

MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

PRÁCTICA 1: PLACA CON AGUJERO CENTRAL

Profesor:

Andrés González Estrada

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER



**Escuela de Ingeniería
Mecánica**



Área de conocimiento de Ingeniería Mecánica

introducción a ANSYS

1.1 INICIANDO ANSYS

ANSYS es un programa comercial de elementos finitos de propósito general que permite modelar y resolver problemas de ingeniería en campos diversos como la elasticidad, plasticidad, mecánica de fluidos, acústica, transmisión de calor, electromagnetismo, etc. Presenta una interfaz gráfica en entorno Windows que permite abordar una gama amplia de problemas de forma interactiva. También es posible realizar las ejecuciones directamente mediante comandos, aunque ello requiere un mayor conocimiento del programa.

En esta práctica de introducción se presentará la interfaz gráfica de ANSYS y cómo se organizan los comandos en los distintos menús. También se mostrarán las capacidades básicas de ANSYS mediante el análisis de modelos preprocesados.

Para iniciar el programa se hace clic en el icono ANSYS Product Launcher de la carpeta ANSYS 11.0, en la carpeta de programas del menú inicio. Aparece una ventana como la de la Figura 1.

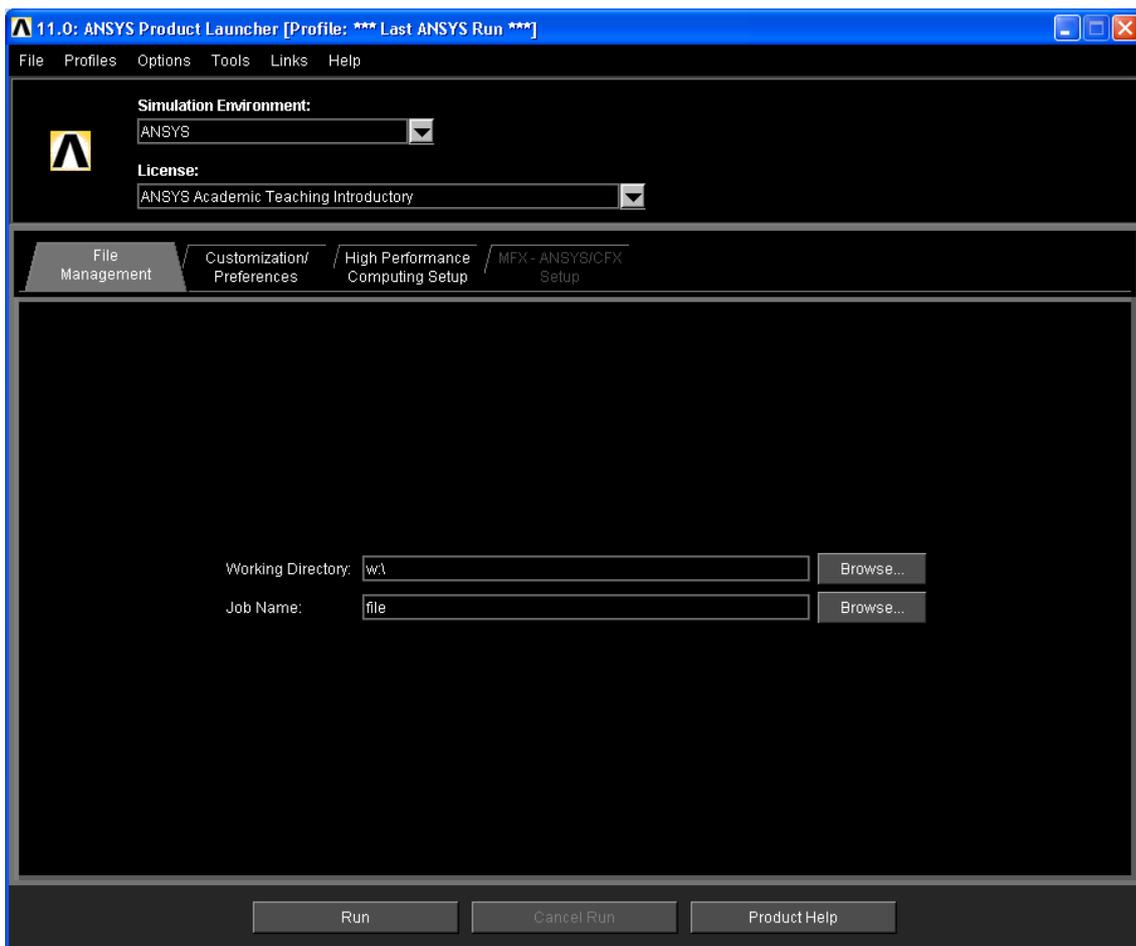


Figura 1. Ventana de configuración (ANSYS Product Launcher).

En primer lugar hay que seleccionar el entorno de simulación (Simulation Environment). Para las prácticas se elegirá la opción ANSYS, que es el entorno más clásico del programa, aunque por defecto la opción que aparece es ANSYS Workbench.

Seleccionando la pestaña File Management puede especificarse el