa para el nodo  $(0.85, -1.6, 3)$  en la habitación de al lado.

Las conclusiones para este segundo ejercicio son:

- Se puede observar que los nodos que alcanzan las máximas presiones son los mismos en todas las frecuencias. En un caso real de aislamiento, se debería tener en cuenta a la hora de diseñar el aislamiento de la sala afectada.
- La presión acústica generada para las frecuencias de 1500 y 2000 Hz en la habitación de la derecha es demasiado pequeña para ser detectada por el ser humano, no se oiría ningún sonido.
- Se ha podido comprobar, para todas las frecuencias, que el aislamiento del muro de ladrillo es evidente.

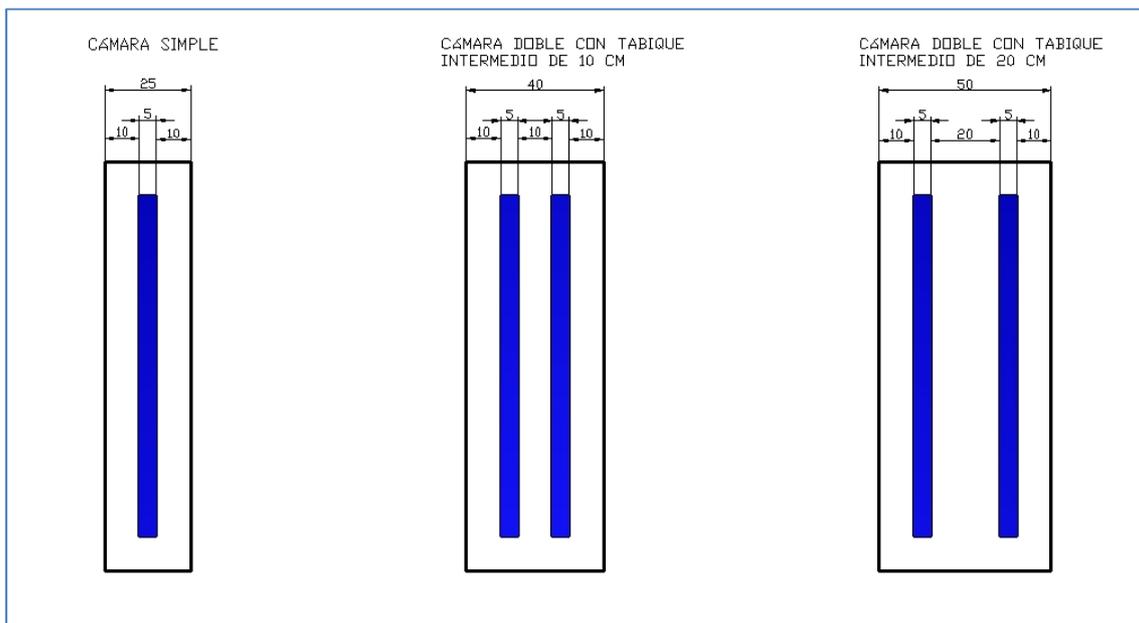
Se han tomado los nodos de coordenada  $Z = 3$  m por la dificultad para acceder desde la pantalla de visualización de resultados a los nodos de coordenada  $Z$  inferior. En el siguiente ejercicio, en el que se adoptará como modelo la geometría real del problema, se buscarán los nodos a una altura de 1 m del suelo y a 1 m de distancia de la pared en los archivos de escritura del programa. De esta forma, se buscará la mayor

similitud posible con la realidad, ya que las medidas de ruido en locales deben efectuarse a 1 m de la pared divisoria y 1 m del suelo.

#### 4.6.1.3. Ejercicio final con el modelo real en 3D de un bar y una vivienda adyacente

En el último ejercicio de este trabajo, se utilizará el modelo real de un bar y una vivienda colindante. Se pretenden estudiar varias disposiciones constructivas para comprobar la eficacia del aislamiento sonoro en la vivienda ante las distintas frecuencias audibles para el hombre.

Se analizarán tres tipos de disposiciones usadas en la actualidad en la construcción de viviendas.



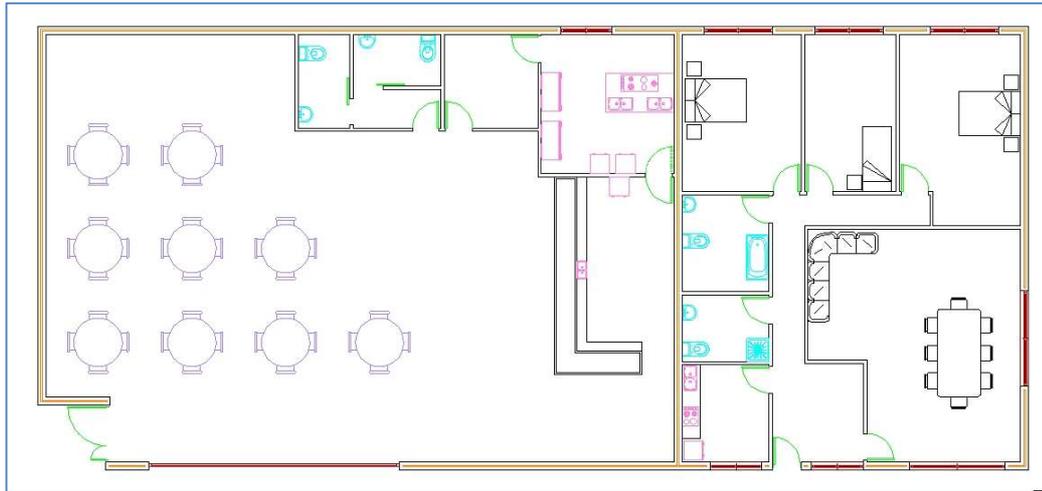
Se comprobará la eficacia de estas disposiciones con cámaras de aire y después se analizará las diferencias para las distintas frecuencias al introducir poliuretano expandido en las cámaras. Este es uno de los aislantes más utilizados en construcción en los últimos años y se pretende comprobar su eficacia como aislante sonoro.

##### 4.6.1.3.1. Creación de una parte

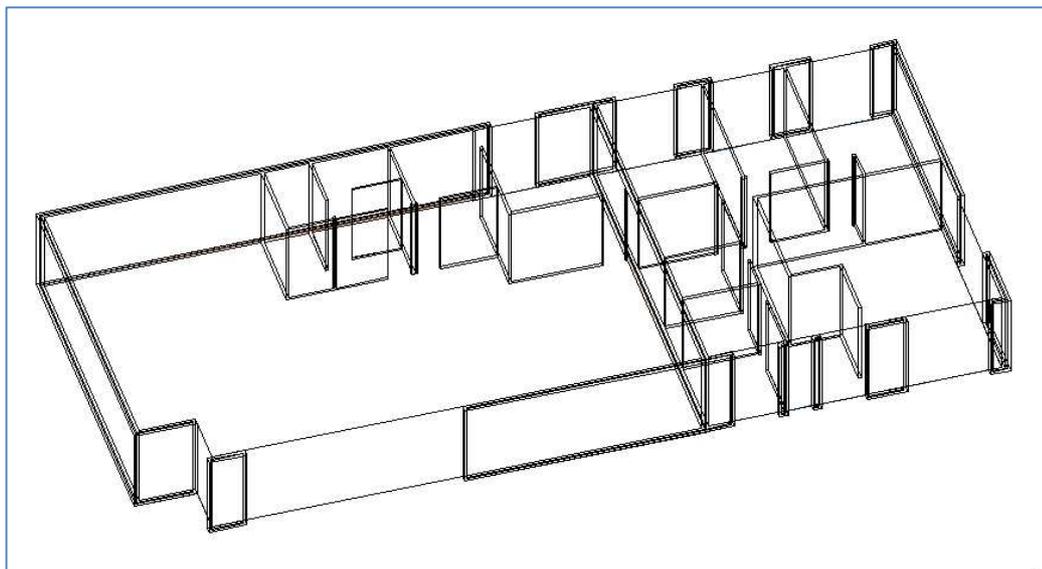
Se comenzará el análisis por la construcción con cámara simple como aislamiento de bar y vivienda.

En esta ocasión, debido a la complejidad del modelo de estudio, no se utilizarán las herramientas ofrecidas por *Abaqus* para su diseño. Se hará uso de otro software de diseño, *AUTOCAD*, y se importará el modelo al programa de elementos finitos para trabajar en su análisis. Los pasos a seguir son los siguientes:

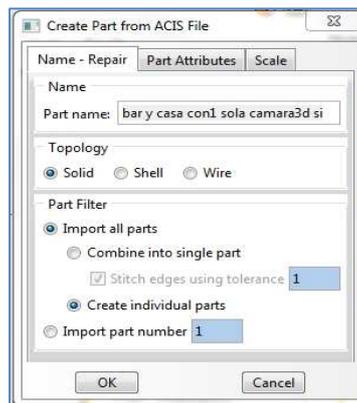
- Para obtener el modelo que *Abaqus* necesita para el análisis, se dibujará el bar y la casa en planta para, con las herramientas del programa de diseño, convertirlo en un modelo en 3D.



Las capas de muebles, ventanas y puertas se desactivarán, pues no interfieren en el modelo de *Abaqus*. No se debe olvidar, al transformar las dos dimensiones a tres dimensiones, que el aire debe ser tratado como un sólido más para que *Abaqus* lo importe correctamente. Por lo tanto, al aire de habitaciones y cámaras también se le debe otorgar un volumen de igual altura que los muros. El resultado que ofrece *Autocad* tras la transformación a las tres dimensiones es el de la imagen inferior.



- Para que pueda realizarse la sincronización entre los dos programas, el tipo de archivo tiene que ser el mismo, por lo que habrá que exportar el modelo desde *Autocad* en un formato que acepte *Abaqus*. En este caso, la extensión es *.sat*.
- Después de exportar el modelo desde el programa de diseño, se abre un archivo nuevo en *Abaqus* y se selecciona *File*→*Import*→*Part*. De esta forma, el programa de elementos finitos importa los sólidos en 3D creados por el software de diseño y los entiende como una parte creada por él mismo.
- Aparece la ventana *Create Part from ACIS File*, donde se seleccionan las opciones de la imagen inferior.



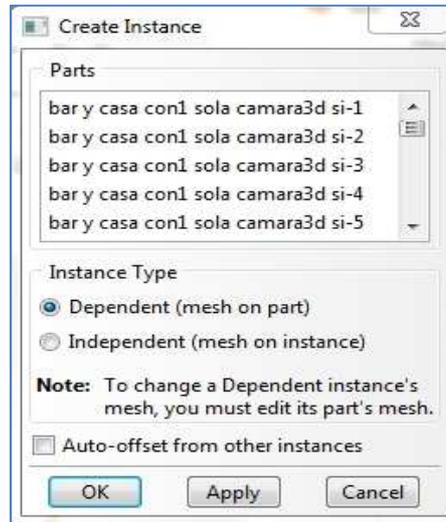
- En la pestaña *Part Attributes* se dejan las opciones por defecto, *3D* como *Modeling Space* y *Deformable* como *Type*.
- En la pestaña *Scale* se elige la opción *Multiply all lengths by 1* para que *Abaqus* respete la escala del modelo de *Autocad*.
- Se hace clic sobre *OK* para importar el modelo.
- El programa inicia el módulo *Part* y muestra en pantalla la última parte creada. Por las opciones elegidas en la ventana *Create Part from ACIS File*, el programa genera una parte para cada sólido del modelo importado. En este caso, se han generado 23 partes.
- Si se quiere ver todas las partes unidas para comprobar que el programa de elementos finitos ha importado el modelo de forma correcta, se debe acudir al módulo *Assembly*. De esta forma, se podrá ver el resultado final con sus posiciones relativas correctas.

#### 4.6.1.3.2. Ensamblado del modelo

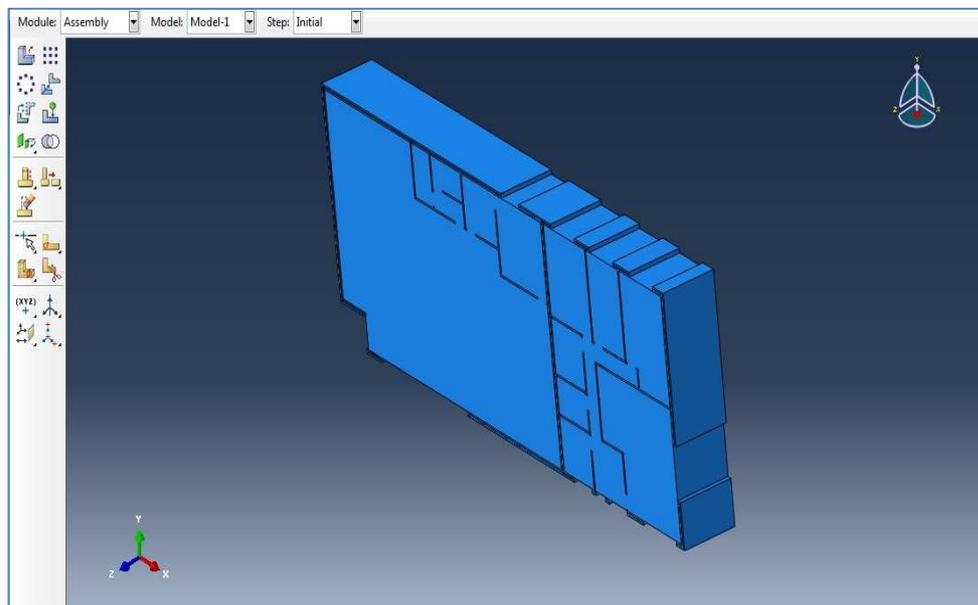
En esta ocasión, se vuelve a tener más de una parte en el modelo y este paso es necesario para establecer las relaciones entre las distintas partes.

Para ensamblar el modelo se siguen estos pasos:

- Se selecciona el módulo *Assembly* de la lista de módulos.
- Se hace clic en el icono  en el menú propio del módulo. Aparece la ventana *Create Instance*. Ahora, el programa ofrece la lista de las partes que se han creado. Hay que seleccionarlas una a una, pinchar en *Dependent* y hacer clic en *Apply*.



- Una vez realizada esta última acción, el programa ofrece una imagen con todas las partes juntas y en su posición correcta.



El paso seguido en el diseño del modelo con el programa de CAD para tratar el aire como un cuerpo sólido más, es necesario para poder conferirle ahora las propiedades características del aire, indispensables para el análisis. Si no se le hubiera dado un volumen al aire, el

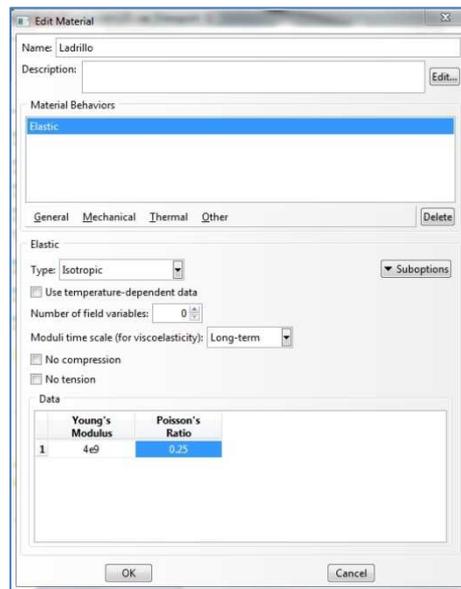
programa de elementos finitos no lo habría entendido como un cuerpo más y no lo habría importado.

#### 4.6.1.3.3. Creación del material

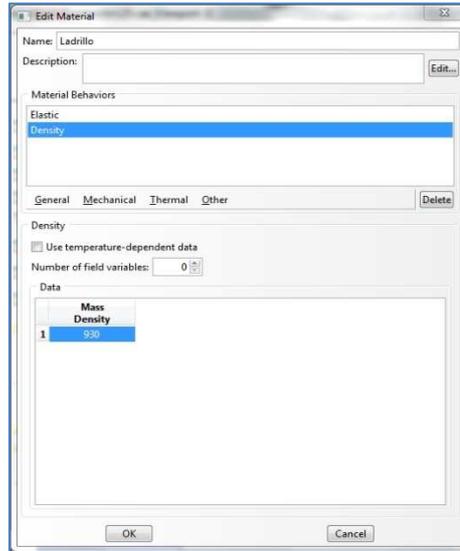
El siguiente paso en el análisis es crear los materiales. Para definir los materiales del ejercicio se debe utilizar el módulo *Property*. Una vez dentro del módulo, los pasos a seguir son los siguientes:

- Se activa la herramienta de módulo .
- Se abre la pestaña *Mechanical* → *Elasticity* → *Elastic*.

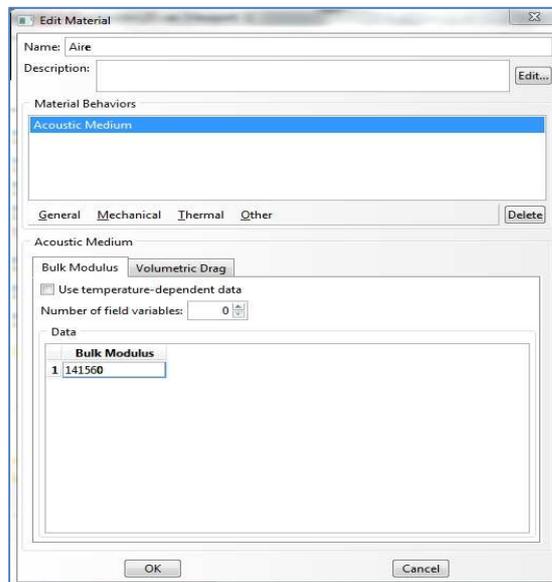
Para definir el ladrillo, se necesita su densidad y su módulo de Young. Se introducen los valores utilizados para los ejercicios anteriores,  $E = 4e9$  Pa y  $\nu = 0.25$ , como figura en la imagen inferior.



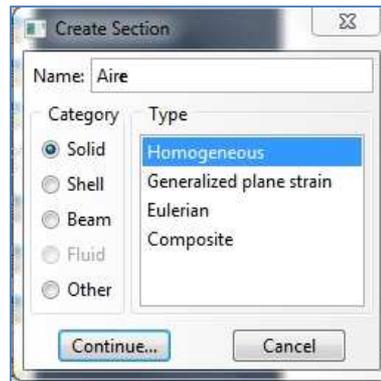
- Se abre la pestaña *General* → *Density* y se introduce el valor de la densidad,  $\rho = 930$  kg/m<sup>3</sup>.



- Se presiona sobre *OK* para crear el material.
- Se hace clic en  para crear el aire. Para definir el aire, se necesita su densidad,  $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$  y su módulo de Bulk, 141560 Pa.
- Se abre la pestaña *Other* → *Acoustic Medium* y se introduce el valor del Módulo de Bulk.



- Se abre la pestaña *General* → *Density* y se introduce el valor de la densidad,  $1.225 \text{ kg/m}^3$ .
- Se hace clic en el icono  del menú del módulo. La ventana *Create section* aparece en pantalla.

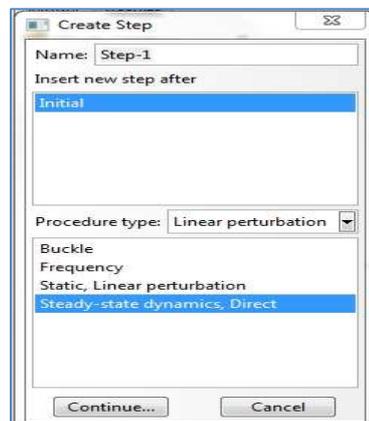


- Se nombra a la sección como *Aire*.
- Se selecciona *Solid* como *Category* y *Homogeneous* como *Type*.
- Se hace clic en *Continue* para crear la sección *Aire*.
- Se selecciona el material *Aire* en la siguiente ventana y se hace clic en *OK*.
- Se repiten los pasos para la sección de ladrillo.
- Se asignan las secciones a las partes del modelo con la función .

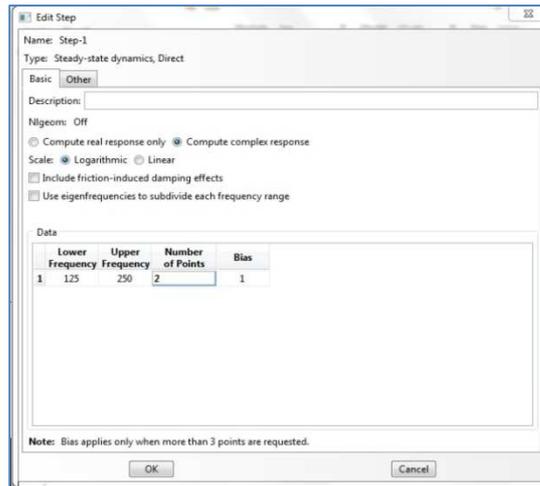
#### 4.6.1.3.4. Configuración del análisis

Una vez creado el modelo, se puede entrar en el módulo *Step* para la configuración del análisis. Para crear el nuevo paso:

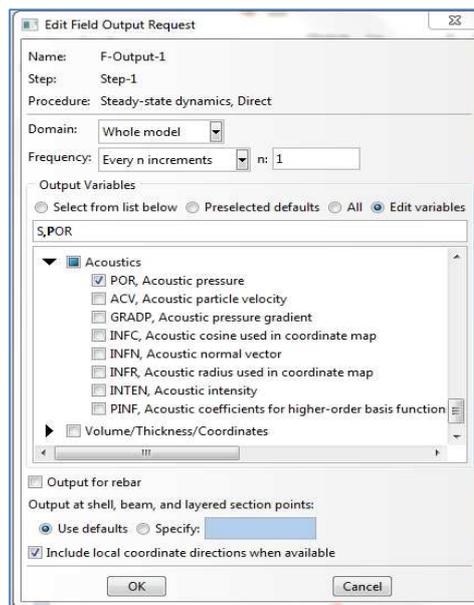
- Se selecciona el módulo *Step* en la lista de módulos.
- En el menú propio del módulo, se hace clic en el icono .
- Aparece la ventana *Create Step*. Dentro de esta ventana, se acepta el nombre por defecto del nuevo paso (*Step1*) y se selecciona *Linear perturbation* como *Procedure Type* y *Steady-state dynamics, Direct* dentro de los tipos de paso que ofrece.
- Se hace clic en *Continue* para continuar con el análisis.



- Aparece la ventana *Edit Step*, en la que se elige el margen de frecuencias con las que se quiere trabajar, 125-250, el número de puntos que habrá en ese intervalo, 2 (para que dé solo los resultados de esas dos frecuencias), y el número de Bias.
- Se selecciona la opción de cálculo *Computer complex response* y *Logarithmic* como *Scale*.



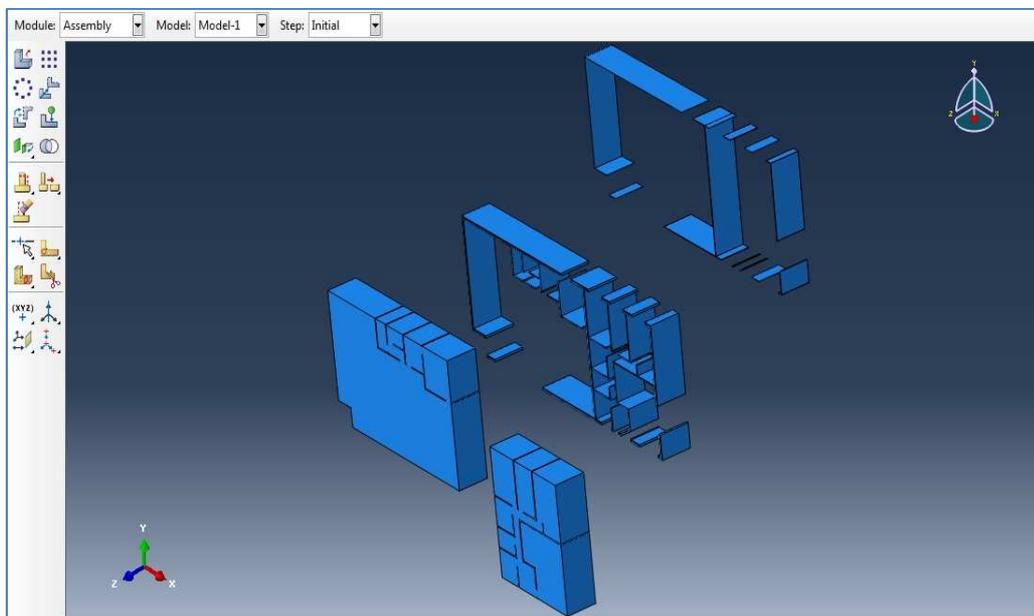
- Se modifican las variables de salida. Solo necesitamos la presión acústica, *POR*. Para ello, sobre el archivo que crea *Abaqus* para la salida de datos, se pincha en el triángulo al lado de *Acoustics* y se selecciona *POR*. En la línea de salida sólo se dejan las variables *S* y *POR*.



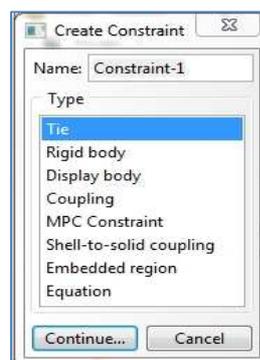
#### 4.6.1.3.5. Interactions

Al estar formado el modelo por varios cuerpos, se hace necesario definir las relaciones e interacciones entre ellos. Para esto, se utiliza el módulo *Interactions*. Los pasos a seguir son:

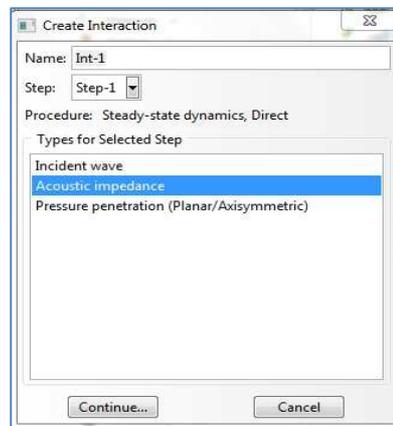
- Se selecciona el módulo *Interactions* de la lista de módulos.
- Se necesita tener los cuerpos separados entre sí para poder definir el contacto. Para ello, se vuelve al módulo *Assembly* y se utiliza la herramienta . Se deben separar el aire de las habitaciones y el aire de las cámaras para poder establecer las uniones con las superficies de ladrillo con las que están en contacto.



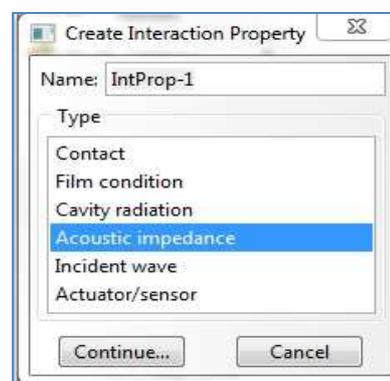
- Una vez separados los cuerpos, se vuelve al módulo *Interactions* y se define el contacto con la herramienta .
- Aparece la ventana *Create Constraint*. Se elige la opción *Tie* y se presiona en *Continue*.



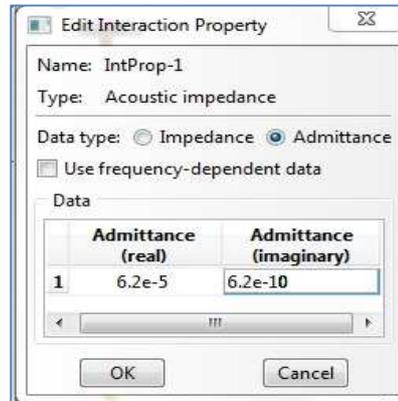
- Se pincha en *Surface* en la línea de comandos y se selecciona la *Master Surface* dentro del contacto, que es la superficie del cuerpo más rígido, en este caso, el tabique.
- Se hace clic en *Done* cuando esté seleccionada.
- Se vuelve a seleccionar *Surface* y se escoge la superficie del aire en contacto con el ladrillo como *Slave Surface*. Se hace clic en *Done* y aparece una ventana donde marca la *Slave Surface* en rosa y la *Master Surface* en rojo. Se hace clic en *OK* para aceptar la selección y crear el contacto.
- Se repite la misma operación para todas las caras de los volúmenes de aire en contacto con el tabique.
- Se pulsa en  para crear las interacciones entre los cuerpos.
- Aparece la ventana *Create Interaction* y se selecciona *Acoustic Impedance*.



- Se seleccionan las superficies del aire en contacto con el ladrillo y se hace clic en *Done*.
- Se selecciona *Nonreflecting* y se hace clic en *OK*.
- Se pulsa en  para definir las condiciones acústicas. Aparece la ventana *Create Interaction Properties* y se selecciona *Acoustic Impedance* de nuevo.



- En la siguiente pantalla, se selecciona *Admittance* y se introduce el valor de la admitancia del medio,  $6.2e-5$  en la componente real y  $6.2e-10$  en la componente imaginaria.

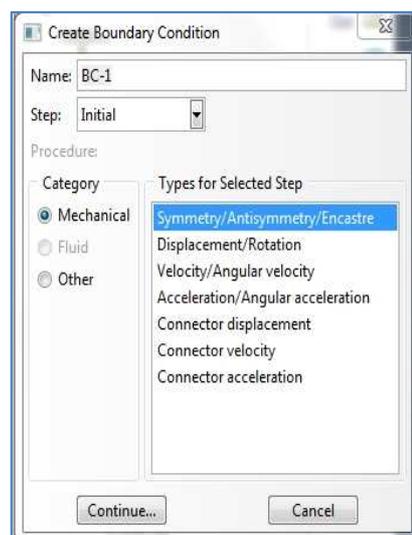


- Se mantienen los cuerpos separados para crear las cargas y las condiciones de contorno. Así se evitan errores al seleccionar los puntos donde se aplican las condiciones. Después, antes de realizar el análisis, se volverán a juntar en el módulo *Assembly*.

#### 4.6.1.3.6. Condiciones de borde

Para aplicar las condiciones de borde, se selecciona el módulo *Load* y se siguen los siguientes pasos:

- En el menú del módulo, se utiliza la herramienta . Aparece la ventana *Create Boundary Condition*.

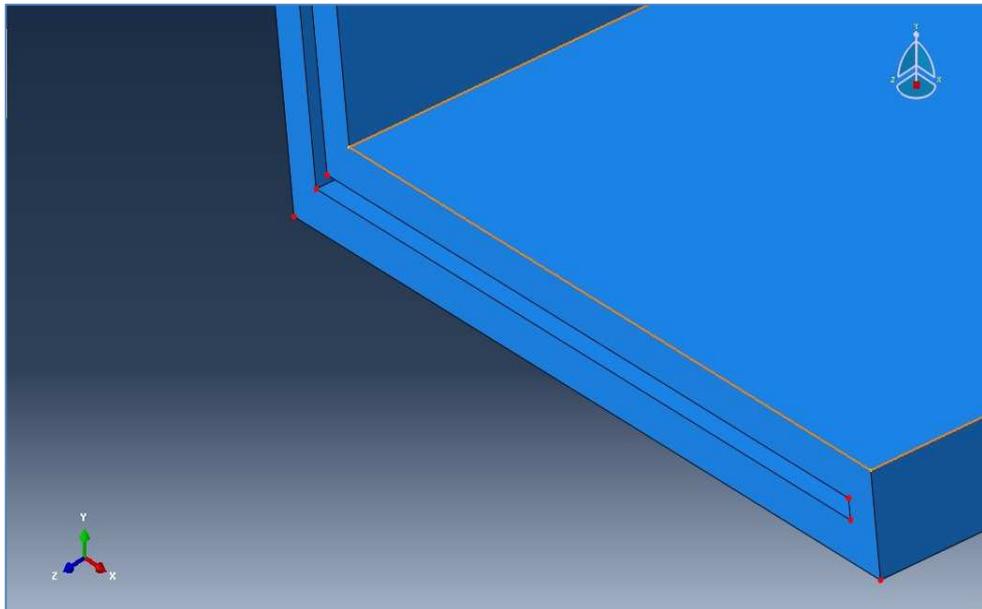


- En la ventana *Create Boundary Condition*:

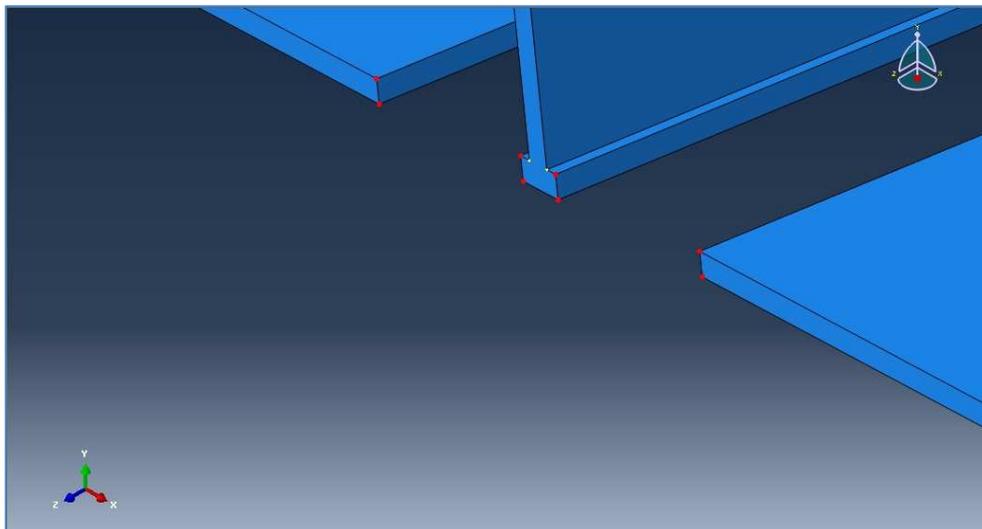
- Se selecciona el paso *Initial* como el paso en el que se aplicará la condición de contorno.
- Se acepta *Mechanical* como la opción válida de la lista *Category*.
- Se selecciona *Symetry/Antisymetry/Encastre* como el tipo de condición de borde y se hace clic en *Continue*.

*Abaqus* muestra mensajes en el área de avisos para guiar al usuario.

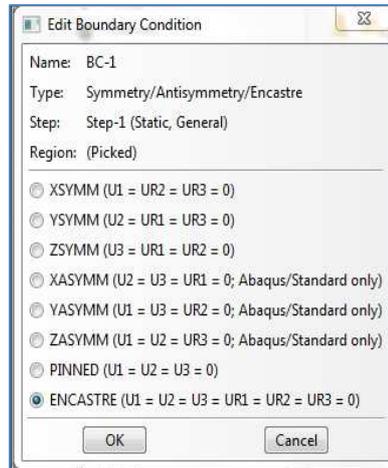
- En los muros exteriores del bar y la vivienda, donde existe la cámara de aislamiento, se seleccionan los tres puntos marcados en la imagen. De esta forma, se impide el movimiento como si se tratara de un empotramiento pero la condición no es tan rígida como si se estuviera seleccionando toda la superficie de empotramiento de los muros.



- En los muros interiores, en los que no hay cámara, se empotrarán los puntos de las esquinas, como en la imagen inferior.



- Se pincha en *Done* en el área de avisos para indicar que se ha acabado la selección. Aparece la ventana *Create Boundary Condition*.

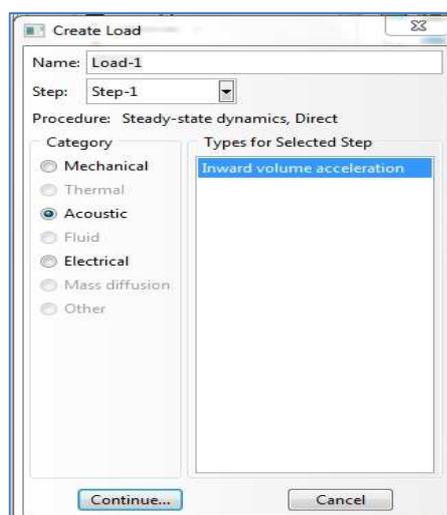


- En esta ventana, se selecciona la opción *ENCASTRE* y se hace clic en *OK* para crear los empotramientos.
- Este paso se hace para el empotramiento en el techo y en el suelo. Se necesitará para ello girar el modelo con la herramienta  y desplazarlo con .

#### 4.6.1.3.7. Cargas de sonido

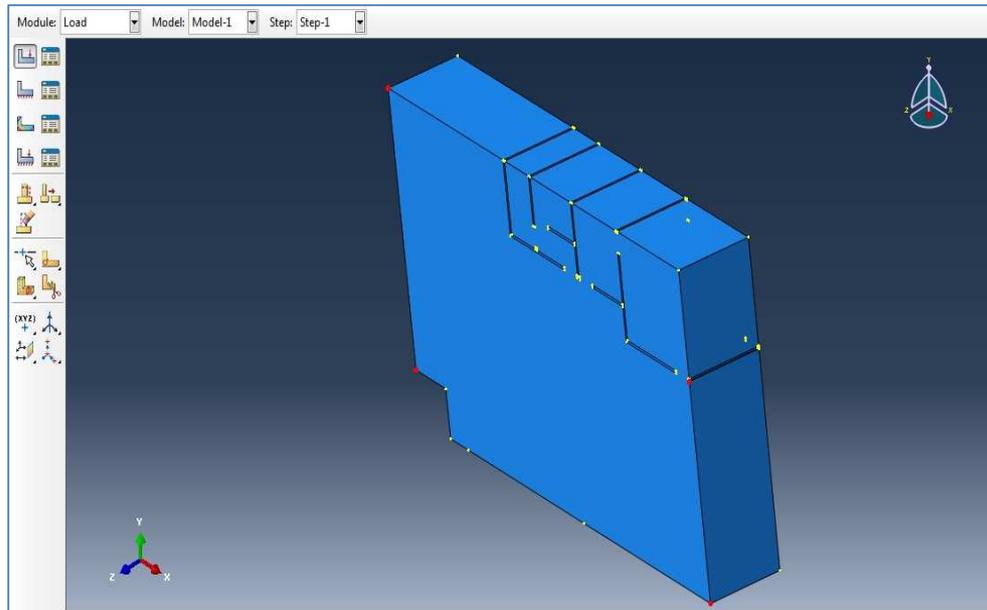
Los pasos a seguir para crear las cargas de sonido en la masa de aire del bar son:

- Se hace clic en  y aparece la ventana *Create Load*.

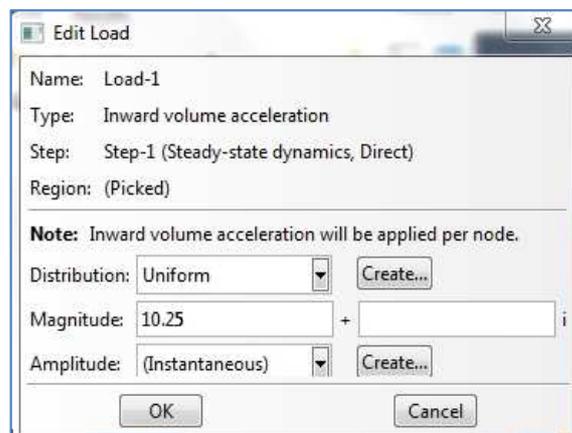


- Dentro de esta ventana, se selecciona *Acoustic* e *Inward volumen aceleration*.

- Se hace clic en *Continue* y se seleccionan los puntos de las cuatro esquinas de la masa de aire del bar, destacados con puntos de color rojo en la imagen, para simular cuatro altavoces en las esquinas del techo del mismo.

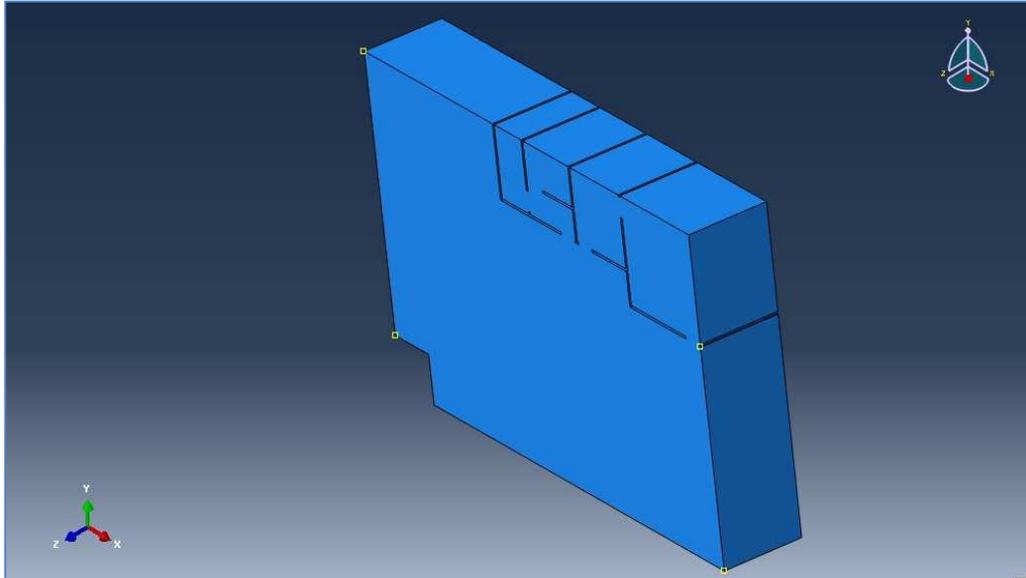


- Se hace clic en *Done* y aparece la ventana *Edit load*.



Dentro de esta ventana, se introduce el valor de  $10.25 \text{ m}^3/\text{s}^2$ .

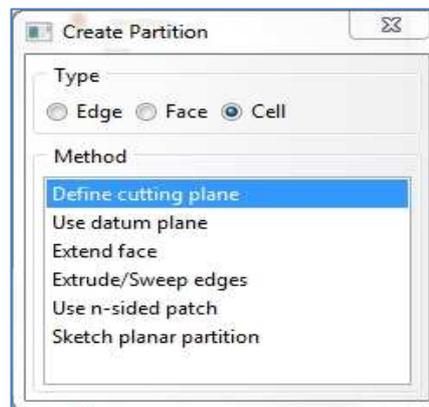
- Se hace clic en *OK* para crear las cargas. *Abaqus* representa estas cargas con cuadraditos en los puntos de aplicación.



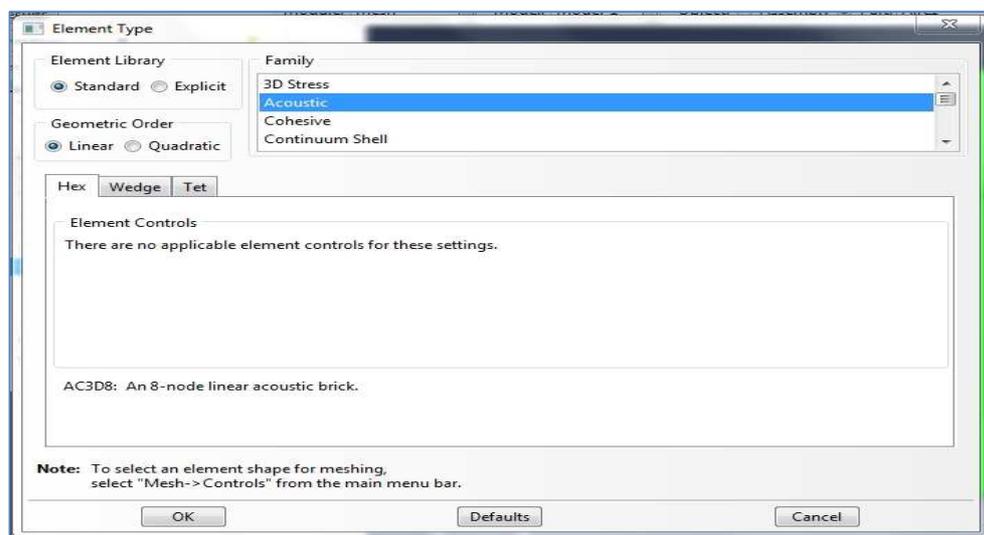
#### 4.6.1.3.8. Mallado del modelo

Para mallar el modelo, se empleará el módulo *Mesh*. Los pasos necesarios para mallar el cuerpo son:

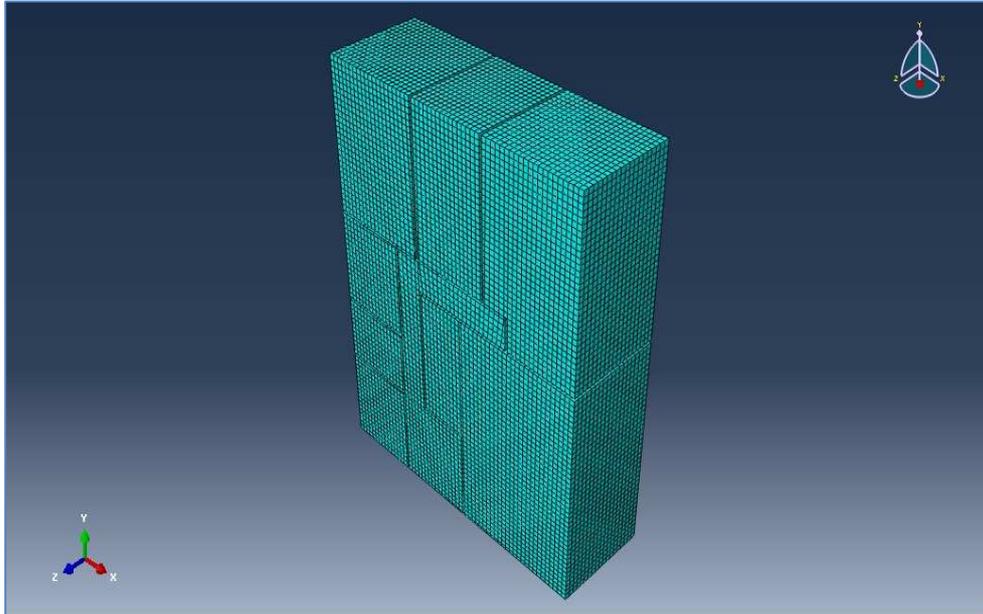
- Se inicia el módulo *Mesh*.
- Es necesario crear particiones en la mayoría de las partes del modelo, tanto de aire como de ladrillo, para que el programa pueda mallarlo. Solo interesa que el mallado sea *Structured* en el tabique de división entre casa y bar, en las cámaras de aislamiento y en los volúmenes de aire de vivienda y bar. El resto de tabiques puede tener el tipo de mallado que el programa elige, generalmente *Sweep*, en color amarillo.
- Se crean particiones *Tools*→*Partition* para aislar los codos, que es lo que genera distorsión.
- Se eligen las opciones que aparecen en la imagen inferior para crear las particiones.



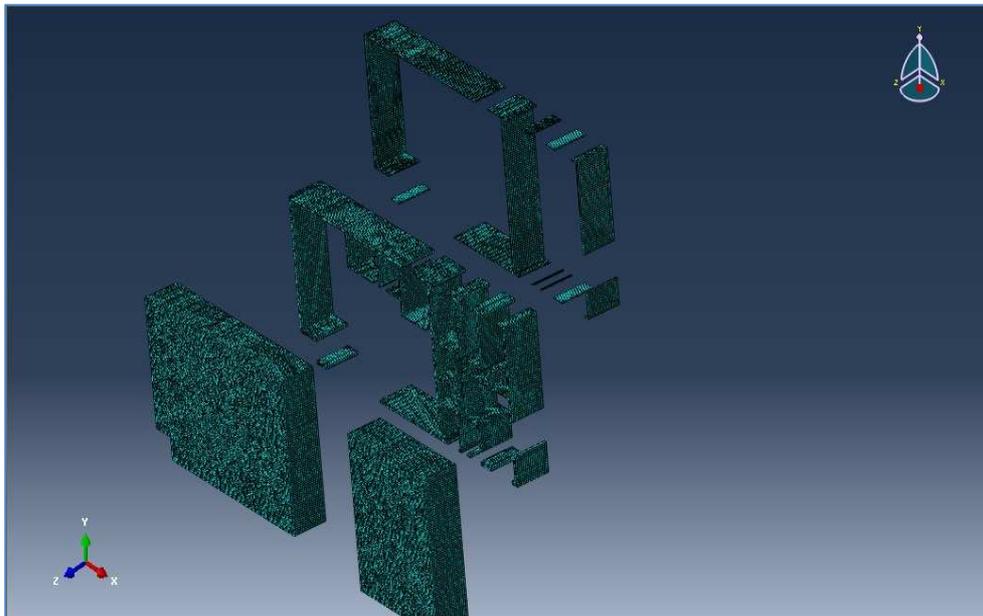
- Se selecciona la cara a dividir en el *Sketch* y la opción *Point&Normal* para hacer las particiones.
- Una vez hechas las particiones, con todas las partes que interesan con color verde, la imagen que ofrece el programa es ya *Structured* para los cuerpos afectados.
- Se hace clic en el icono del menú de módulo  y se malla a 0.18 cada una de las partes. Este tamaño de malla es el tamaño más pequeño ofrecido por el programa para algunas de las partes de este modelo. Como el modelo de análisis es complejo, se acepta el tamaño ofrecido para facilitarle la tarea al software.
- Se pincha en el icono del menú de módulo .
- Se selecciona la primera parte de aire y se presiona *Done*. Aparece la ventana *Element Type*. Se eligen las opciones que aparecen en la imagen inferior y se pincha en *OK*.



- Se repiten estos pasos para las otras masas de aire.
- Para los tabiques de ladrillo, se selecciona la opción *3D Stress*.
- Se hace clic en el botón  para mallar las partes del modelo.
- La imagen que se obtiene para la parte de aire de la casa, la parte 1 para el programa, es:



- La imagen que se obtiene después de mallar las distintas partes y marcar la opción *Assembly* en *Object* es:



- Ahora se debe volver al módulo *Assembly* para poner las partes del modelo en su posición correcta.

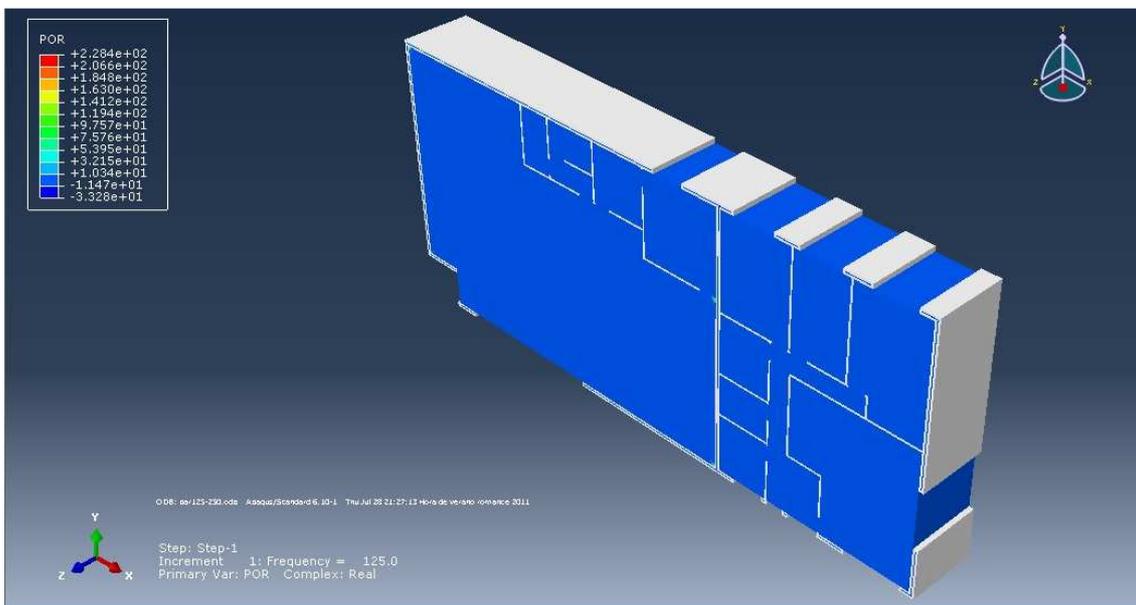
#### 4.6.1.3.9. Creación del trabajo de análisis

Una vez configurado el análisis, se abre el módulo *Job* para crear un trabajo que esté asociado con el modelo y someter ese trabajo a análisis. Para ello:

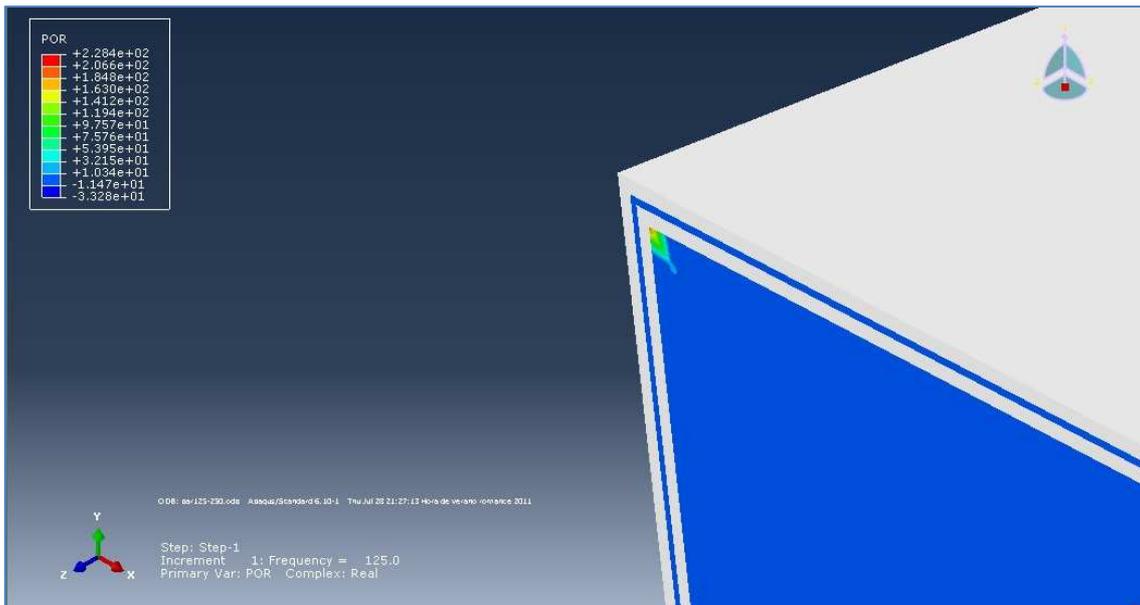
- Se entra en el módulo *Job* y se pincha en el icono . Aparece la ventana *Create Job* con la lista de los modelos que están disponibles en la base de datos de modelos.
- Se le da un nombre al trabajo y se hace clic en *Continue* para crearlo.
- Aparece la ventana *Edit job*.
  - *Description: Ejercicio de sonido, una cámara.*
  - *Job type: Full analysis*
  - *Run mode: Background*
  - *Submit time: Immediately*
- Se hace clic en *OK* para crear el trabajo.
- Se pincha sobre el icono , junto al icono  para abrir el *Job manager*, y se pulsa en *Submit* para comenzar el análisis.
- Una vez concluido con éxito el análisis, se pincha en el botón *Results* de la ventana *Job Manager* para ver los resultados.

#### 4.6.1.3.10. Visualización de los resultados del análisis

Los resultados que ofrece el programa para la presión acústica de la frecuencia 125 Hz son los de la imagen inferior:



Si se hace zoom sobre uno de los puntos de creación de la carga, se puede ver una imagen muy parecida a la que se obtuvo para el ejemplo con dos habitaciones en 3D.



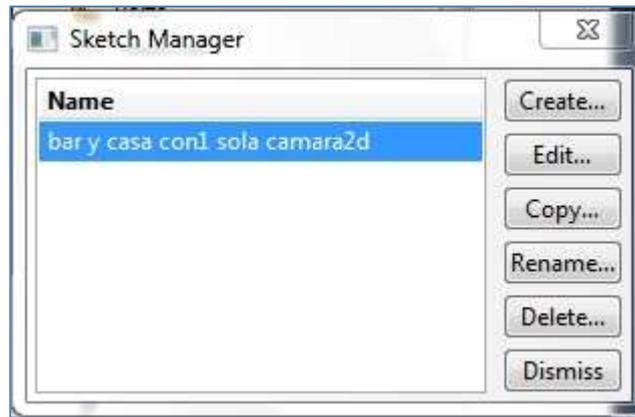
Se quiere tomar los resultados de la presión acústica para las distintas frecuencias a una distancia de la pared de 1 m y a una altura desde el suelo de 1 m en la vivienda y en el bar. Para tomar estas distancias en particular, es necesario conocer las coordenadas de los nodos y, para ello, hay que buscarlos en los archivos de escritura del programa.

Los pasos a seguir para saber qué coordenadas le ha adjudicado el programa al modelo y a los nodos que lo componen son:

- Se guarda el dibujo en planta que se usó como base para la creación en 3D del bar y la casa en formato *.dxf* y se importa a *Abaqus* como *Sketch*.
- El programa abre el *Sketch* con dos únicas herramientas de módulo, como se ve en la imagen.



- Se selecciona la herramienta  para abrir el *Sketch Manager*.



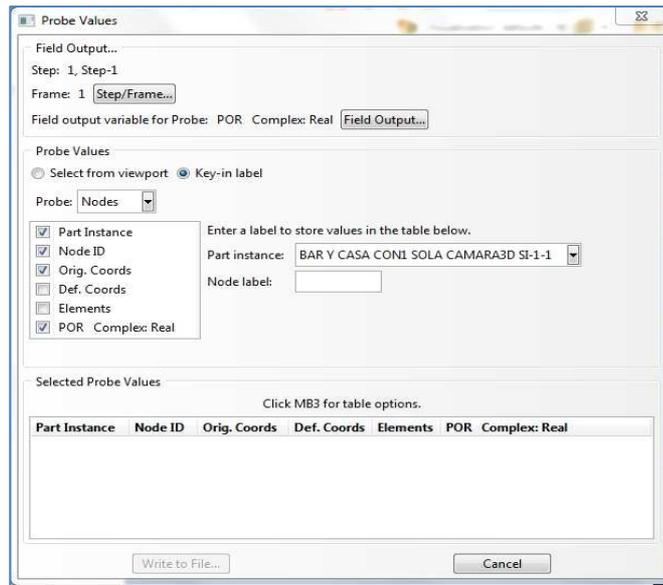
- Dentro de esta ventana, se hace clic en *Edit* para acceder a las herramientas del módulo y, pinchando en  y pasando el cursor sobre el dibujo, se averiguan las coordenadas de los puntos característicos. Se toman las coordenadas de estos puntos:
  - Esquina superior izquierda del interior del bar: (-718.52, 218.45)
  - Esquina inferior izquierda del interior del bar: (-718.52, 207.25)
  - Esquina inferior derecha del interior del bar: (-699.05, 205.25)

Por lo tanto, la coordenada Y va a estar en el intervalo [207.25, 218.45] para la casa y el bar y, como la coordenada X crece hacia la derecha, se necesitarán puntos en el interior de la casa que tengan coordenada  $X = -699.05 \text{ m}$  (cota X de la esquina inferior derecha del interior del bar) + 0.1 m (espesor del tabique) + 0.05 m (espesor de la cámara) + 0.1 m (espesor del tabique) + 1 m (separación de 1 m de la pared) = -697.8 m.

Esta será la coordenada X para todos los puntos del interior de la casa,  $X = -697.8$ . La coordenada Y estará en el intervalo  $Y = [207.25, 218.45]$  y  $Z = 1$ .

Para el interior del bar, se tomarán puntos que tengan coordenada X en el intervalo  $X = [-699.05, -700.05]$ , para que estén como máximo a un metro de la pared. La coordenada Y estará en el intervalo  $Y = [207.25, 218.45]$  y  $Z = 1$ .

- Conocidas las coordenadas a buscar, se abre el archivo con extensión *.inp* que genera *Abaqus* para cada modelo analizado. En este archivo, se encuentra el número que *Abaqus* le asigna a cada nodo y las coordenadas de dicho nodo.
- Con el número que el programa le asigna al nodo deseado, se entra en el módulo *Visualization* del ejercicio resuelto. Se activa la herramienta  y se selecciona *Probe values*.
- Aparece la pantalla *Probe values*. En ella, se selecciona *Nodes* dentro de *Probe*, como se puede ver en la imagen, se activa la casilla de *Orig*, *Coords* y la de *POR*.

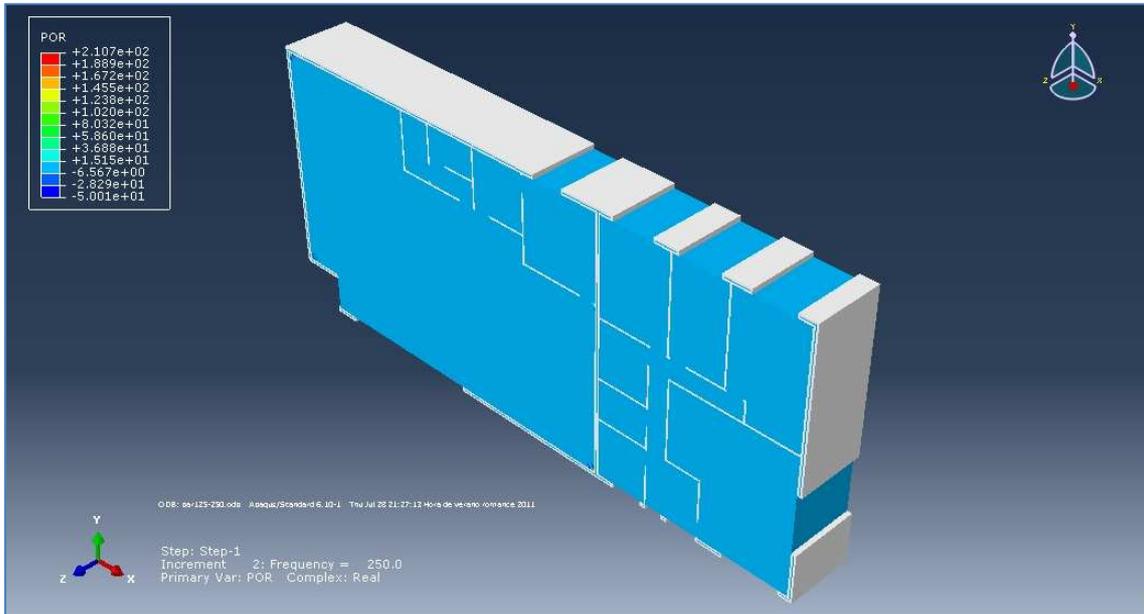


- Se selecciona *Key in Label* como la forma de tomar los nodos (se escribirá el número de nodo en la casilla *Node label*), se abre el menú desplegable de *Part Instance* y se escoge la parte del modelo a la que pertenece el nodo. Esta acción es importante, pues pueden existir varios nodos con el mismo número, ya que *Abaqus* repite los números de nodo en las distintas partes y el resultado variará completamente de tomar el nodo deseado a tomar uno equivocado.

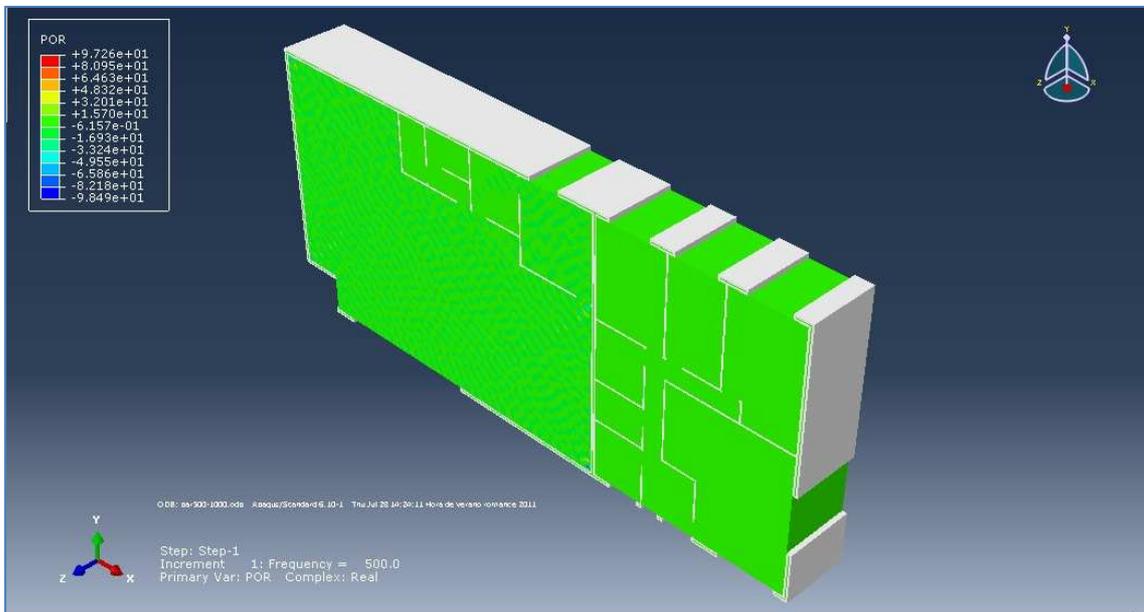
El número que *Abaqus* le asigna a los nodos será el mismo aunque se varíe la frecuencia, ya que este número lo asigna en el momento que se genera el modelo y no depende del análisis. Solo se tendrá que repetir la operación de búsqueda de nodos cuando se cambie el modelo de análisis.

Los resultados ofrecidos por el visualizador de *Abaqus* para las frecuencias de 250, 500, 1000, 1500 y 2000 Hz se muestran a continuación:

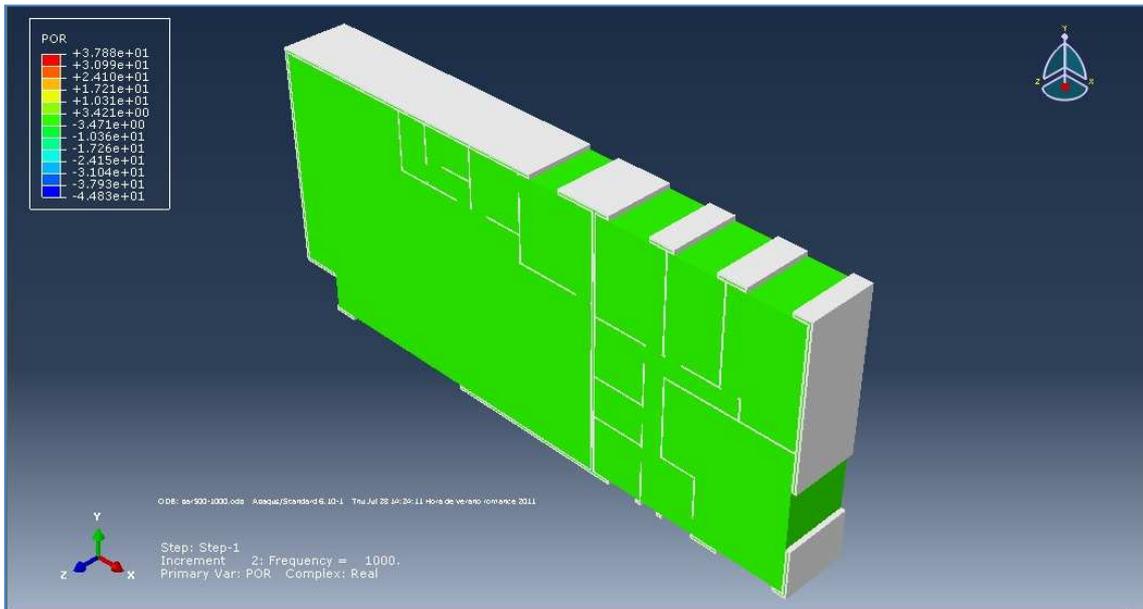
### 250 Hz



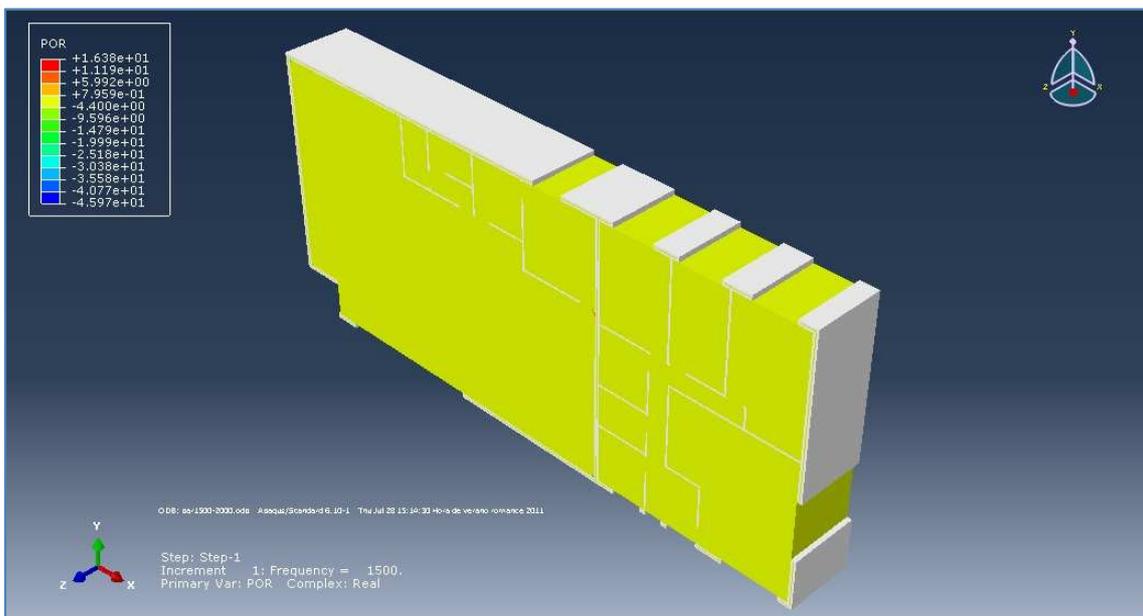
### 500 Hz



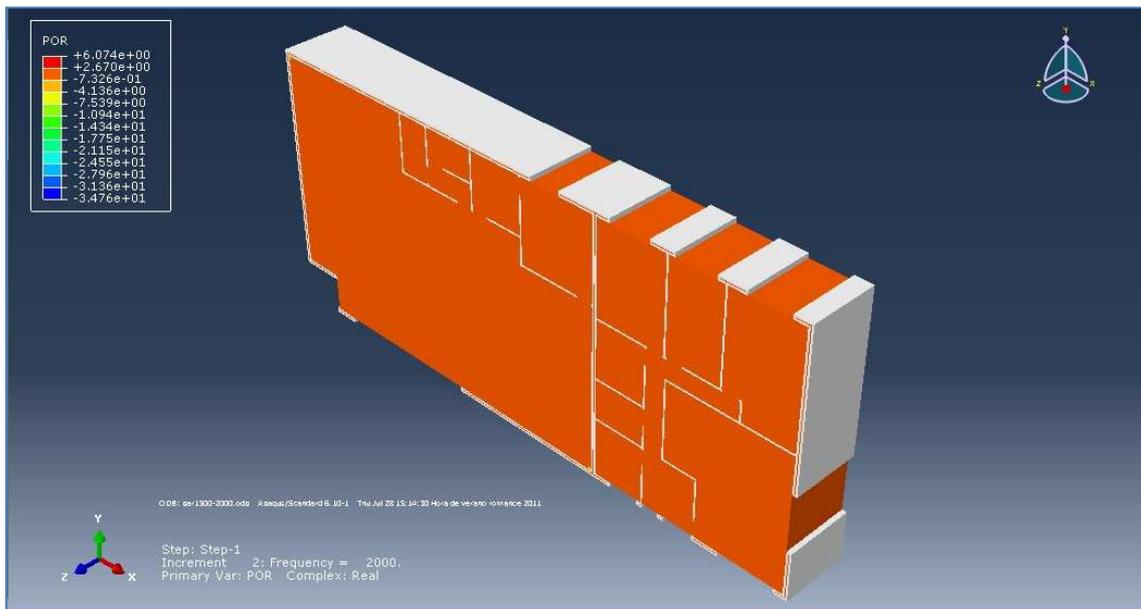
### 1000 Hz



### 1500 Hz



## 2000 Hz



Al analizar los resultados de sonido, hay que tener en cuenta que el sonido es una onda sinusoidal función de la frecuencia y del tiempo, que a su vez, es función del espacio. Por lo tanto, los resultados no solo dependerán de la eficacia del aislamiento, sino también de la distancia a los focos de origen.

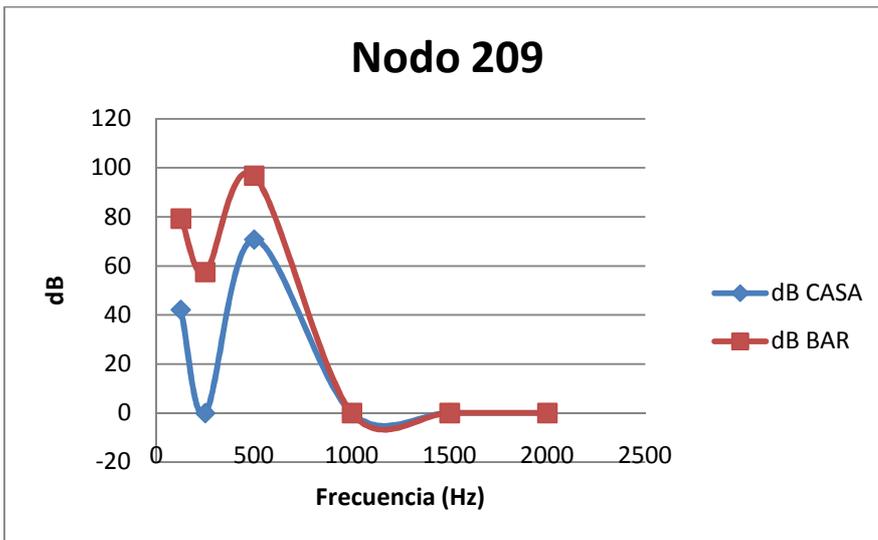
Por este motivo, se debe aclarar que no es fácil establecer conclusiones unívocas del sonido, solo se pueden buscar patrones de comportamiento.

Si se representa la curva de los decibelios para los nodos hallados en el archivo de extensión *.inp*, a un lado y otro del muro divisorio, se comprueba que la tendencia de la curva se repite.

Para realizar las gráficas, se han tomado nodos a un lado y otro del muro, a un metro de distancia de la pared divisoria y con la misma coordenada Y, para que queden a la misma altura en la casa y en el bar. Para nombrar los nodos en las gráficas, se ha utilizado la parte entera de su coordenada Y, que debe estar entre 218.45 y 205.25.

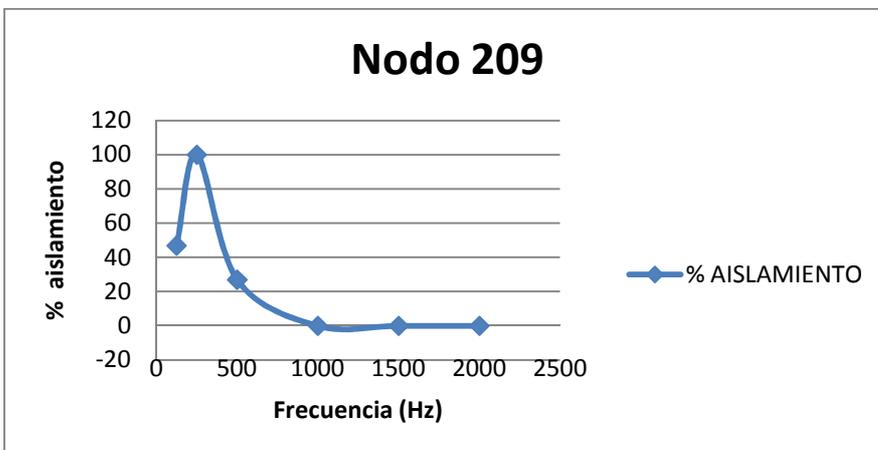
**Nodo 209**

FRECUENCIA	PA CASA	PA BAR	dB CASA	dB BAR	% AISL.
125	0,00254813	0,183911	42,1038317	79,2715542	46,8865823
250	0,000012652	0,0148943	0	57,439802	100
500	0,0685977	1,37747	70,7055912	96,7610431	26,9276261
1000	2,97273E-07	6,94076E-07	0	0	0
1500	1,15872E-08	2,84624E-08	0	0	0
2000	1,68273E-10	1,90804E-09	0	0	0



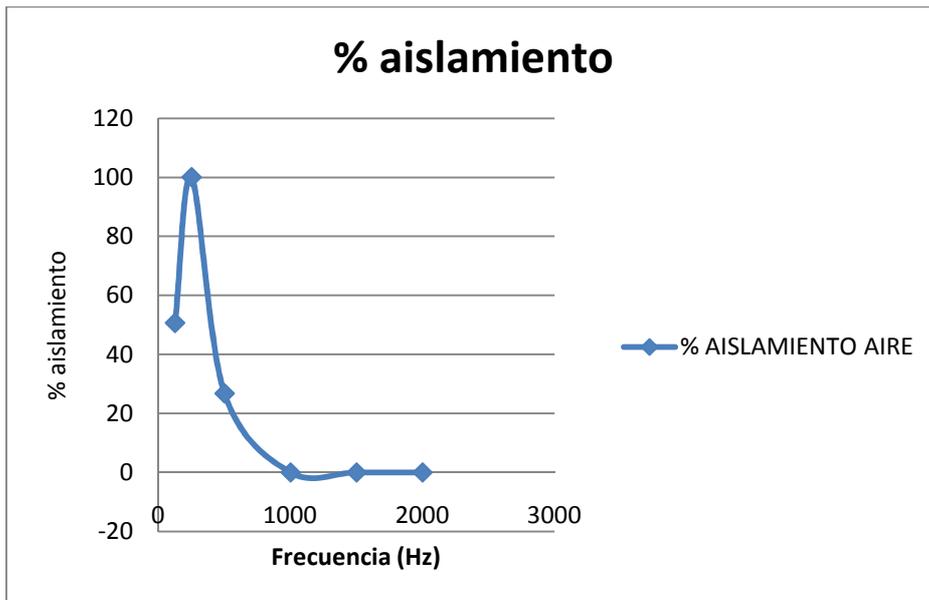
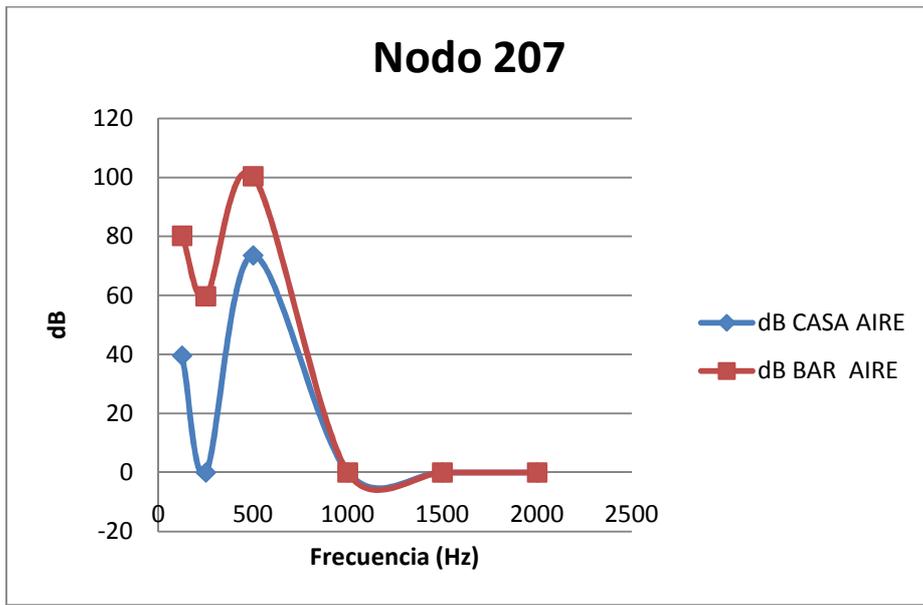
Se ha hallado el aislamiento para cada frecuencia haciendo:

$$\% \text{aislamiento} = \frac{(dBbar - dBcasa)}{dBbar} \cdot 100$$



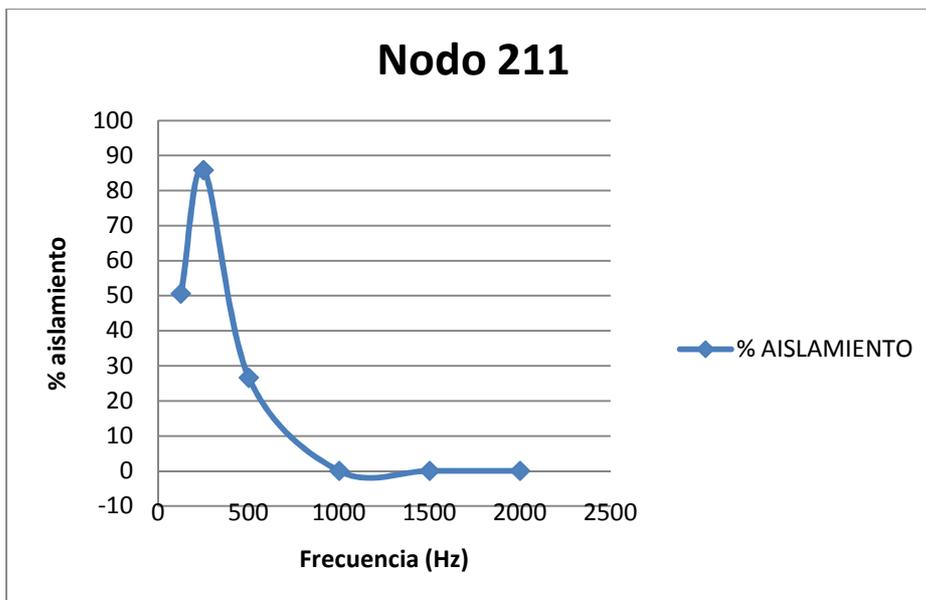
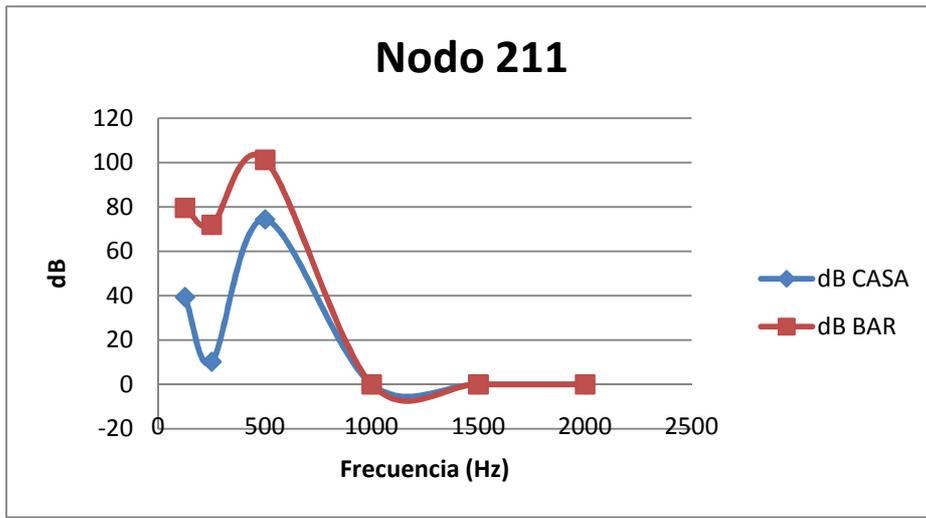
**Nodo 207**

FRECUENCIA	PA CASA	PA BAR	dB CASA AIRE	dB BAR AIRE	% AISL.
125	0,00190711	0,205227	39,586915	80,22409	50,654579
250	1,37E-05	0,0192834	0	59,6830723	100
500	0,0948531	2,08582	73,5204307	100,364937	26,7468967
1000	1,44496E-06	8,09146E-07	0	0	0
1500	3,66008E-07	2,5005E-09	0	0	0
2000	2,34104E-08	9,23506E-10	0	0	0



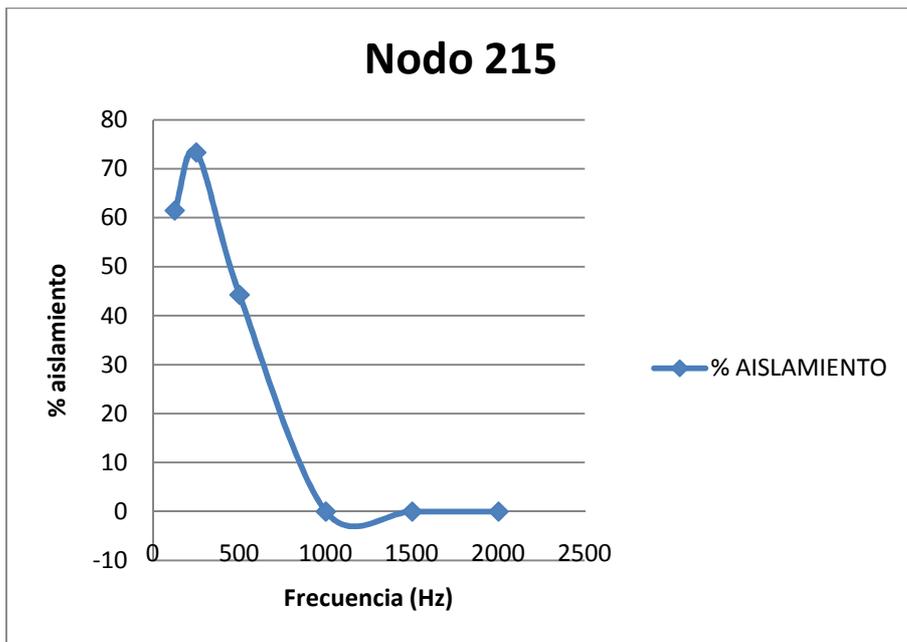
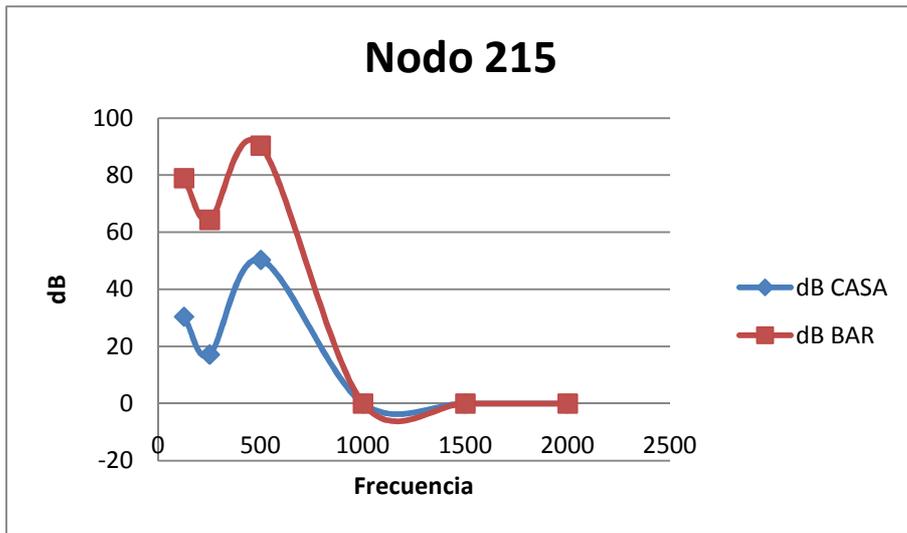
**Nodo 211**

FRECUENCIA	PA CASA	PA BAR	dB CASA	dB BAR	% AISL.
125	0,00184309	0,188897	39,2903309	79,5039013	50,5806252
250	6,47218E-05	0,079029	10,2004118	71,9351298	85,8199855
500	0,103794	2,29259	74,3028451	101,185928	26,5680055
1000	2,06663E-10	2,20727E-06	0	0	0
1500	6,38735E-14	1,20716E-08	0	0	0
2000	1,46236E-16	2,75256E-09	0	0	0



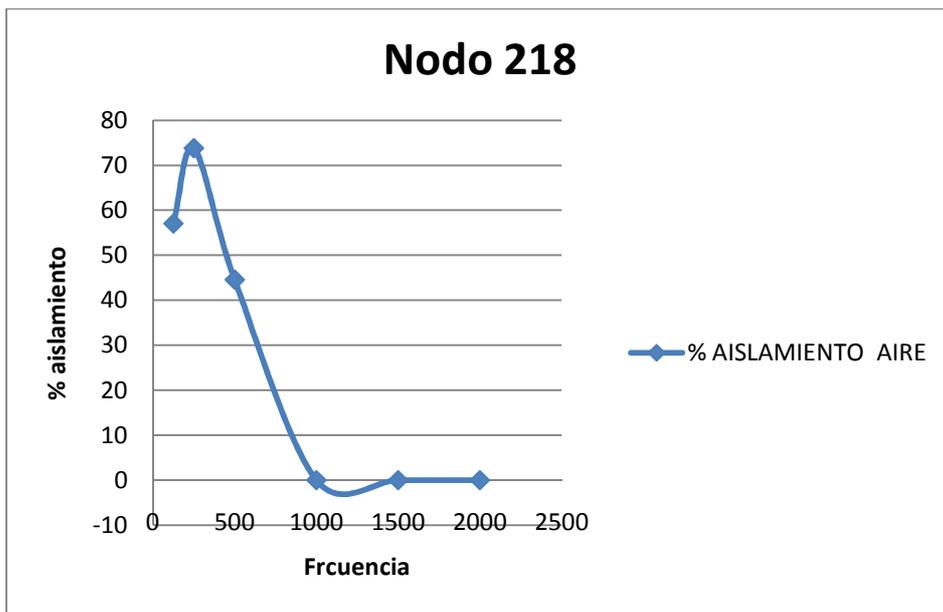
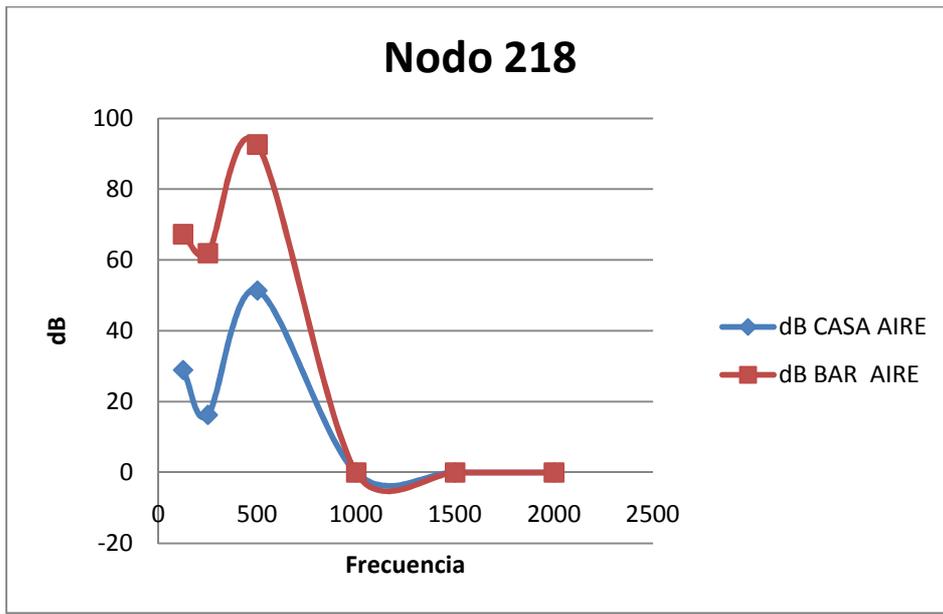
**Nodo 215**

FRECUENCIA	PA CASA	PA BAR	dB CASA	dB BAR	% AISL.
125	0,000662217	0,176456	30,3994066	78,9121287	61,4768894
250	0,000144079	0,0330008	17,1514138	64,3498894	73,3466305
500	0,00655864	0,65509	50,315676	90,3054195	44,2827726
1000	5,11047E-12	2,82589E-07	0	0	0
1500	3,39965E-13	2,9965E-08	0	0	0
2000	1,14782E-16	3,77582E-09	0	0	0



**Nodo 218**

FRECUENCIA	PA CASA	PA BAR	dB CASA AIRE	dB BAR AIRE	% AISL.
125	0,000557542	0,0463262	28,9049519	67,2959336	57,0479964
250	0,000129624	0,0248994	16,2331085	61,9031777	73,7766153
500	0,00738298	0,853695	51,3440339	92,6054548	44,5561452
1000	4,95391E-06	1,84E-05	0	0	0
1500	3,12459E-07	1,05142E-05	0	0	0
2000	8,12452E-08	9,54043E-06	0	0	0



#### 4.6.1.3.11. Modificación del material de las cámaras

Ahora se cambiará el material de las cámaras, aire, por poliuretano proyectado, uno de los aislantes más utilizados en construcción. Este material tiene grandes propiedades como aislante térmico y se quiere analizar su eficacia como aislante acústico.

Las propiedades de este material, necesarias para definirlo en *Abaqus*, son:

- Densidad:  $\rho = 30 \text{ kg/m}^3$
- Módulo de Bulk:  $2 \cdot 10^9 \text{ Pa}$

Para llevar a cabo el ejercicio con el poliuretano proyectado, se debe crear un tercer material en el módulo *Property*, crear una sección para este material y asignar la sección a las partes que representan las cámaras. Después, basta crear un nuevo trabajo de análisis para obtener los resultados.

Si se hacen gráficas comparativas de los decibelios que llegan a la casa y del aislamiento que se produce entre el poliuretano proyectado y el aire, se obtienen los siguientes resultados:

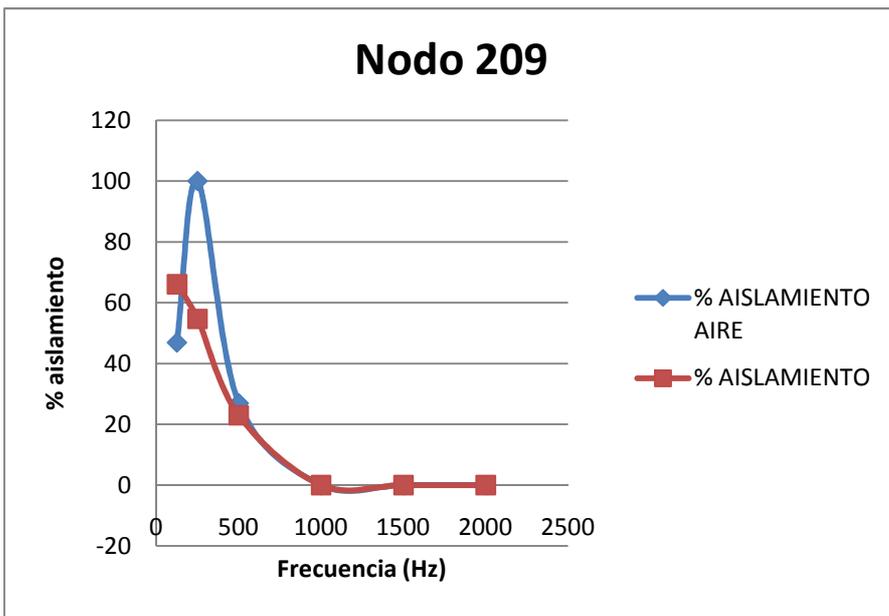
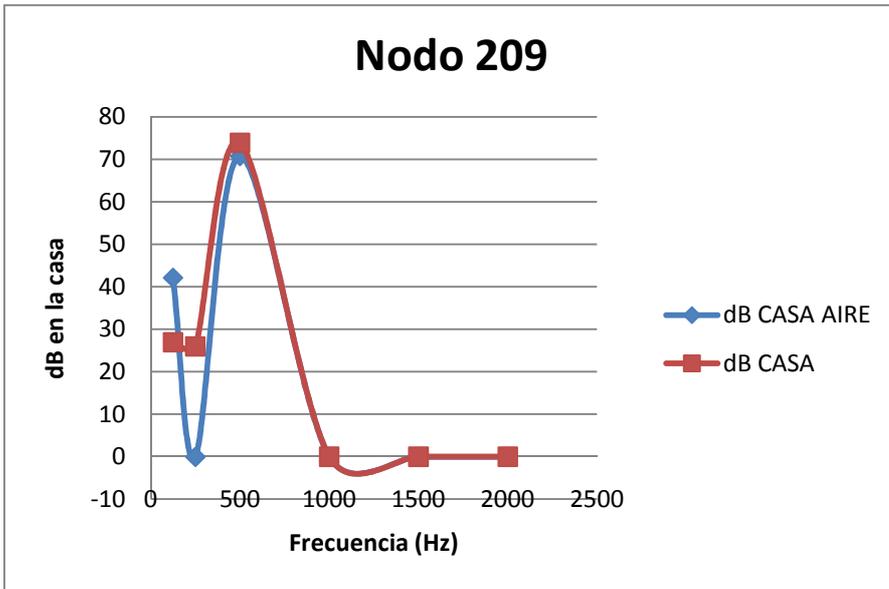
#### Nodo 209

##### AIRE

FRECUENCIA	PA CASA	PA BAR	dB CASA AIRE	dB BAR AIRE	% AISL. AIRE
125	0,00254813	0,183911	42,1038317	79,2715542	46,88658229
250	1,2652E-05	0,0148943	0	57,439802	100
500	0,0685977	1,37747	70,7055912	96,7610431	26,9276261
1000	2,9727E-07	6,9408E-07	0	0	0
1500	1,1587E-08	2,8462E-08	0	0	0
2000	1,6827E-10	1,908E-09	0	0	0

##### POLIURETANO EXPANDIDO

FRECUENCIA	PA CASA	PA BAR	dB CASA	dB BAR	% AISL.
125	0,00044502	0,186031	26,9469516	79,3711065	66,0494192
250	0,00039785	0,0146117	25,9737	57,273415	54,6496398
500	0,098725	1,24194	73,8679429	95,8614124	22,942985
1000	5,10E-07	1,27E-06	0	0	0
1500	2,34E-09	1,12E-09	0	0	0
2000	3,52E-10	8,72E-10	0	0	0



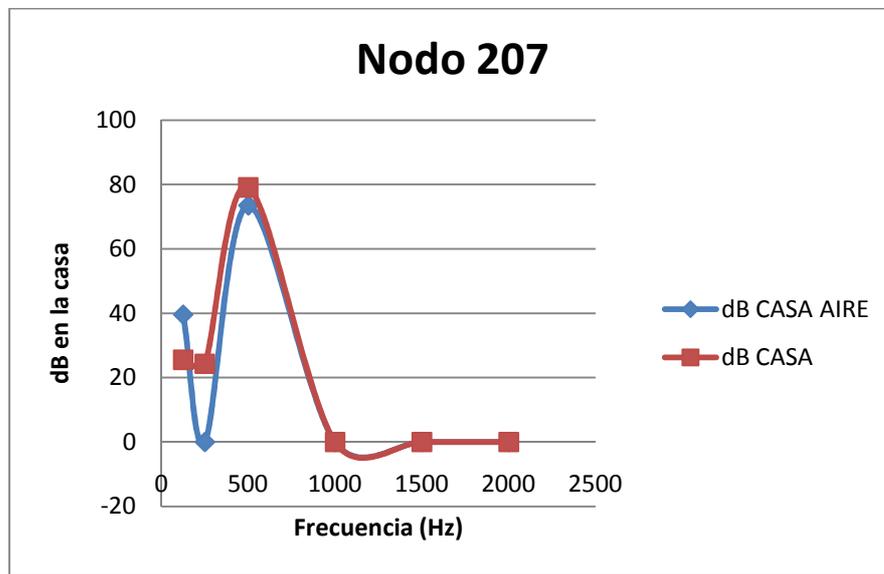
Nodo 207

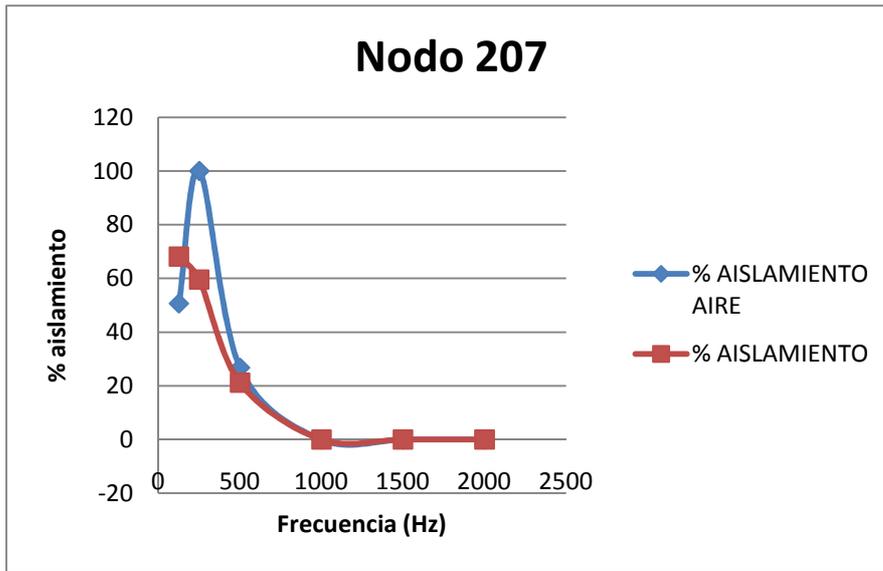
AIRE

FRECUENCIA	PA CASA	PA BAR	dB CASA AIRE	dB BAR AIRE	% AISL. AIRE
125	0,00190711	0,205227	39,586915	80,22409	50,65457901
250	1,37E-05	0,0192834	0	59,6830723	100
500	0,0948531	2,08582	73,5204307	100,364937	26,74689674
1000	1,445E-06	8,0915E-07	0	0	0
1500	3,6601E-07	2,5005E-09	0	0	0
2000	2,341E-08	9,2351E-10	0	0	0

POLIURETANO EXPANDIDO

FRECUENCIA	PA CASA	PA BAR	dB CASA	dB BAR	% AISL.
125	0,00190711	0,205227	39,586915	80,22409	50,654579
250	1,37E-05	0,0192834	0	59,6830723	100
500	0,180464	2,0732	79,1072117	100,312224	21,1390113
1000	2,54E-06	1,77E-06	0	0	0
1500	9,86E-08	5,26E-09	0	0	0
2000	1,05E-08	3,89E-11	0	0	0





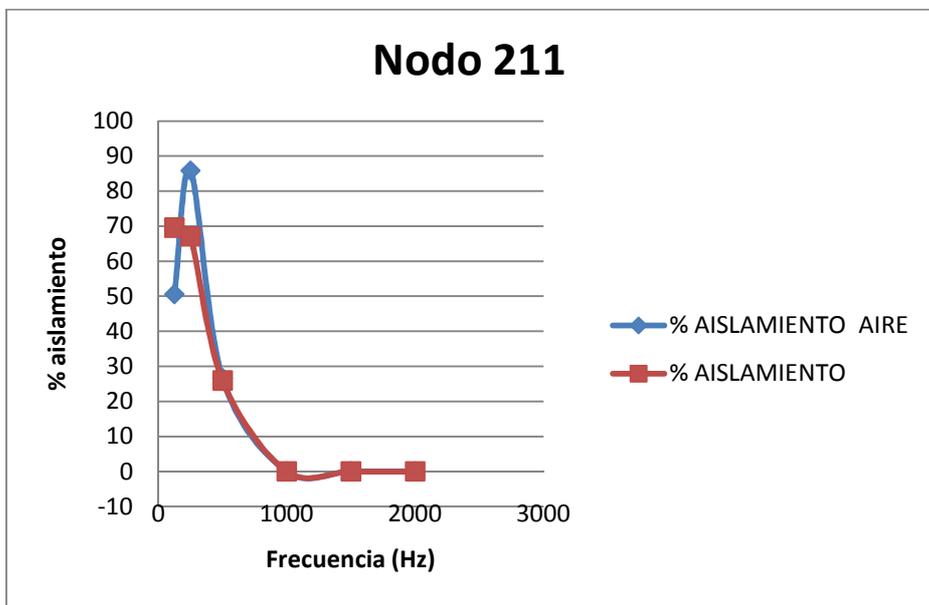
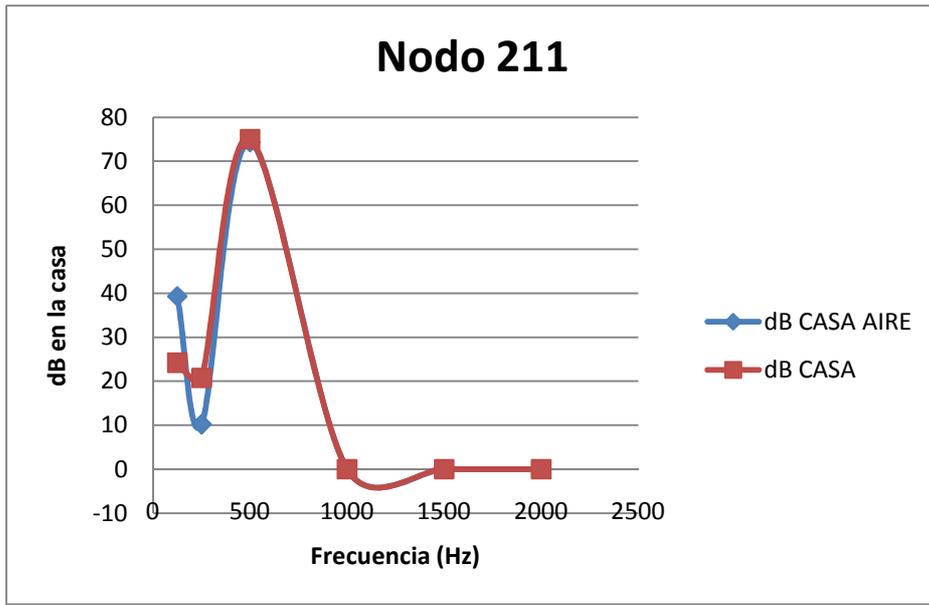
### Nodo 211

#### AIRE

FRECUENCIA	PA CASA	PA BAR	dB CASA AIRE	dB BAR AIRE	% AISL. AIRE
125	0,00184309	0,188897	39,2903309	79,5039013	50,58062523
250	6,4722E-05	0,079029	10,2004118	71,9351298	85,81998551
500	0,103794	2,29259	74,3028451	101,185928	26,56800549
1000	2,0666E-10	2,2073E-06	0	0	0
1500	6,3874E-14	1,2072E-08	0	0	0
2000	1,4624E-16	2,7526E-09	0	0	0

#### POLIURETANO EXPANDIDO

FRECUENCIA	PA CASA	PA BAR	dB CASA	dB BAR	% AISLAMIENTO
125	0,00032452	0,189788	24,2043365	79,5447751	69,5714313
250	0,0002175	0,0281443	20,7286652	62,9672091	67,0802224
500	0,1129067	2,3239	75,0337944	101,303749	25,931868
1000	2,37E-10	1,67E-06	0	0	0
1500	2,99E-13	1,36E-09	0	0	0
2000	2,91E-16	1,05E-09	0	0	0



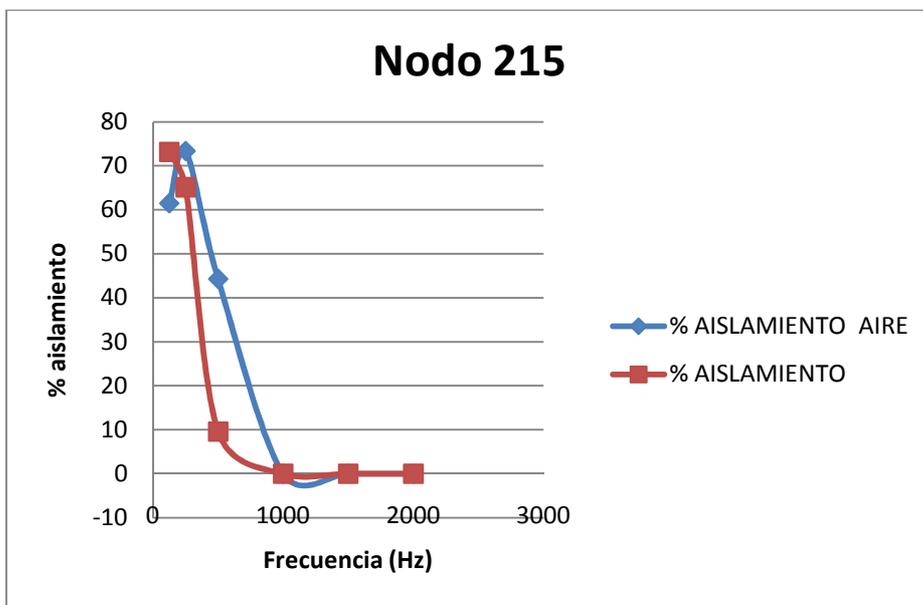
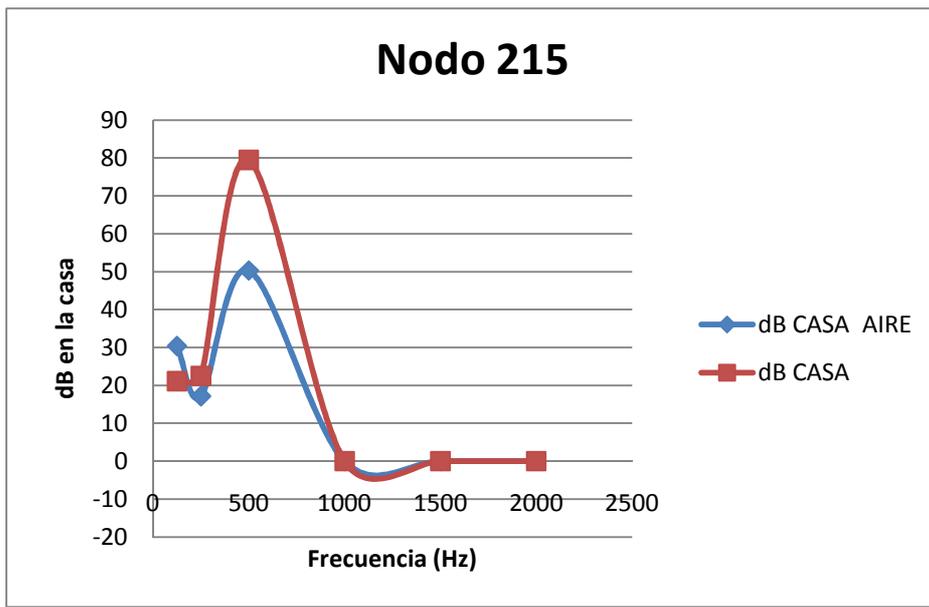
## Nodo 215

### AIRE

FRECUENCIA	PA CASA	PA BAR	dB CASA AIRE	dB BAR AIRE	% AISL. AIRE
125	0,00066222	0,176456	30,3994066	78,9121287	61,47688942
250	0,00014408	0,0330008	17,1514138	64,3498894	73,34663052
500	0,00655864	0,65509	50,315676	90,3054195	44,28277257
1000	5,1105E-12	2,8259E-07	0	0	0
1500	3,3997E-13	2,9965E-08	0	0	0
2000	1,1478E-16	3,7758E-09	0	0	0

**POLIURETANO EXPANDIDO**

FRECUENCIA	PA CASA	PA BAR	dB CASA	dB BAR	% AISL.
125	0,00022754	0,17185	21,120517	78,6823908	73,1572506
250	0,00026762	0,033998	22,529739	64,6084675	65,1288139
500	0,188743	0,497511	79,4968172	87,9154538	9,57583258
1000	2,43E-10	3,36E-07	0	0	0
1500	1,08E-13	6,85E-08	0	0	0
2000	8,22E-16	6,44E-09	0	0	0



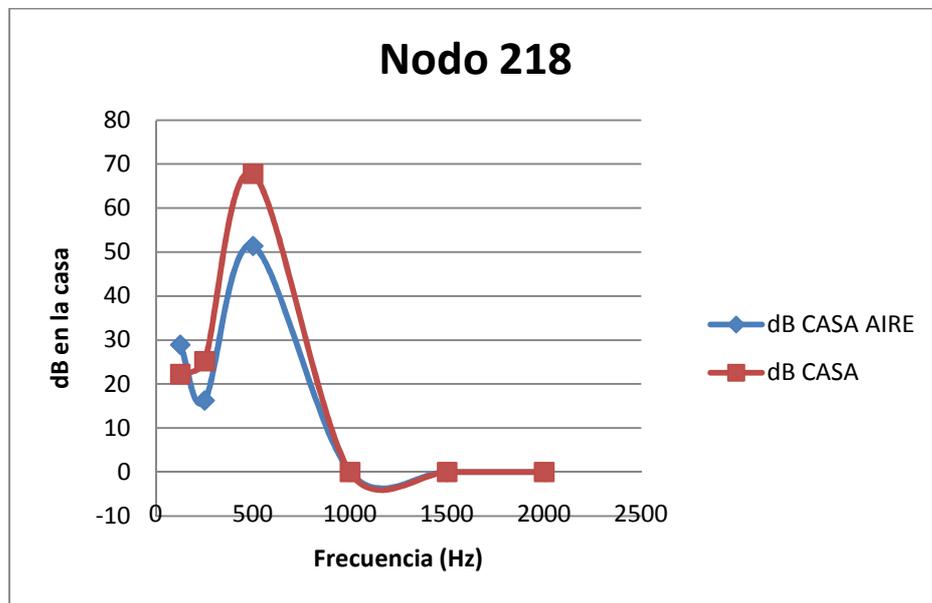
## Nodo 218

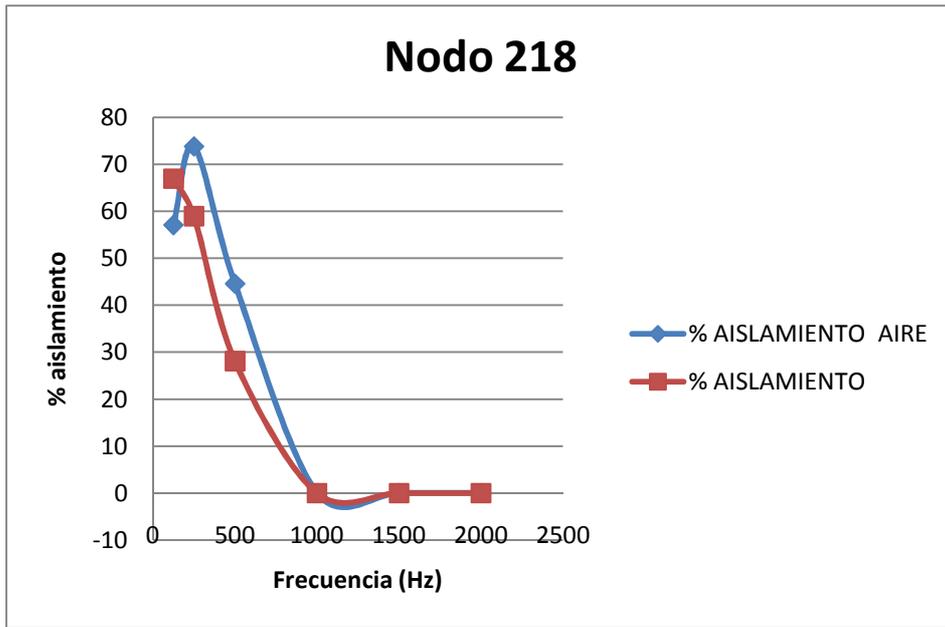
### AIRE

FRECUENCIA	PA CASA	PA BAR	dB CASA AIRE	dB BAR AIRE	% AISL. AIRE
125	0,00055754	0,0463262	28,9049519	67,2959336	57,04799637
250	0,00012962	0,0248994	16,2331085	61,9031777	73,77661525
500	0,00738298	0,853695	51,3440339	92,6054548	44,55614519
1000	4,9539E-06	1,84E-05	0	0	0
1500	3,1246E-07	1,0514E-05	0	0	0
2000	8,1245E-08	9,5404E-06	0	0	0

### POLIURETANO EXPANDIDO

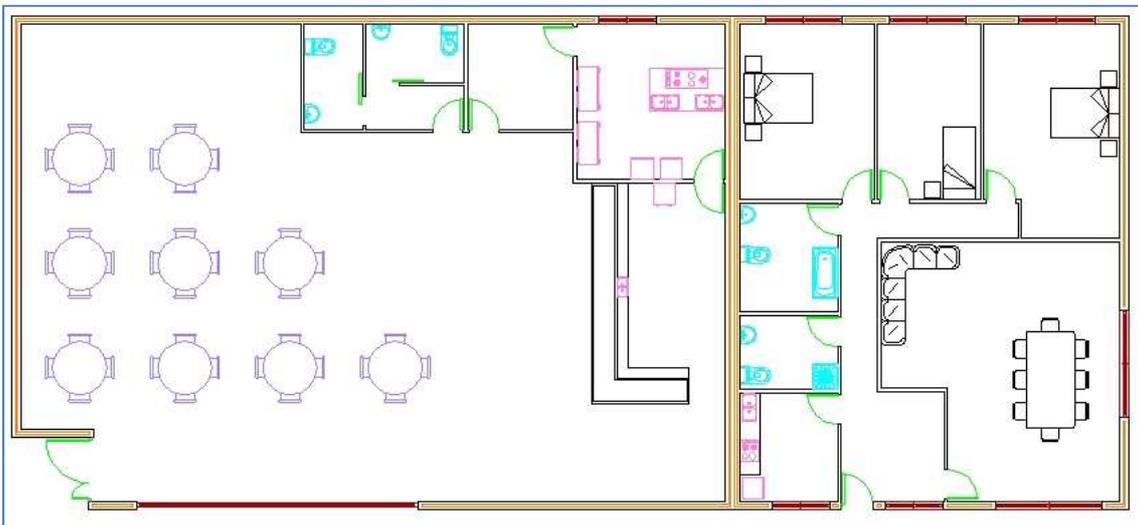
FRECUENCIA	PA CASA	PA BAR	dB CASA	dB BAR	% AISL.
125	0,0002586	0,0460653	22,2319705	67,2468782	66,9397731
250	0,00036325	0,0233743	25,1836082	61,3541724	58,9537154
500	0,0488756	1,03069	67,7612421	94,2419613	28,0986504
1000	2,51E-10	6,00E-06	0	0	0
1500	6,10E-14	1,06E-06	0	0	0
2000	2,56E-16	1,14E-09	0	0	0





#### 4.6.1.3.12. Cámara doble con tabique intermedio de 10 cm

A continuación, se vuelve a realizar todo el proceso de diseño y análisis para esta nueva tipología de aislamiento.



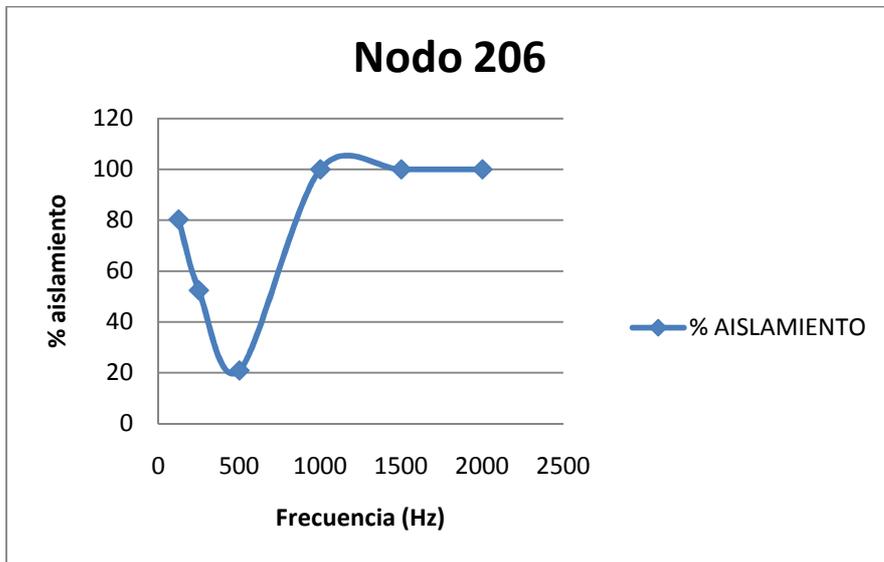
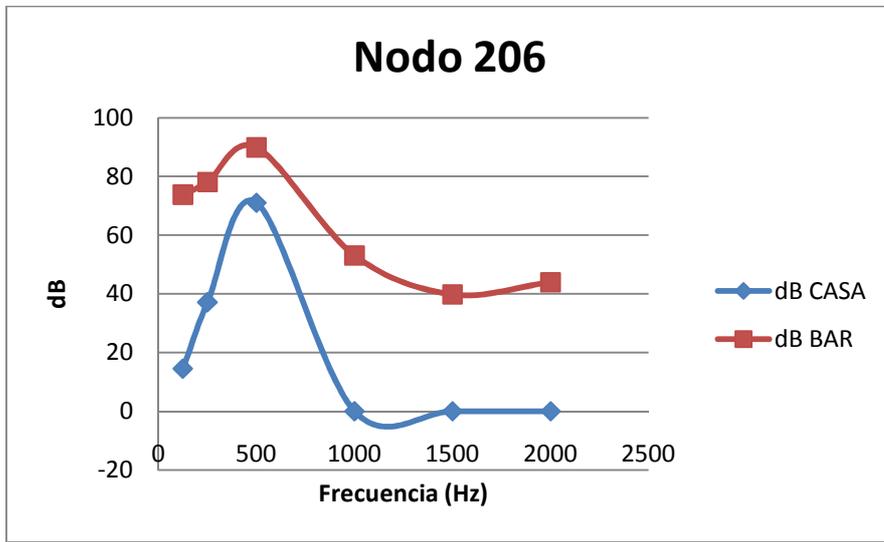
Para los resultados obtenidos con este aislamiento, se representa la curva de los decibelios para los nodos hallados en el archivo de extensión *.inp*, a un lado y otro del muro divisorio.

De nuevo, se han tomado nodos a un lado y otro del muro, a un metro de distancia de la pared divisoria y con la misma coordenada Y, para que queden a la misma altura en la casa y en el bar.

Después, se ha sustituido el aire de las cámaras por poliuretano expandido y se han comparado los resultados.

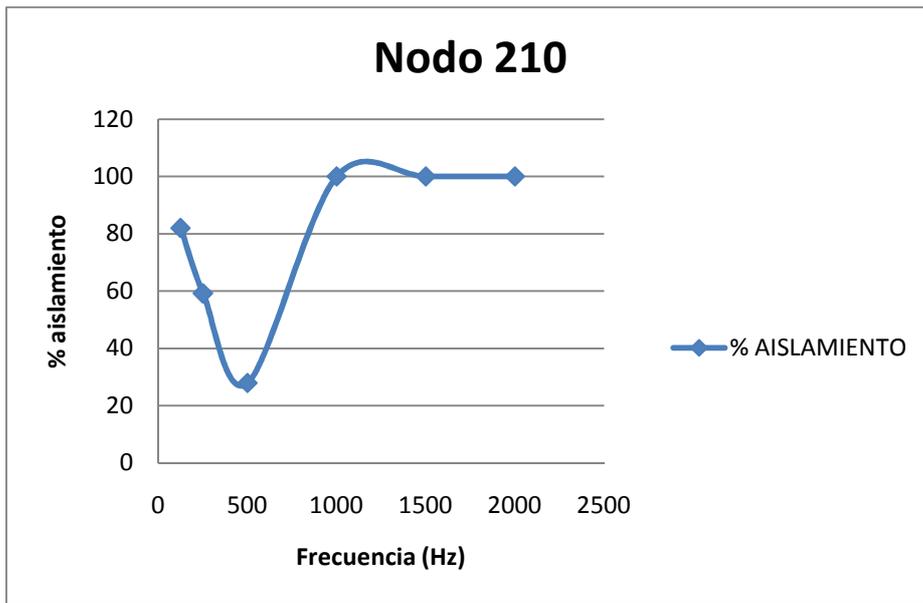
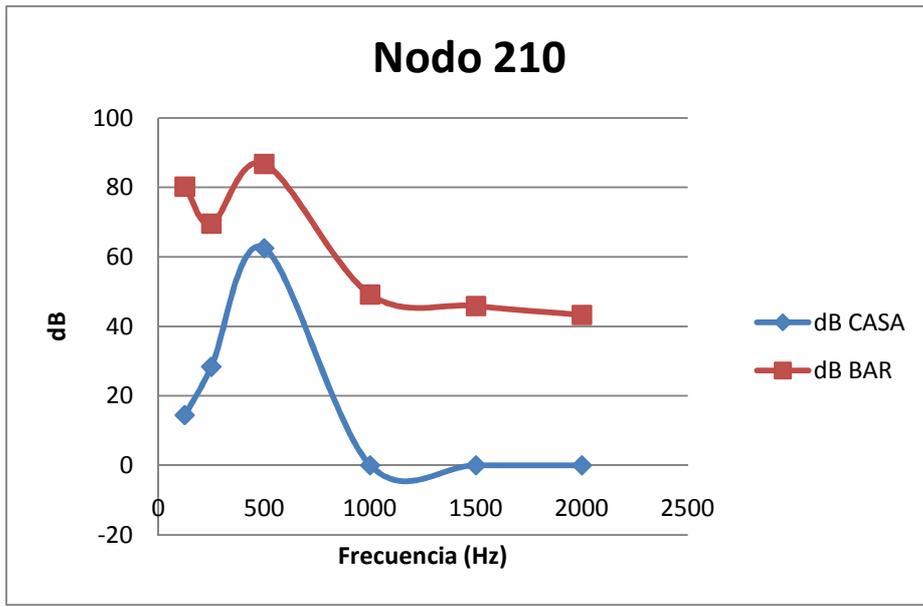
**Nodo 206**

FRECUENCIA	PA CASA	PA BAR	dB CASA	dB BAR	% AISL.
125	0,000106392	0,0980527	14,5175795	73,8085912	80,3307727
250	0,00144021	0,160564	37,1479165	78,0923637	52,430795
500	0,071409	0,625427	71,0544591	89,9029326	20,96536
1000	9,64501E-12	0,00899521	0	53,0596262	100
1500	2,10477E-13	0,00195278	0	39,7924665	100
2000	5,66896E-16	0,00315519	0	43,9599104	100



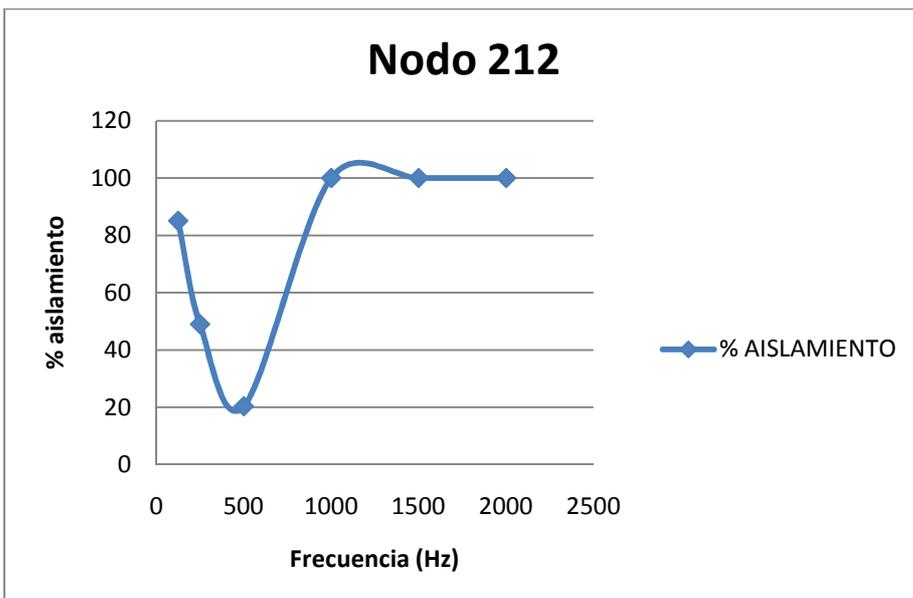
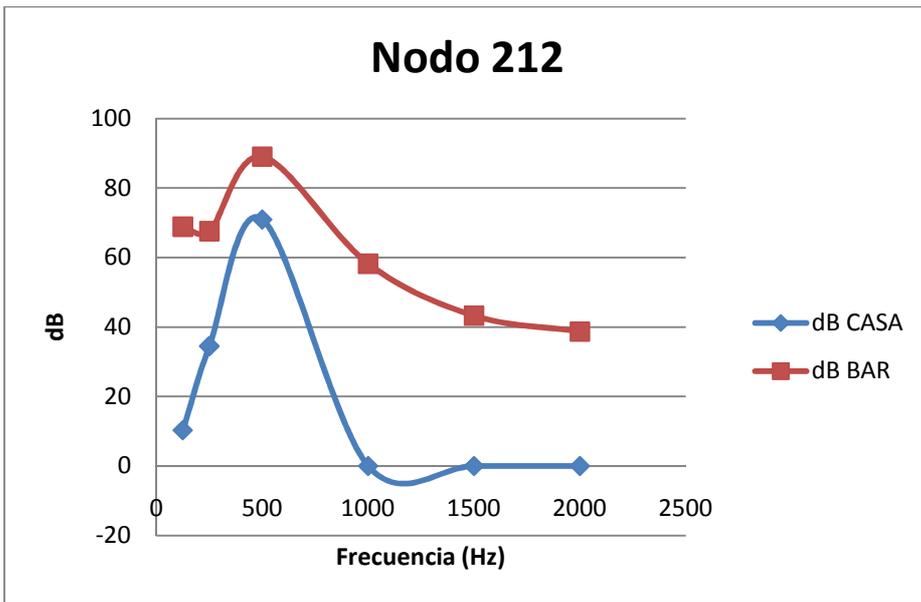
**Nodo 210**

FRECUENCIA	PA CASA	PA BAR	dB CASA	dB BAR	% AISL.
125	0,000105523	0,205097	14,4463427	80,2185862	81,9912774
250	0,000524689	0,0600128	28,3774393	69,5442779	59,1951486
500	0,0266862	0,43346	62,5051348	86,7183806	27,9216997
1000	2,10665E-06	0,00575493	0	49,180201	100
1500	5,31808E-07	0,00392336	0	45,8525633	100
2000	3,18759E-08	0,00291057	0	43,2589611	100



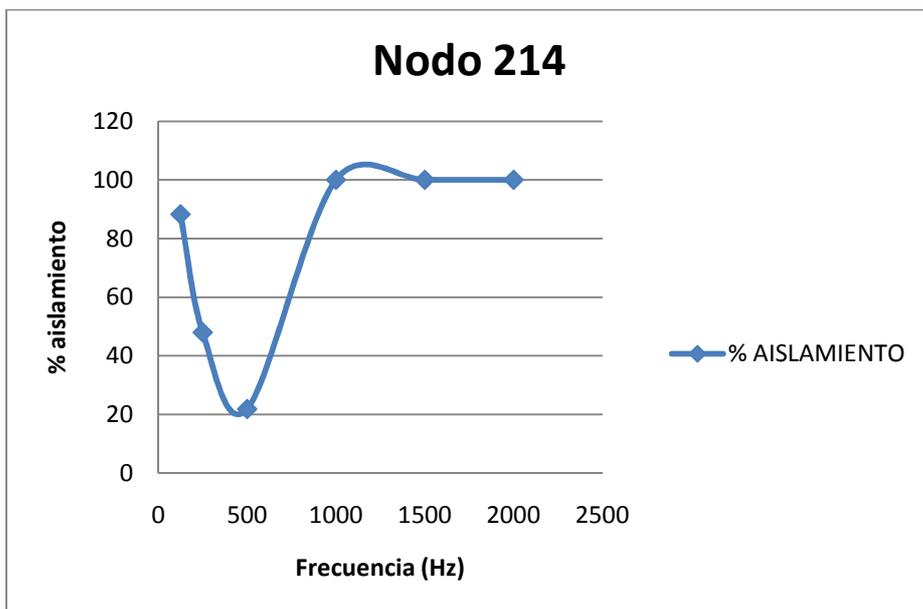
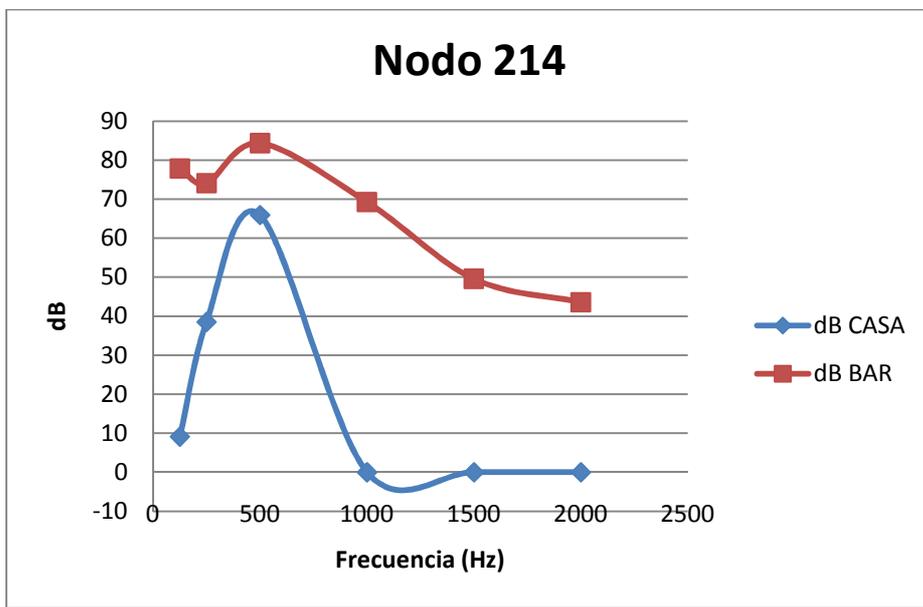
**Nodo 212**

FRECUENCIA	PA CASA	PA BAR	dB CASA	dB BAR	% AISL.
125	6,54E-05	0,0555031	10,2962394	68,8657449	85,0488231
250	0,00106339	0,0479311	34,5132515	67,591748	48,9386611
500	0,070559	0,5660862	70,9504484	89,0370514	20,3135692
1000	2,25695E-10	0,0162892	0	58,2173952	100
1500	1,78411E-13	0,00291732	0	43,2790815	100
2000	2,40676E-17	0,00171956	0	38,6877468	100



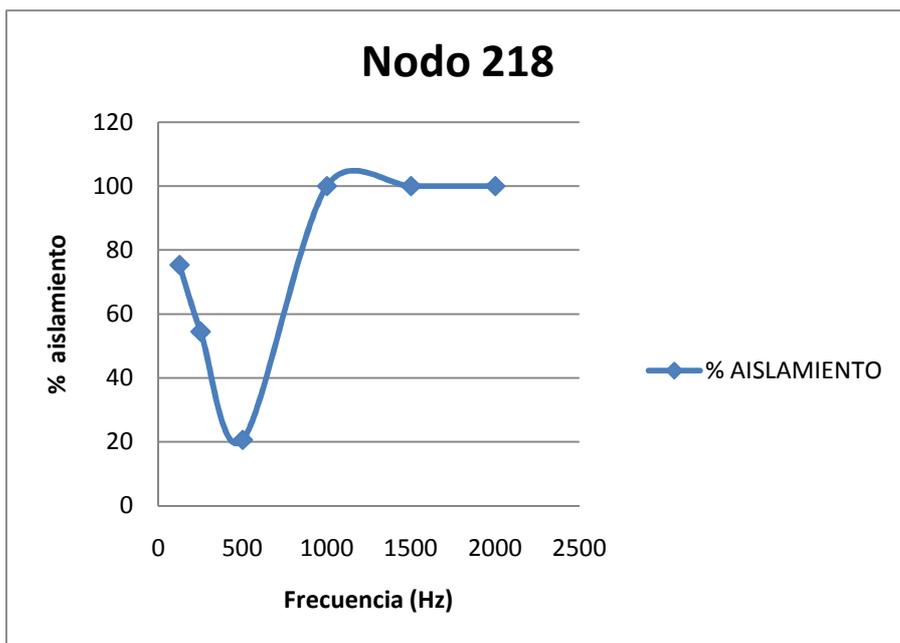
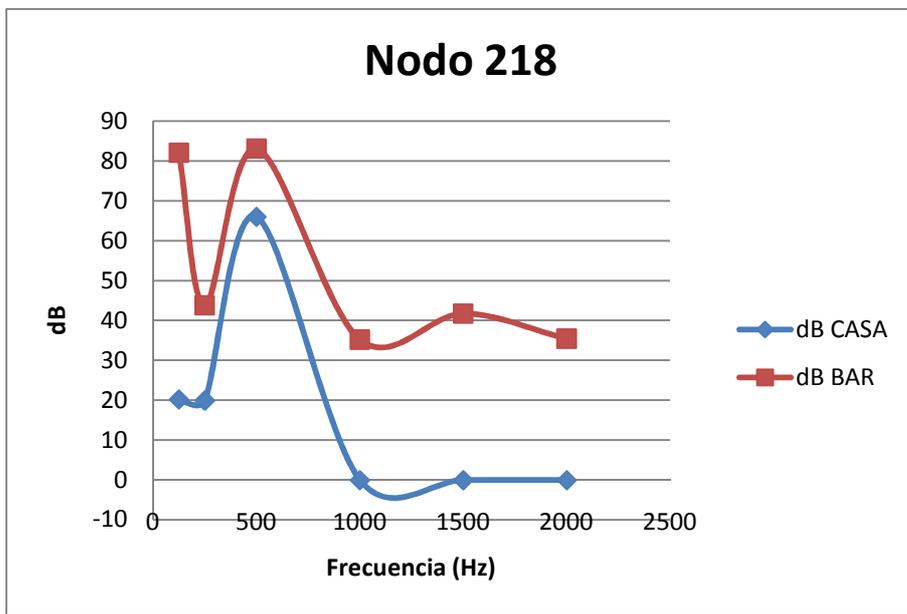
Nodo 214

FRECUENCIA	PA CASA	PA BAR	dB CASA	dB BAR	% AISL.
125	5,72008E-05	0,156734	9,12744214	77,8826644	88,2805215
250	0,00168874	0,101641	38,5306559	74,1207787	48,0163908
500	0,0393779	0,330329	65,8844511	84,3583341	21,899298
1000	2,49274E-10	0,0582953	0	69,2920709	100
1500	2,07489E-12	0,00602189	0	49,5740564	100
2000	1,06861E-14	0,00301933	0	43,5776117	100



Nodo 218

FRECUENCIA	PA CASA	PA BAR	dB CASA	dB BAR	% AISL.
125	0,000205413	0,25379954	20,2319586	82,0692167	75,3476889
250	0,000198788	0,0031016	19,9472034	43,8111158	54,4699947
500	0,0397521	0,285398	65,9666016	83,0884186	20,6067431
1000	8,07175E-06	0,00115074	0	35,1989443	100
1500	6,91126E-07	0,00244136	0	41,7320366	100
2000	6,41121E-08	0,00118362	0	35,443646	100



#### 4.6.1.3.13. Sustitución del material de las cámaras

Las gráficas comparativas que se obtienen al sustituir el material de las cámaras por poliuretano expandido son:

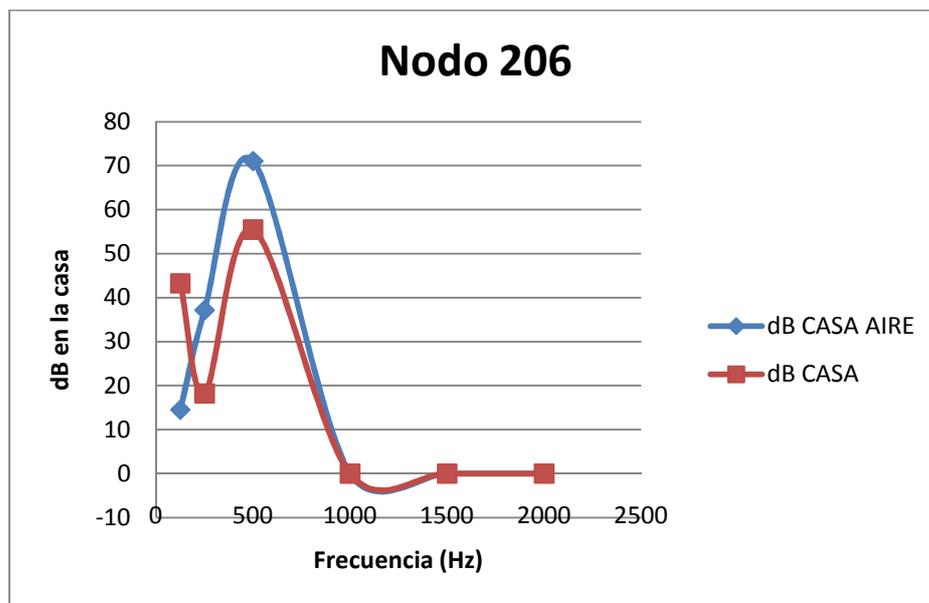
##### Nodo 206

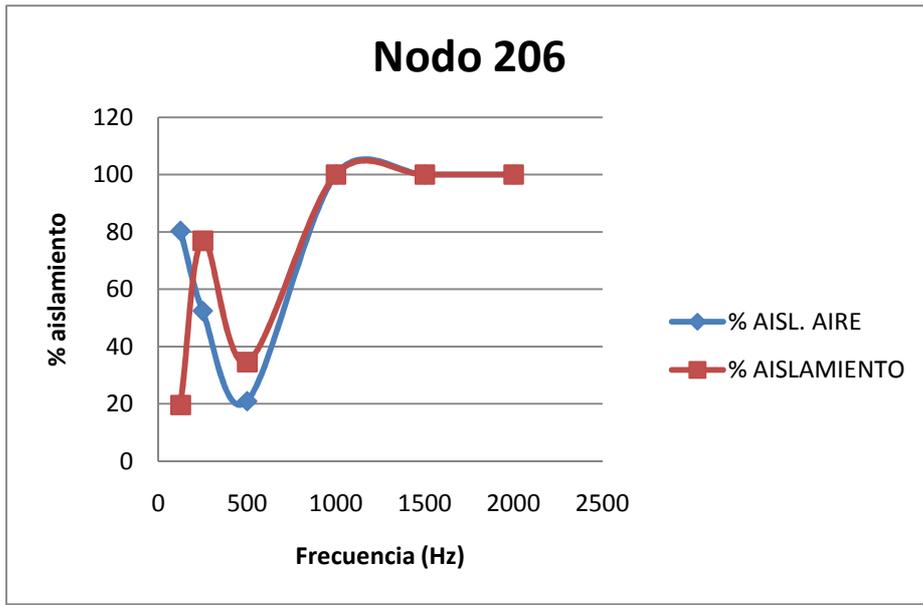
##### AIRE

FRECUENCIA	PA CASA	PA BAR	dB CASA AIRE	dB BAR AIRE	% AISL. AIRE
125	0,00010639	0,0980527	14,5175795	73,8085912	80,33077274
250	0,00144021	0,160564	37,1479165	78,0923637	52,43079504
500	0,071409	0,625427	71,0544591	89,9029326	20,96536002
1000	9,645E-12	0,00899521	0	53,0596262	100
1500	2,1048E-13	0,00195278	0	39,7924665	100
2000	5,669E-16	0,00315519	0	43,9599104	100

##### POLIURETANO

FRECUENCIA	PA CASA	PA BAR	dB CASA	dB BAR	% AISL.
125	0,00291261	0,00977683	43,2650468	53,7833614	19,5568188
250	0,00016283	0,174584	18,2139819	78,8194889	76,891525
500	0,0118787	0,34567	55,4747784	84,7526339	34,5450686
1000	7,46E-11	0,0201957	0	60,0845783	100
1500	1,30E-12	0,00382707	0	45,6367282	100
2000	8,31E-15	0,00283759	0	43,038393	100





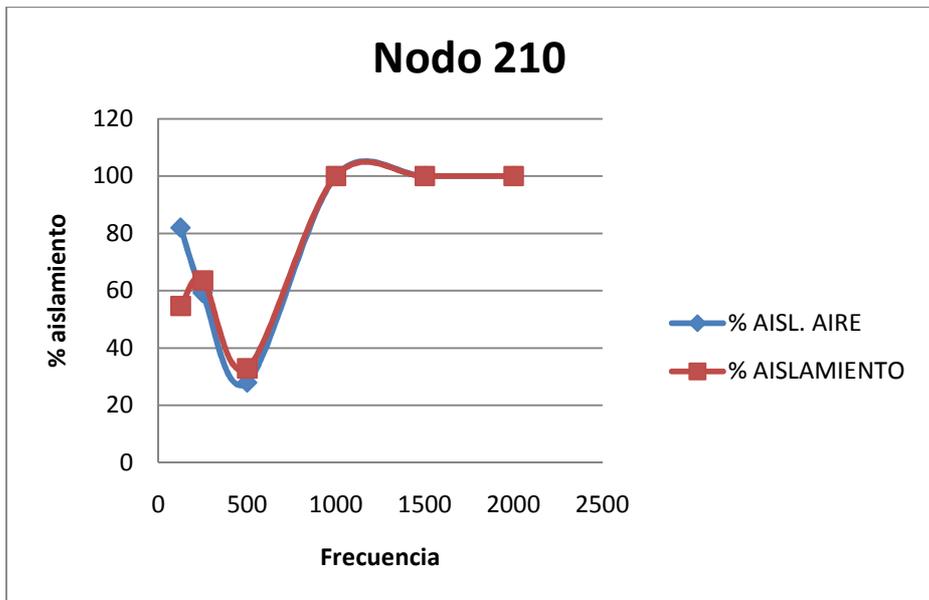
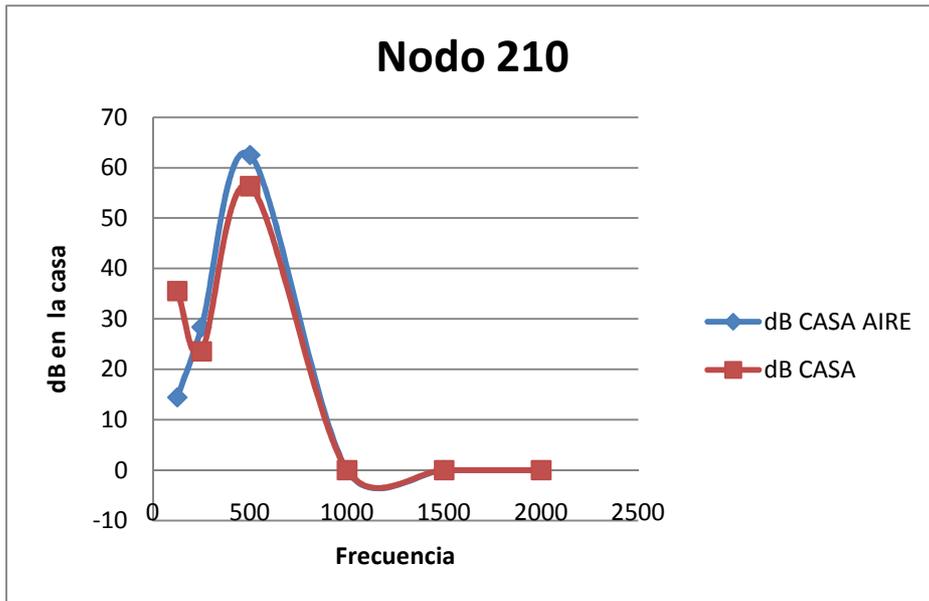
### Nodo 210

#### AIRE

FRECUENCIA	PA CASA	PA BAR	dB CASA	dB BAR	% AISLAMIENTO
125	0,00010552	0,205097	14,4463427	80,2185862	81,99127739
250	0,00052469	0,0600128	28,3774393	69,5442779	59,19514856
500	0,0266862	0,43346	62,5051348	86,7183806	27,92169968
1000	2,1067E-06	0,00575493	0	49,180201	100
1500	5,3181E-07	0,00392336	0	45,8525633	100
2000	3,1876E-08	0,00291057	0	43,2589611	100

#### POLIURETANO

FRECUENCIA	PA CASA	PA BAR	dB CASA	dB BAR	% AISL.
125	0,00119624	0,16614	35,5357665	78,3888842	54,6673398
250	0,00030154	0,0798941	23,5663275	84,7894023	63,5562224
500	0,0131171	0,441352	56,3361567	86,8751021	32,8743568
1000	7,63E-06	0,00377613	0	45,5203388	100
1500	2,27E-06	0,00968203	0	53,6987286	100
2000	7,75E-08	0,00420629	0	46,4573843	100



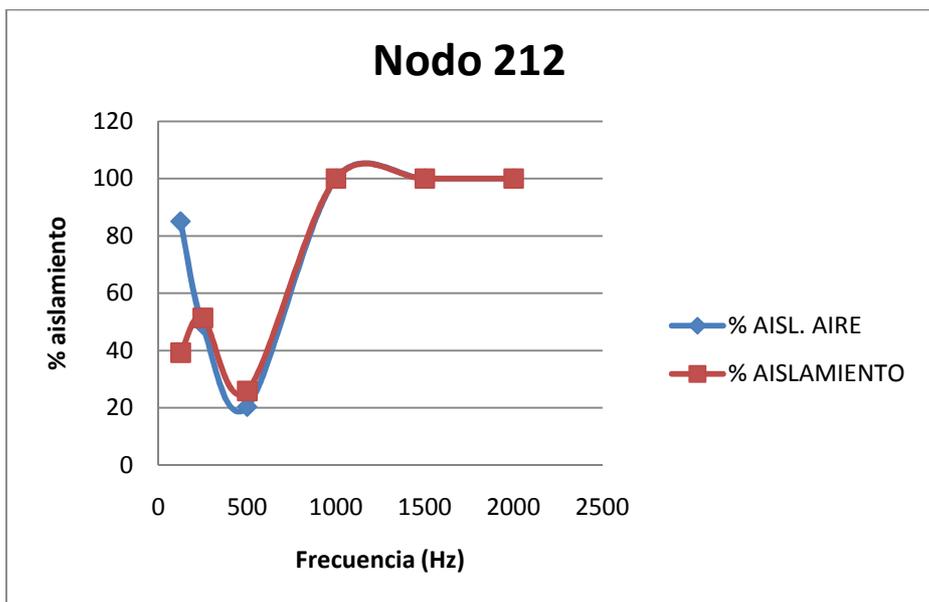
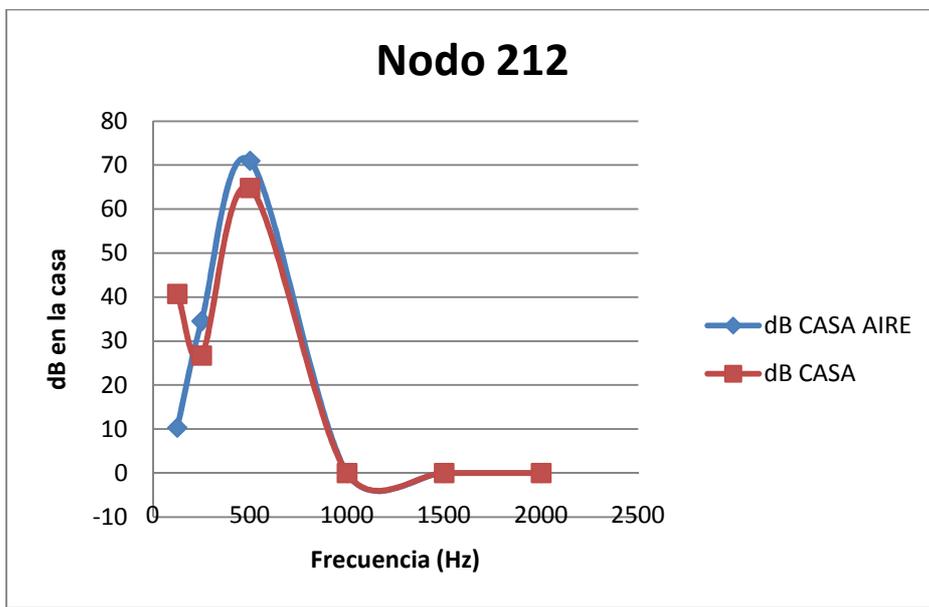
Nodo 212

AIRE

FRECUENCIA	PA CASA	PA BAR	dB CASA AIRE	dB BAR AIRE	% AISL. AIRE
125	6,54E-05	0,0555031	10,2962394	68,8657449	85,04882308
250	0,00106339	0,0479311	34,5132515	67,591748	48,93866109
500	0,070559	0,5660862	70,9504484	89,0370514	20,31356915
1000	2,257E-10	0,0162892	0	58,2173952	100
1500	1,7841E-13	0,00291732	0	43,2790815	100
2000	2,4068E-17	0,00171956	0	38,6877468	100

POLIURETANO EXPANDIDO

FRECUENCIA	PA CASA	PA BAR	dB CASA	dB BAR	% AISL.
125	2,17E-03	0,044656	40,70174742	66,97699647	39,2302588
250	0,0004318	0,0557415	26,68505285	54,88096224	51,3764851
500	0,034713	0,0491627	64,78924305	87,37315014	25,8476512
1000	2,95E-10	0,0208014	0	60,34125139	100
1500	2,66E-13	0,0103566	0	54,28374415	100
2000	1,19E-14	0,00500279	0	47,96364555	100



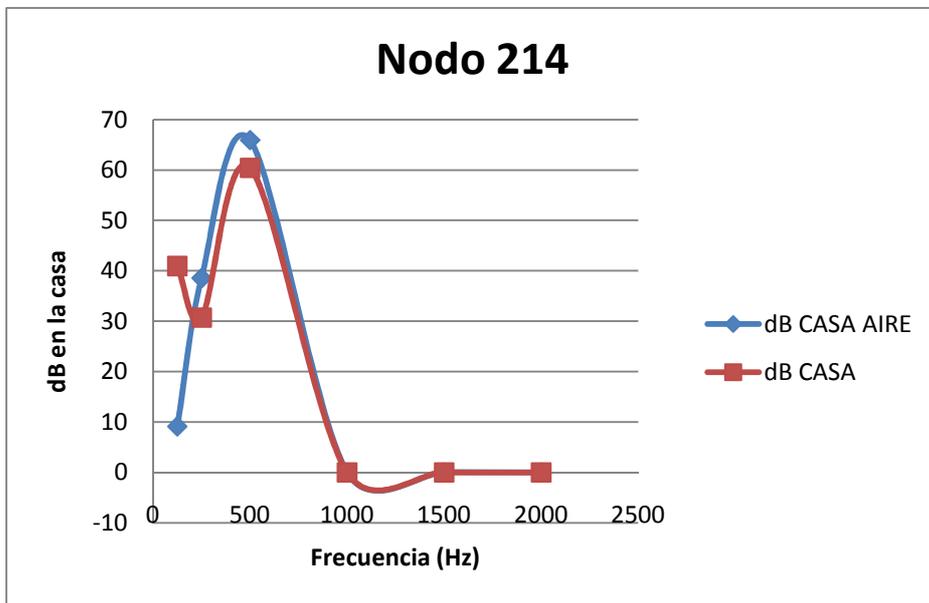
Nodo 214

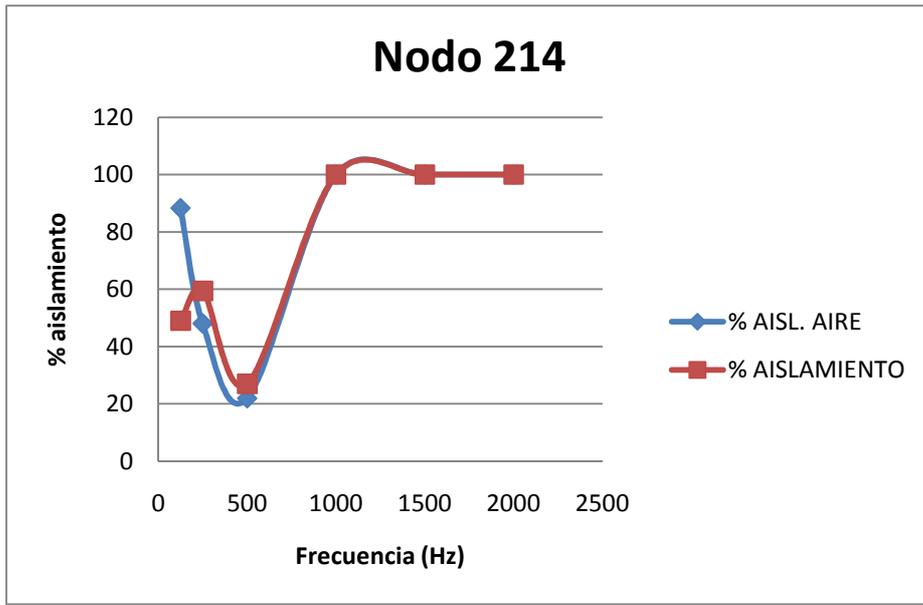
AIRE

FRECUENCIA	PA CASA	PA BAR	dB CASA AIRE	dB BAR AIRE	% AISL. AIRE
125	5,7201E-05	0,156734	9,12744214	77,8826644	88,28052146
250	0,00168874	0,101641	38,5306559	74,1207787	48,01639084
500	0,0393779	0,330329	65,8844511	84,3583341	21,89929804
1000	2,4927E-10	0,0582953	0	69,2920709	100
1500	2,0749E-12	0,00602189	0	49,5740564	100
2000	1,0686E-14	0,00301933	0	43,5776117	100

POLIURETANO EXPANDIDO

FRECUENCIA	PA CASA	PA BAR	dB CASA	dB BAR	% AISL.
125	0,00222755	0,205599	40,93594931	80,23982005	48,9829996
250	0,00068636	0,121403	30,7104394	75,66398846	59,4120796
500	0,0209953	0,479129	60,42184178	82,74081643	26,9745642
1000	7,52E-10	0,0486073	0	67,71343004	100
1500	9,70E-13	0,00763647	0	51,63725309	100
2000	3,04E-13	0,0115158	0	55,20528236	100





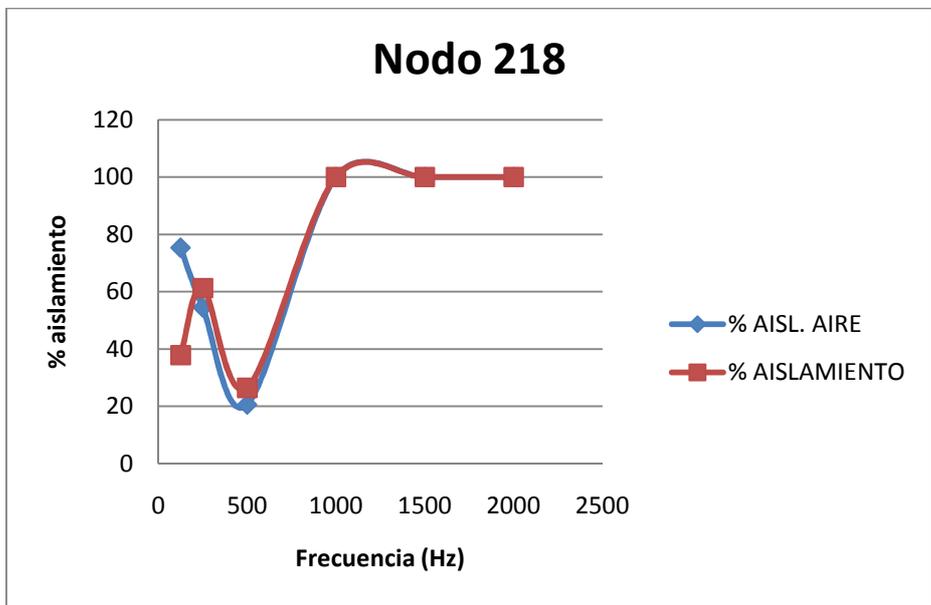
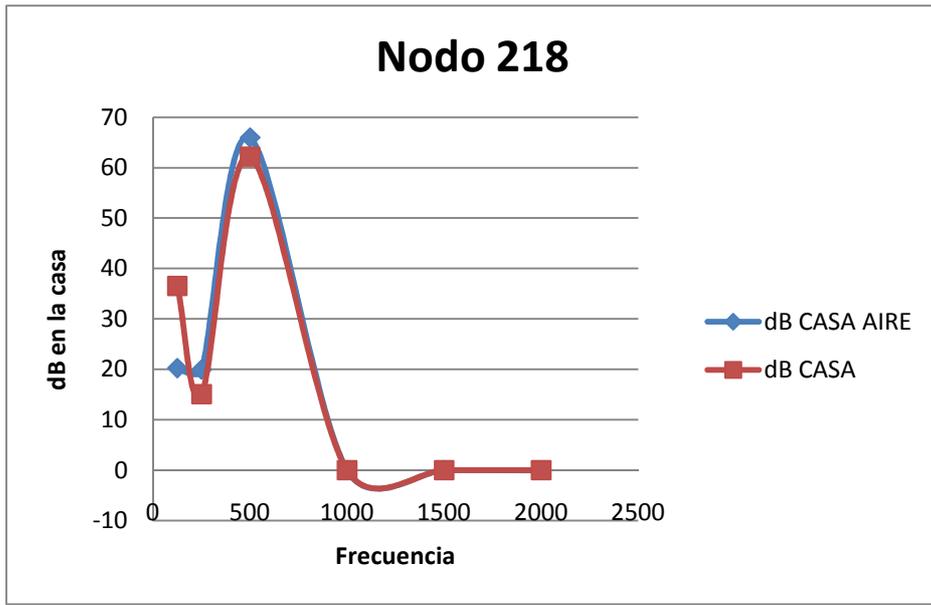
### Nodo 218

#### AIRE

FRECUENCIA	PA CASA	PA BAR	dB CASA AIRE	dB BAR AIRE	% AISL. AIRE
125	0,00020541	0,25379954	20,2319586	82,0692167	75,34768893
250	0,00019879	0,0031016	19,9472034	43,8111158	54,46999469
500	0,0397521	0,285398	65,9666016	83,0884186	20,60674312
1000	8,0718E-06	0,00115074	0	35,1989443	100
1500	6,9113E-07	0,00244136	0	41,7320366	100
2000	6,4112E-08	0,00118362	0	35,443646	100

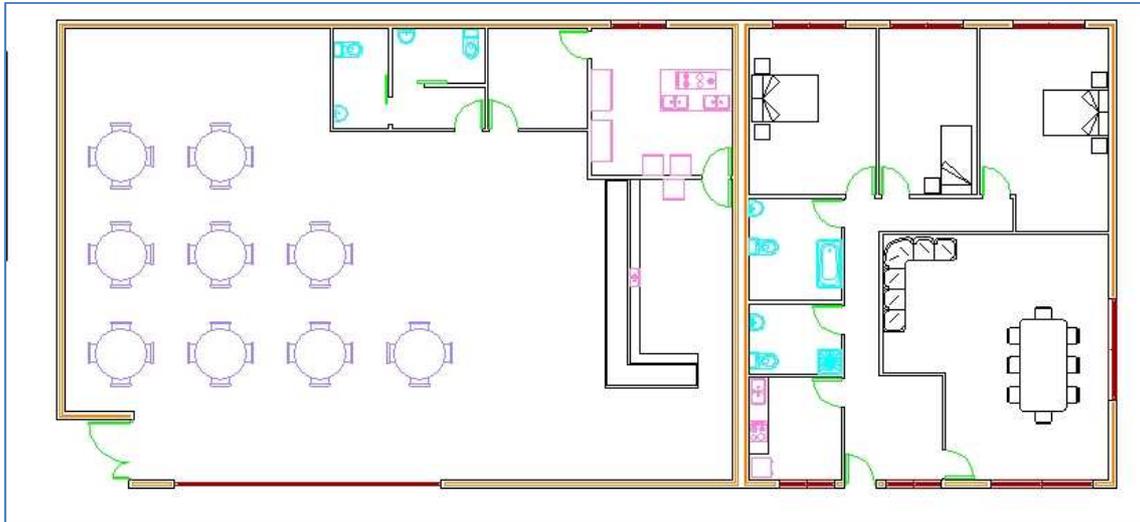
#### POLIURETANO EXPANDIDO

FRECUENCIA	PA CASA	PA BAR	dB CASA	dB BAR	% AISL.
125	0,00134543	0	36,55662223	58,81584399	37,8456216
250	0,00011345	0,0170086	15,07849009	38,91115312	61,2489251
500	0,02574162	0,47607	62,19211759	84,54439763	26,4385112
1000	9,90E-06	0,0953111	0	73,56226972	100
1500	3,63E-06	0,0019948	0	39,97738728	100
2000	1,37E-07	0,00029036	0	23,23822558	100



#### 4.6.1.3.14. Cámara doble con tabique intermedio de 20 cm

A continuación, se vuelve a realizar todo el proceso de diseño y análisis para esta nueva tipología de aislamiento.



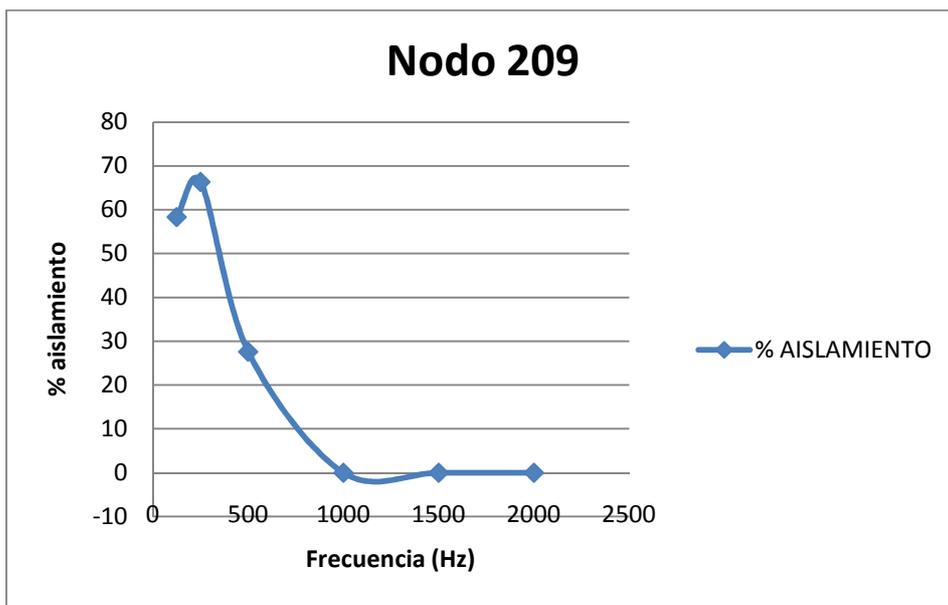
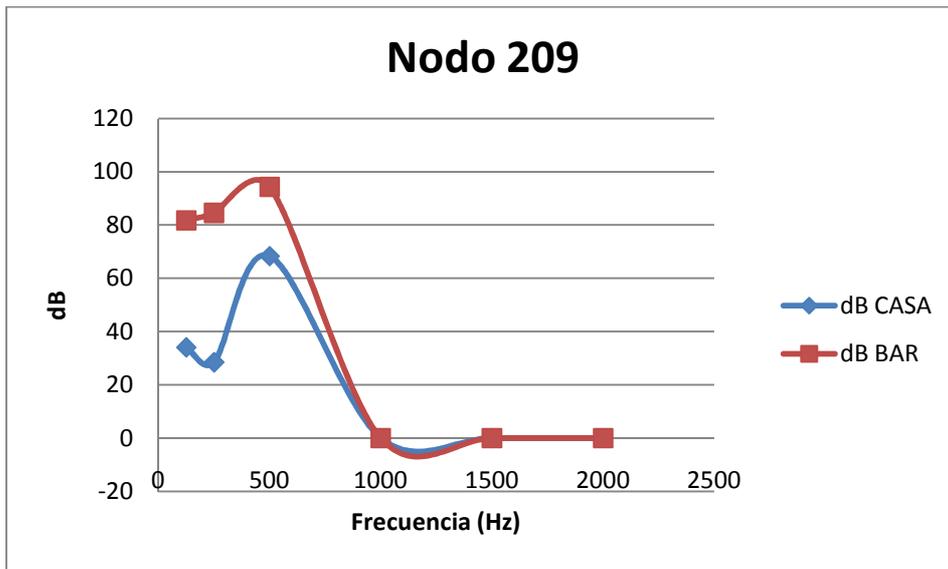
Para los resultados obtenidos con este aislamiento, se representa la curva de los decibelios para los nodos hallados en el archivo de extensión *.inp*, a un lado y otro del muro divisorio.

Se han tomado nodos a un lado y otro del muro, a un metro de distancia de la pared divisoria y con la misma coordenada Y, para que queden a la misma altura en la casa y en el bar.

Después, se ha sustituido el aire de las cámaras por poliuretano expandido y se han comparado los resultados.

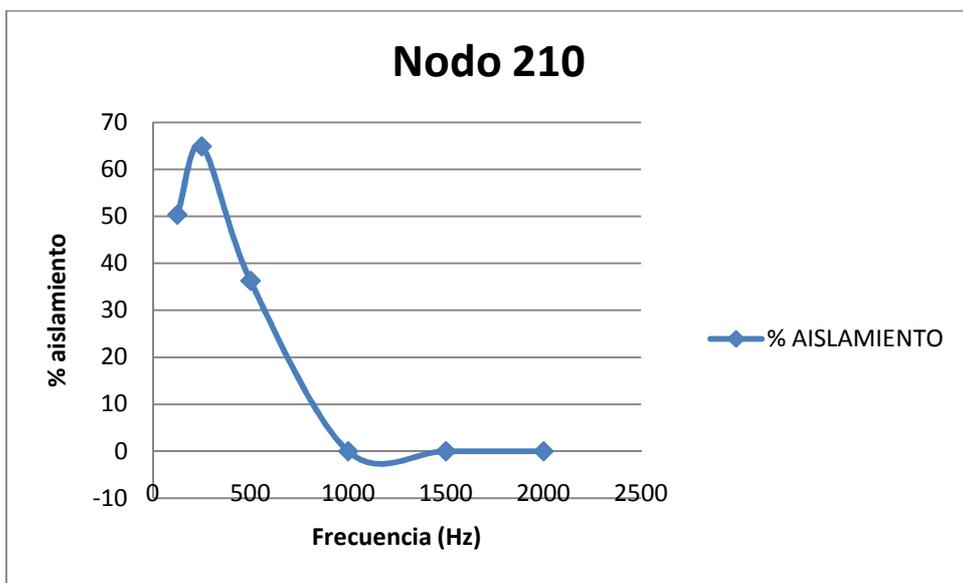
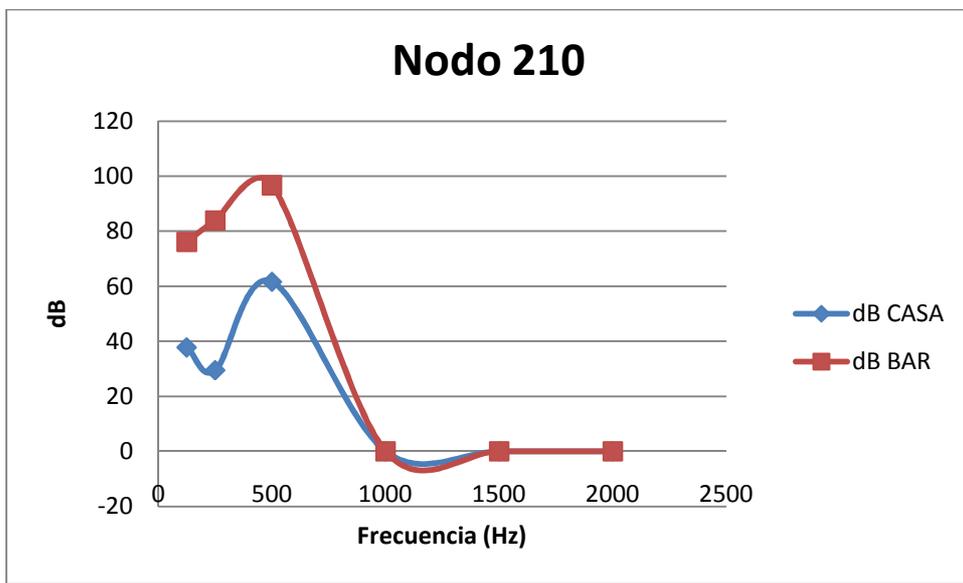
Nodo 209

FRECUENCIA	PA CASA	PA BAR	dB CASA	dB BAR	% AISL.
125	0,00101046	0,244723	34,0697826	81,7528958	58,3259012
250	0,00053023	0,337195	28,468686	84,5370226	66,324002
500	0,0519547	1,03868	68,2918969	94,3090355	27,5871113
1000	3,29E-09	5,80E-09	0	0	0
1500	2,14E-12	3,70E-11	0	0	0
2000	9,43E-14	3,71E-13	0	0	0



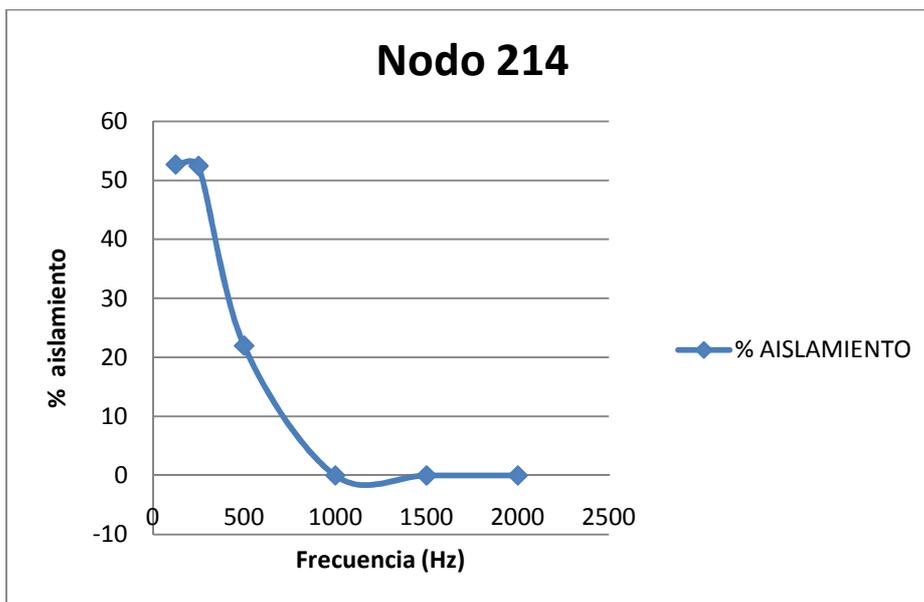
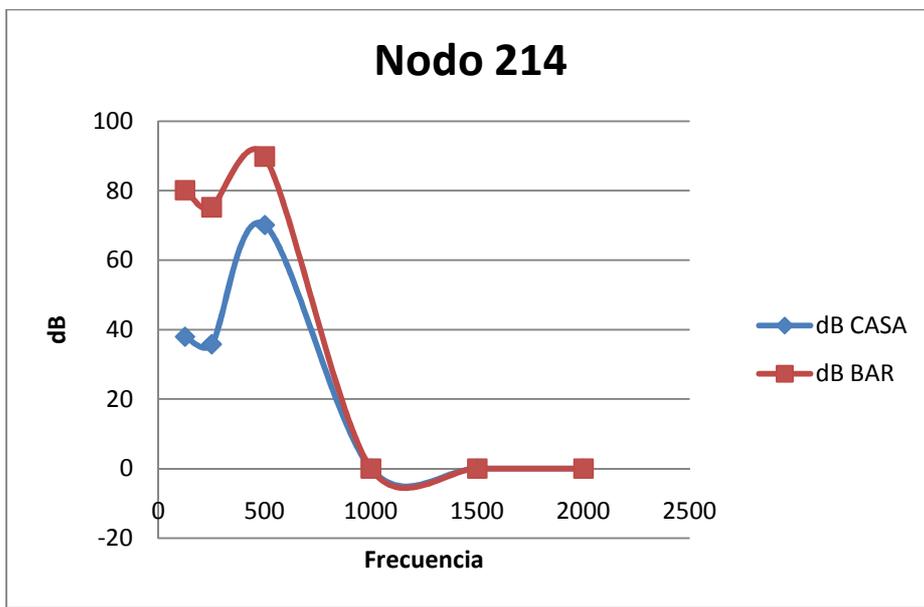
Nodo 210

FRECUENCIA	PA CASA	PA BAR	dB CASA	dB BAR	% AISL.
125	0,00155112	0,127701	37,792308	76,103286	50,3407671
250	0,00059556	0,313422	29,4779688	83,9019896	64,8661862
500	0,0241568	1,36943	61,6401882	96,7101968	36,2629897
1000	1,52E-05	8,13E-09	0	0	0
1500	1,20E-05	7,24E-11	0	0	0
2000	1,08E-05	2,43E-13	0	0	0



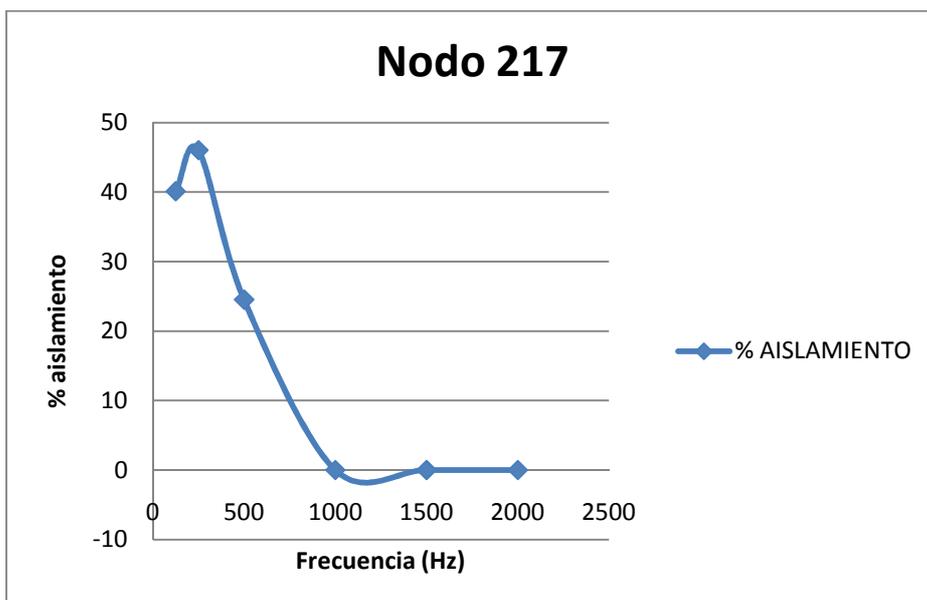
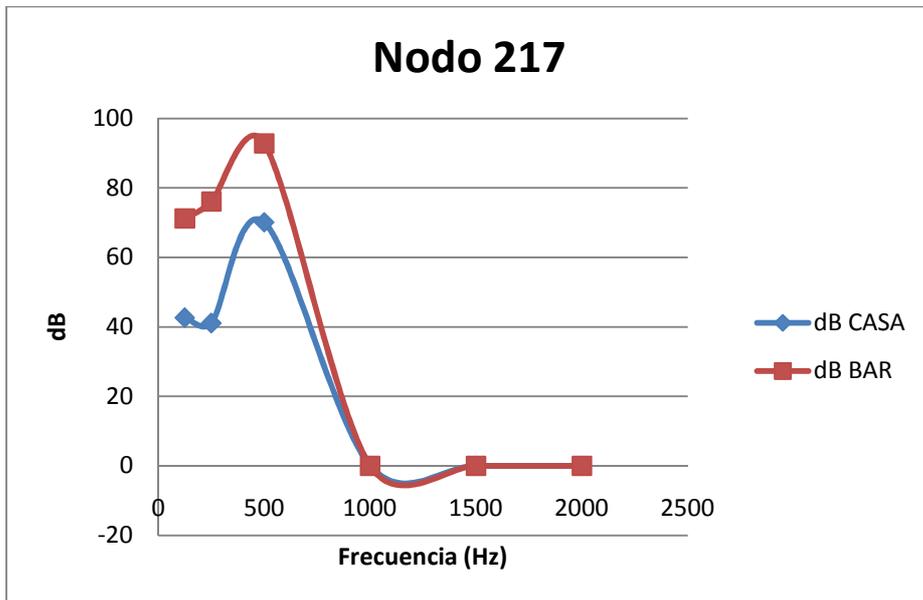
Nodo 214

FRECUENCIA	PA CASA	PA BAR	dB CASA	dB BAR	% AISL.
125	0,00157532	0,20231	37,9267758	80,0997471	52,6505673
250	0,00123003	0,11495	35,7777142	75,1895796	52,4166589
500	0,0639534	0,619621	70,0966728	89,8219227	21,9603959
1000	5,28E-07	3,24E-06	0	0	0
1500	1,82E-09	4,26E-06	0	0	0
2000	4,08E-10	3,38E-06	0	0	0



Nodo 217

FRECUENCIA	PA CASA	PA BAR	dB CASA	dB BAR	% AISL.
125	0,00270924	0,07255682	42,6363497	71,1929649	40,111569
250	0,00226329	0,127506	41,0742042	76,0900125	46,0189283
500	0,0636728	0,873373	70,0584791	92,8033953	24,5087113
1000	1,83E-10	1,24E-05	0	0	0
1500	9,55E-13	1,13E-05	0	0	0
2000	5,18E-14	4,82E-06	0	0	0



#### 4.6.1.3.15. Sustitución del material de las cámaras

Las gráficas comparativas que se obtienen al sustituir el material de las cámaras por poliuretano expandido son:

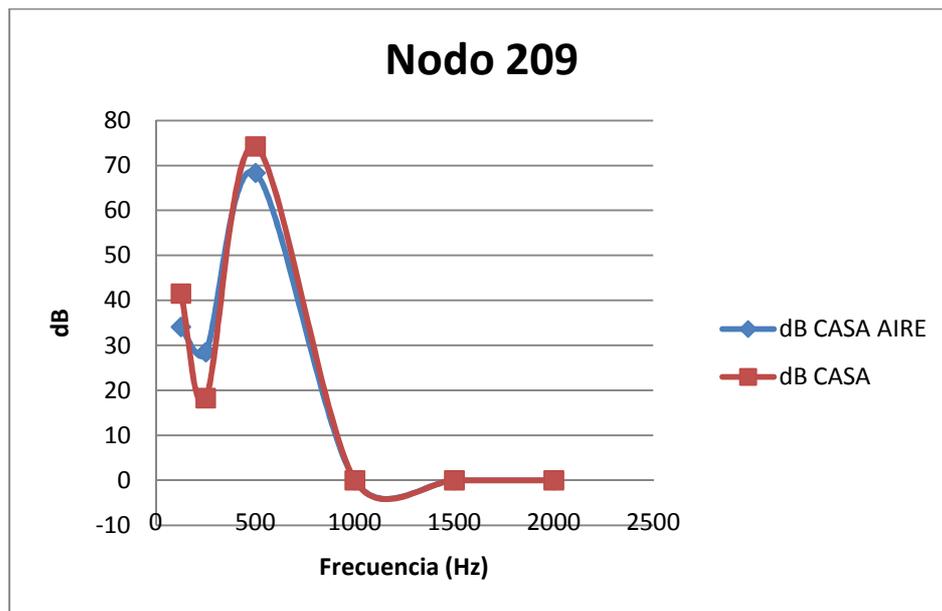
##### Nodo 209

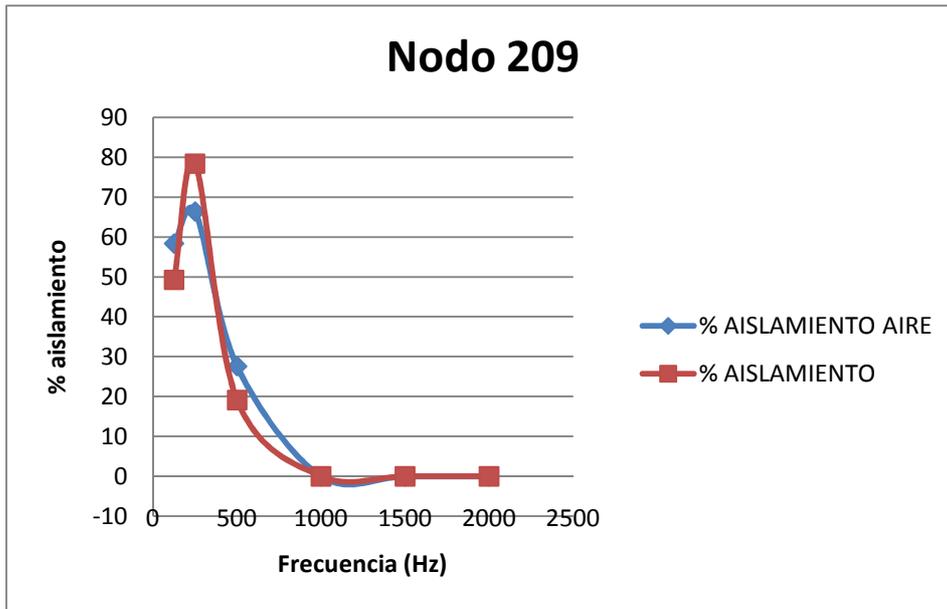
##### AIRE

FRECUENCIA	PA CASA	PA BAR	dB CASA AIRE	dB BAR AIRE	% AISL. AIRE
125	0,00101046	0,244723	34,0697826	81,7528958	58,32590117
250	0,00053023	0,337195	28,468686	84,5370226	66,32400204
500	0,0519547	1,03868	68,2918969	94,3090355	27,58711127
1000	3,29E-09	5,80E-09	0	0	0
1500	2,14E-12	3,70E-11	0	0	0
2000	9,43E-14	3,71E-13	0	0	0

##### POLIURETANO

FRECUENCIA	PA CASA	PA BAR	dB CASA	dB BAR	% AISL.
125	0,00237563	0,245315	41,4949761	81,7738822	49,2564435
250	0,00016395	0,335655	18,2737345	84,4972625	78,3735781
500	0,10272	0,774564	74,2125003	91,7605462	19,1237374
1000	2,56E-08	2,59E-08	0	0	0
1500	1,27E-11	1,14E-10	0	0	0
2000	2,45E-12	7,99E-13	0	0	0





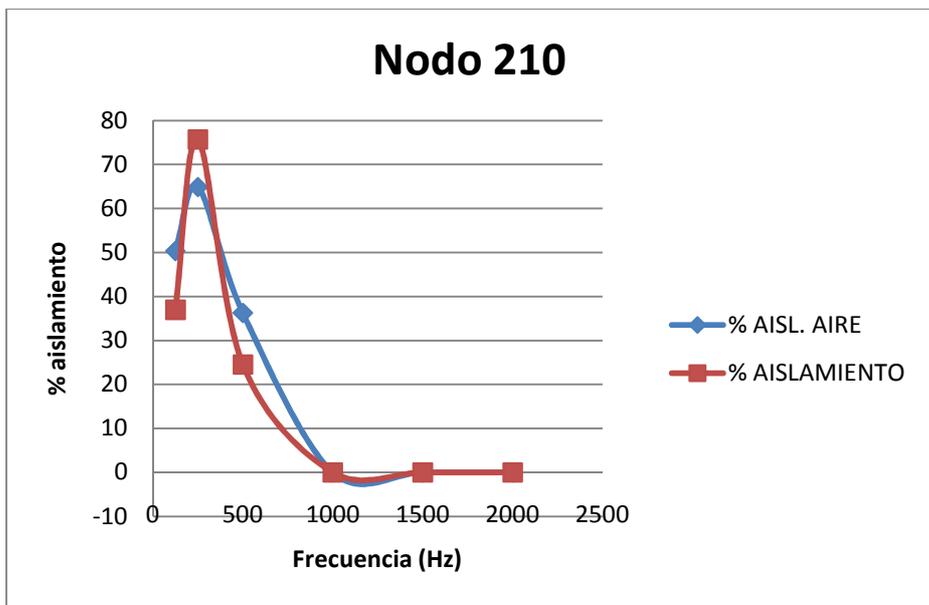
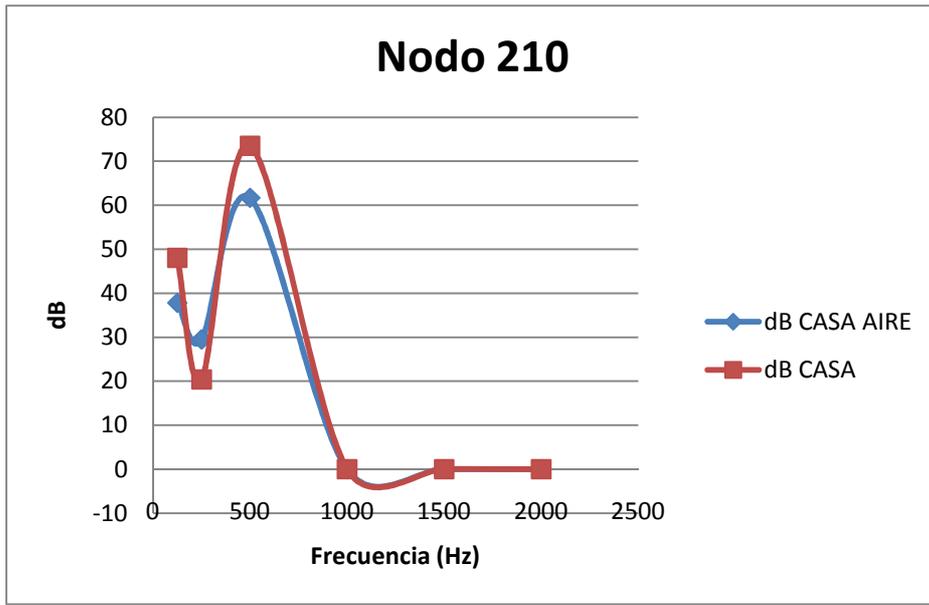
### Nodo 210

#### AIRE

FRECUENCIA	PA CASA	PA BAR	dB CASA AIRE	dB BAR AIRE	% AISL. AIRE
125	0,00155112	0,127701	37,792308	76,103286	50,34076713
250	0,00059556	0,313422	29,4779688	83,9019896	64,86618616
500	0,0241568	1,36943	61,6401882	96,7101968	36,26298966
1000	1,52E-05	8,13E-09	0	0	0
1500	1,20E-05	7,24E-11	0	0	0
2000	1,08E-05	2,43E-13	0	0	0

#### POLIURETANO

FRECUENCIA	PA CASA	PA BAR	dB CASA	dB BAR	% AISL.
125	0,00503324	0,128883	48,0163529	76,1833128	36,9726111
250	0,00020955	0,315488	20,405029	83,959057	75,6964528
500	0,0948581	1,48787	73,5208885	97,4306998	24,5403259
1000	6,87E-06	2,26E-08	0	0	0
1500	6,07E-07	1,87E-10	0	0	0
2000	6,91E-06	1,07E-11	0	0	0



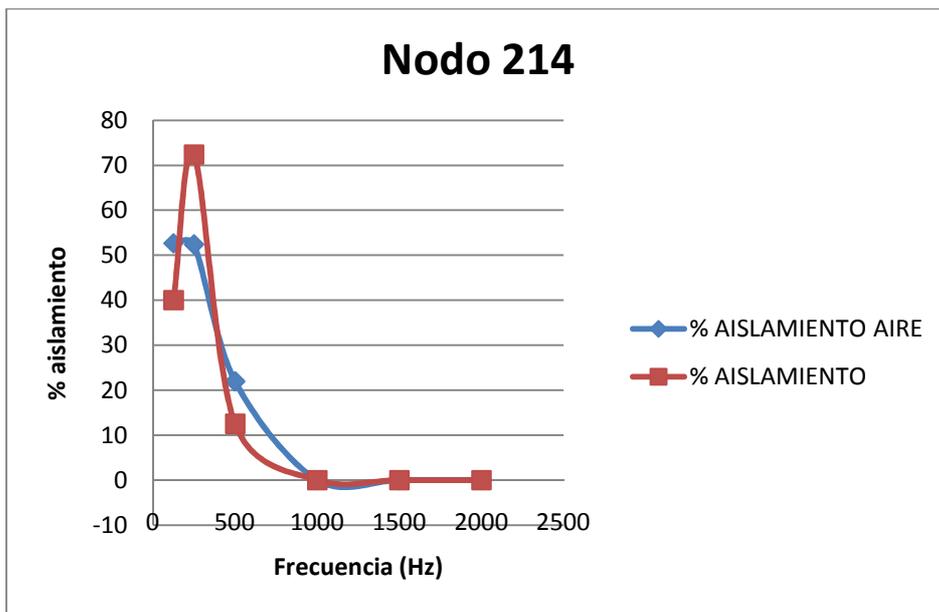
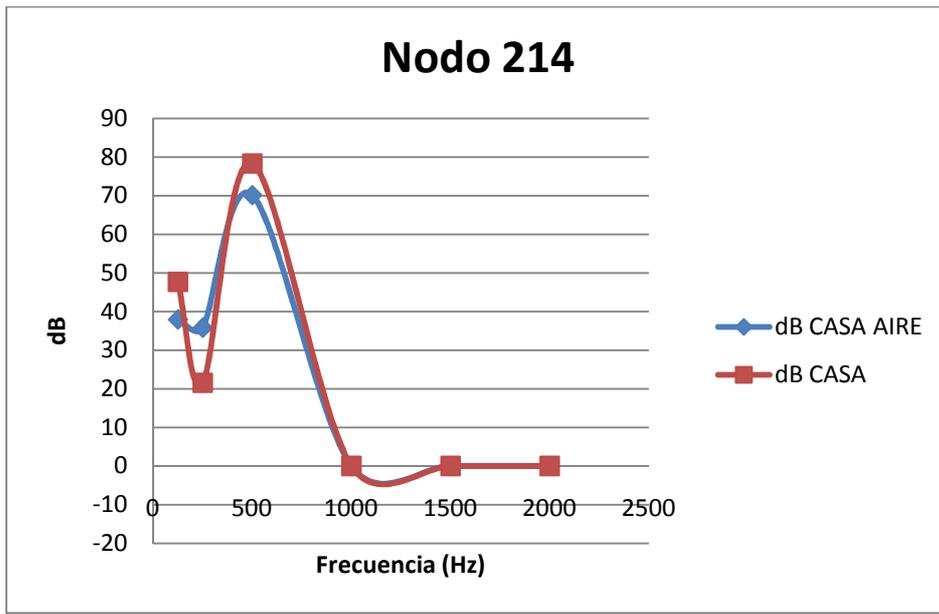
## Nodo 214

### AIRE

FRECUENCIA	PA CASA	PA BAR	dB CASA AIRE	dB BAR AIRE	% AISL. AIRE
125	0,00157532	0,20231	37,9267758	80,0997471	52,65056732
250	0,00123003	0,11495	35,7777142	75,1895796	52,41665886
500	0,0639534	0,619621	70,0966728	89,8219227	21,96039588
1000	5,28E-07	3,24E-06	0	0	0
1500	1,82E-09	4,26E-06	0	0	0
2000	4,08E-10	3,38E-06	0	0	0

**POLIURETANO**

FRECUENCIA	PA CASA	PA BAR	dB CASA	dB BAR	% AISL.
125	0,00483049	0,188546	47,6592238	79,4877466	40,0420494
250	0,00023904	0,158407	21,5487754	77,9748875	72,3644675
500	0,165086	0,599676	78,333605	89,5377334	12,5133036
1000	4,20E-07	1,29E-05	0	0	0
1500	5,36E-10	4,68E-06	0	0	0
2000	3,30E-09	1,53E-05	0	0	0



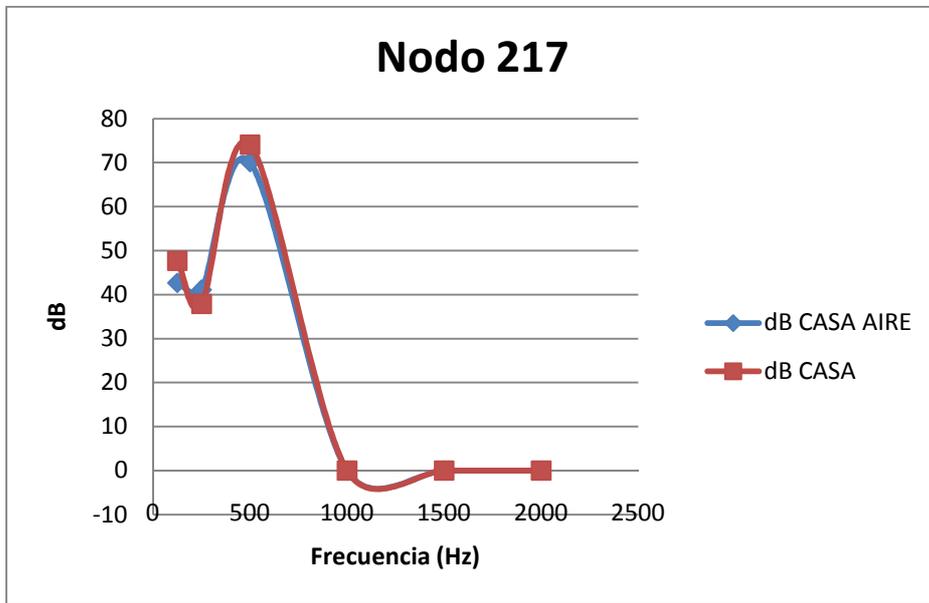
**Nodo 217**

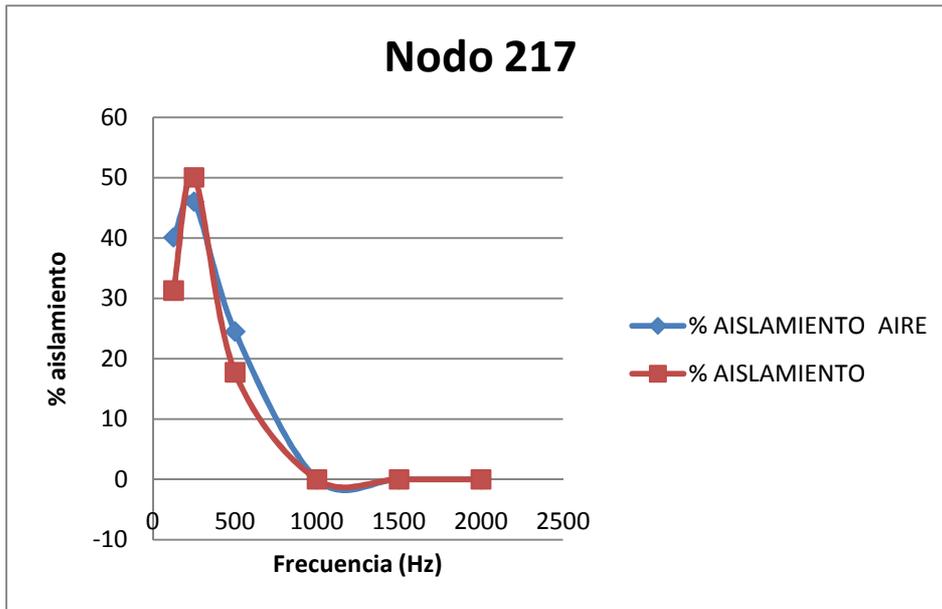
**AIRE**

FRECUENCIA	PA CASA	PA BAR	dB CASA AIRE	dB BAR AIRE	% AISL. AIRE
125	0,00270924	0,07255682	42,6363497	71,1929649	40,11156899
250	0,00226329	0,127506	41,0742042	76,0900125	46,01892835
500	0,0636728	0,873373	70,0584791	92,8033953	24,50871134
1000	1,83E-10	1,24E-05	0	0	0
1500	9,55E-13	1,13E-05	0	0	0
2000	5,18E-14	4,82E-06	0	0	0

**POLIURETANO**

FRECUENCIA	PA CASA	PA BAR	dB CASA	dB BAR	% AISL.
125	0,00483292	0,05887229	47,6635922	69,3776187	31,2983162
250	0,00156857	0,123676	37,8894782	75,8251087	50,0304334
500	0,101405	0,639685	74,1005875	90,0987234	17,7562293
1000	3,09E-11	1,59E-05	0	0	0
1500	3,80E-13	1,24E-05	0	0	0
2000	5,65E-13	2,67E-06	0	0	0



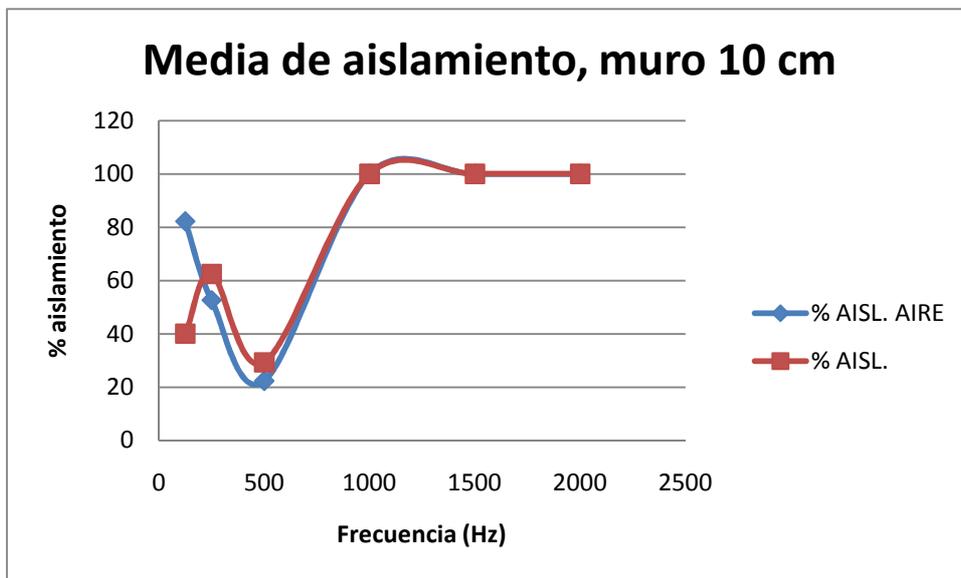
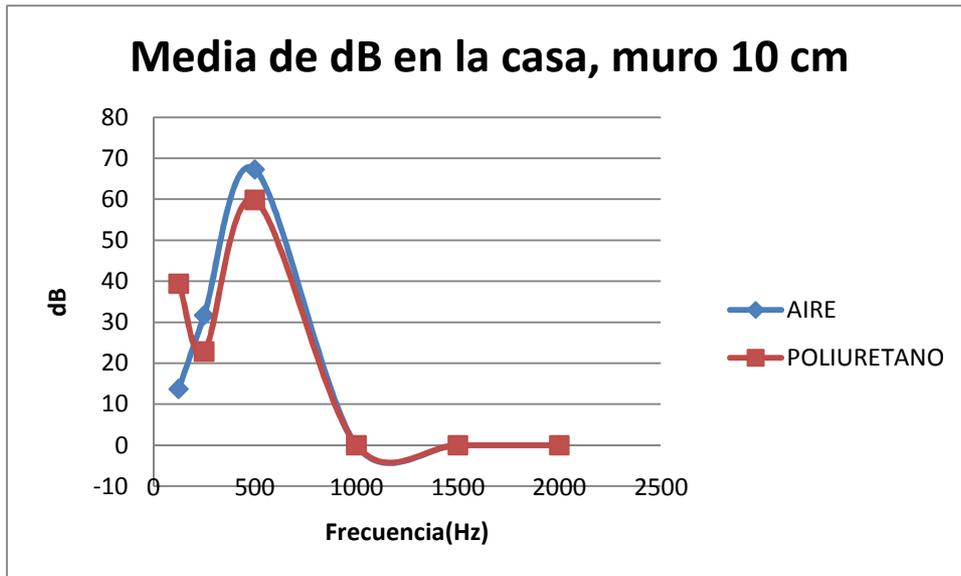


Para realizar las siguientes tablas, se ha obtenido la media del porcentaje de ruido aislado y la media de dB en la vivienda para cada tipo de aislamiento en cada frecuencia:

- Aislamiento formado por dos cámaras de 5 cm y un tabique intermedio de 10 cm.

AIRE			
FRECUENCIA	% AISL. AIRE	dB CASA AIRE	dB BAR AIRE
125	82,1998167	13,7239125	76,5689607
250	52,610198	31,7032933	66,6320568
500	22,341334	67,272219	86,6210235
1000	100	0	52,9896475
1500	100	0	44,0460408
2000	100	0	40,9855752

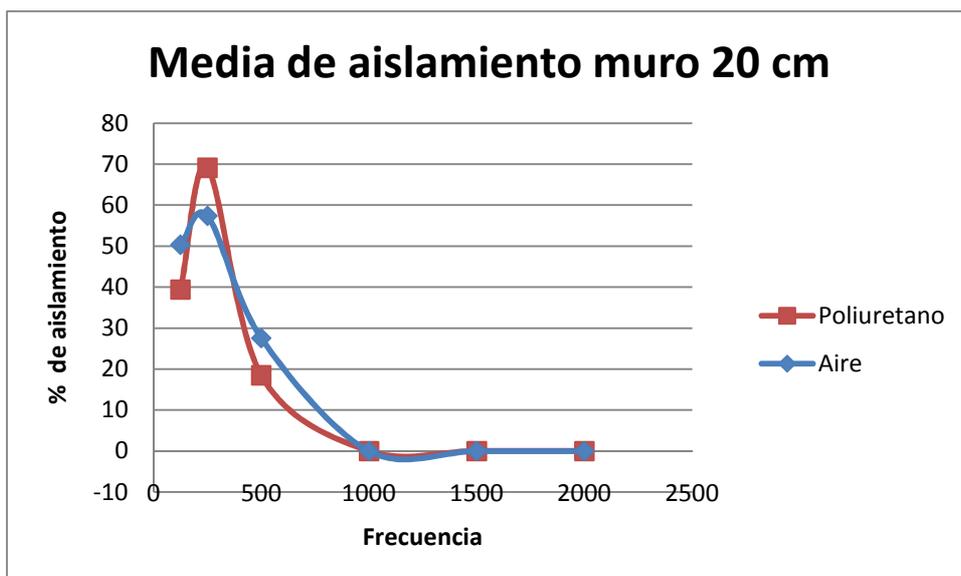
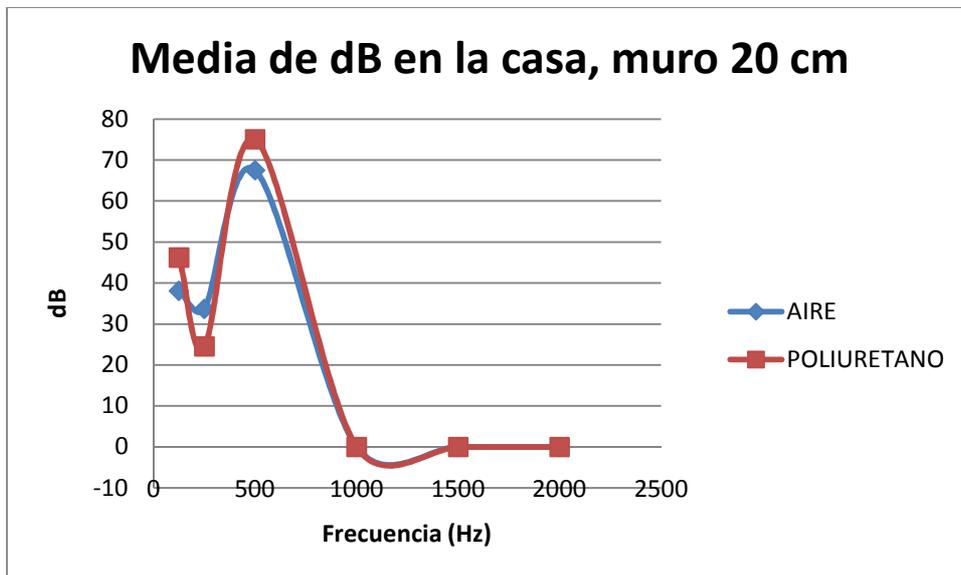
POLIURETANO			
FRECUENCIA	% AISL.	dB CASA	dB BAR
125	40,0566077	39,3990265	67,6409812
250	62,4970474	22,8508583	66,612999
500	29,3360304	59,8428275	85,25722
1000	100	0	61,4443737
1500	100	0	49,0467683
2000	100	0	43,1805862



- Aislamiento formado por dos cámaras de 5 cm y un tabique intermedio de 20 cm

AIRE			
FRECUENCIA	% AISL. AIRE	dB CASA AIRE	dB BAR AIRE
125	50,3572012	38,106304	77,2872235
250	57,4064439	33,6996433	79,9296511
500	27,579802	67,5218092	93,4111376
1000	0	0	0
1500	0	0	0
2000	0	0	0

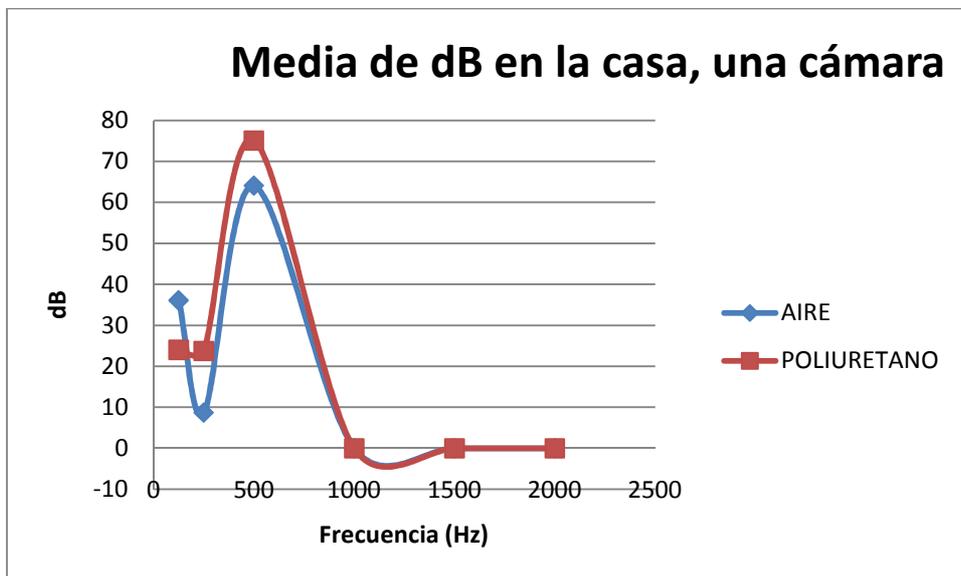
POLIURETANO			
FRECUENCIA	MEDIA % AISLAMIENTO	dB CASA	dB BAR
125	39,39235503	46,2085363	76,7056401
250	69,11623297	24,5292543	80,5640789
500	18,48339909	75,0418953	92,2069257
1000	0	0	0
1500	0	0	0
2000	0	0	0

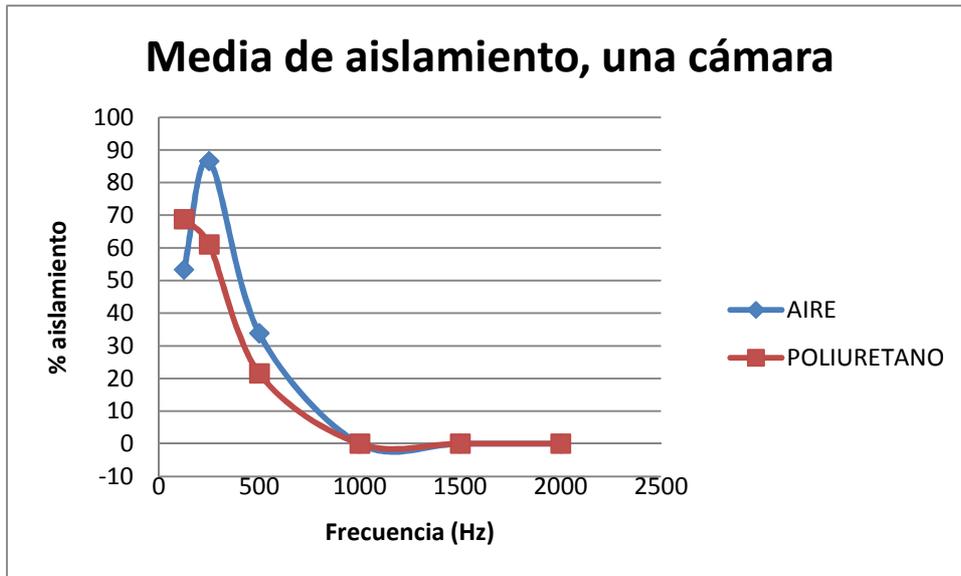


- Aislamiento formado por una cámara de 5 cm

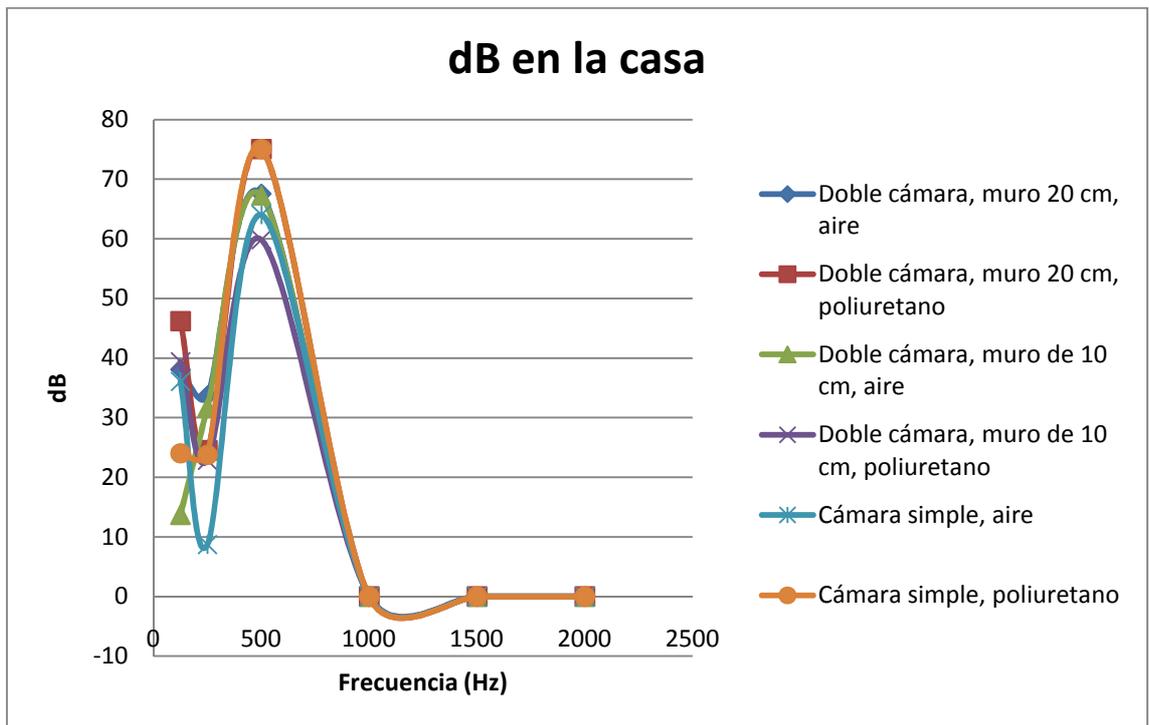
AIRE			
FRECUENCIA	% AISL. AIRE	dB CASA AIRE	dB BAR AIRE
125	53,3293345	36,0570872	77,0415216
250	86,5886463	8,71698682	63,0622143
500	33,8162892	64,0377154	96,2445564
1000	0	0	0
1500	0	0	0
2000	0	0	0

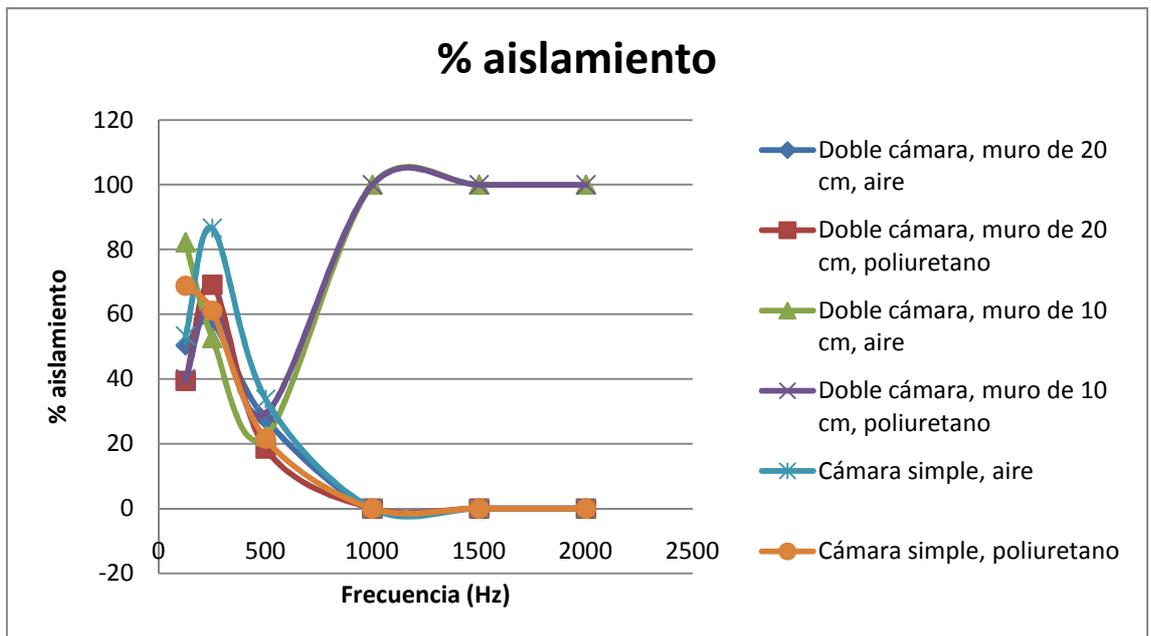
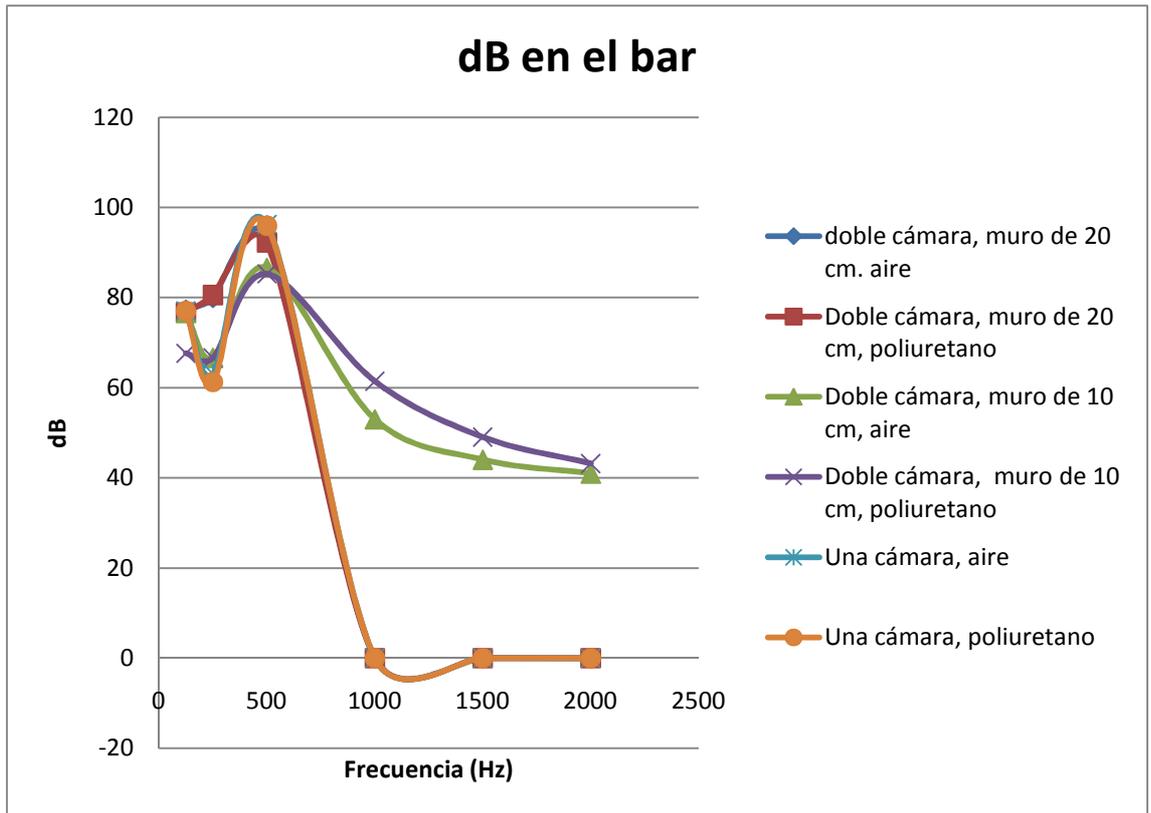
POLIURETANO			
FRECUENCIA	% AISL.	dB CASA	dB BAR
125	68,77623225	24,0124383	77,0249689
250	61,07223185	23,7475104	61,2659178
500	21,53766946	75,0534017	95,9269601
1000	0	0	0
1500	0	0	0
2000	0	0	0





Si ahora se comparan los resultados de las distintas tipologías de aislamiento y los materiales empleados que figuran en estos gráficos en uno solo, los resultados son los siguientes:





## 4.7. Conclusiones del estudio

Se puede concluir que, aunque existen índices de la absorción de los materiales, de su capacidad de reflexión, etc., que nos dan una idea de los materiales más idóneos para el aislamiento de los recintos, se necesita un estudio profundo para determinar el aislamiento ideal para cada uno de ellos, ya que el nivel sonoro se ve influenciado por la distancia a las fuentes sonoras, por la reflexión y absorción de las paredes, por la atenuación del medio de propagación, por la distribución del local, etc.

En este estudio en concreto, se han considerado tres disposiciones constructivas y dos materiales en el interior de las cámaras, aire y poliuretano expandido. Este último material es uno de los más utilizados en la construcción por sus buenas características como aislante térmico. La importancia concedida al aislamiento acústico es reciente. Hasta ahora, primaba el ahorro energético por las pérdidas de calor que se producían a través de los paramentos. Con este estudio, se demuestra que no en todos los casos se produce un mejor aislamiento con el poliuretano expandido, sino que es más eficaz el aire para ciertas frecuencias. Por lo tanto, el aislamiento debe ser estudiado desde el punto de vista del uso del local, ya que la eficacia de unos materiales u otros depende de la frecuencia.

Para la disposición concreta de este bar y esta vivienda, se obtiene que:

- Para sonidos de frecuencia 125 Hz, el aislamiento más eficaz es la doble cámara de aire con muro intermedio de 10 cm, ya que es el aislamiento con el que llegan menos dB a la casa, 13.72 dB. También es la tipología de aislamiento para la que el porcentaje de aislamiento es mayor, 82.2%. Los dB que se producen en el bar, suma del sonido directo y de las reverberaciones, son 76.57 dB.

El aislamiento que provoca menos dB en el bar es la doble cámara de poliuretano, con muro intermedio de 10 cm, 67.64 dB.

El aislamiento menos eficaz es la doble cámara de poliuretano, con muro de 20 cm. En la casa se producen 46.21 dB, el porcentaje de aislamiento es el menor, 39.39%, y la presión acústica en el bar es de 76.71 dB. Por todas estas razones, este aislamiento, pese a ser más caro por la diversidad de materiales y el espacio empleado, es el menos eficaz.

- Para la frecuencia de 250 Hz, el mejor aislamiento es la cámara de 5 cm de aire, para la que se producen en la casa 8.72 dB, con el mayor porcentaje de aislamiento, 86.59 %, y 63.06 dB en el bar.

El aislamiento que provoca menos dB en el bar es la cámara de 5 cm de poliuretano, 61.26 dB.

El aislamiento que provoca más dB en el bar es la doble cámara de poliuretano con muro de 20 cm, 80.56 dB.

El peor aislamiento para esta frecuencia, el que provoca más decibelios en la casa, es la doble cámara de aire con muro intermedio de 20 cm, 33.7 dB.

- En la frecuencia de 500 Hz, el mejor aislamiento se produce con la doble cámara de poliuretano, con muro intermedio de 10 cm, para el que se produce la menor presión acústica en la casa, 59.84 dB. Con este aislamiento, la presión acústica en el bar también es la menor, 85.26 dB y el porcentaje de aislamiento es de 29.34 %.

El mayor porcentaje de aislamiento es de 33.82 % para la cámara simple de aire. Este aislamiento es el que provoca más reverberaciones, ya que el nivel sonoro en el bar es de 96.24 dB.

El peor aislamiento para esta frecuencia se produce para dos tipologías constructivas, doble cámara de poliuretano con 20 cm de muro intermedio y cámara simple de poliuretano, con 75.0418 dB y 75.0534 dB, respectivamente.

- Para frecuencias de 1000, 1500 y 2000 Hz, la presión acústica en la casa siempre es menor de  $2 \cdot 10^{-5}$  Pa, mínima diferencia de presión que el hombre puede detectar, por lo que el aislamiento sonoro se hace innecesario.

A la hora de construir el bar, tendría que determinarse el rango de frecuencias de la actividad para escoger el mejor aislamiento posible. Como se ha podido comprobar, al depender el aislamiento de la capacidad de absorción de los materiales, su frecuencia de vibración y la capacidad para reflejar las ondas sonoras, el mejor aislamiento no es el mismo para todas las frecuencias. De ahí, la importancia de hacer un análisis previo del espectro de ruido de la actividad.

## 5. Bibliografía

### 1. Artículos y publicaciones audiovisuales

#### **Sonómetro**

[http://rabfis15.uco.es/lvct/tutorial/1/paginas%20proyecto%20def/\(3\)%20Tecnicas%20de%20medida/sonómetros.htm](http://rabfis15.uco.es/lvct/tutorial/1/paginas%20proyecto%20def/(3)%20Tecnicas%20de%20medida/sonómetros.htm)

[http://webs.uvigo.es/gcastro/PFC/Capitulo\\_uno\\_c.htm](http://webs.uvigo.es/gcastro/PFC/Capitulo_uno_c.htm)

#### **Datos técnicos e información necesarios**

Acústica Integral, SL (Catálogo comercial)

<http://es.scribd.com/doc/47686450/viscoelastic-bulk-moduli>

<http://es.wikipedia.org/wiki/Poliuretano>

<http://www.codigotecnico.org/web/recursos/documentos/>

<http://www.acusticaweb.com/videos/absorcion-sonora.html>

<http://www.atcp.com.br/es/productos/caracterizacion-de-materiales/propiedades-materiales/tablas-propiedades/polimero-fibrosos.html>

**CARNICERO LÓPEZ**, Alberto: “Curso introductorio al método de los elementos finitos”.  
Apuntes internos ICAI.

### 2. Libros

**GARCÍA GARCÍA**, José y **GARCÍA CALDERÓN**, Eugenio: “Curso sobre control de ruido y vibraciones”, Salamanca, 1995.

**OCHOA PÉREZ**, Juan Manuel y **BOLAÑOS**, Fernando: Medida y control del ruido, Marcombo, Barcelona, 1990.

**RECUERO LÓPEZ**, Manuel: Ingeniería Acústica (versión en soporte CD sin datos bibliográficos).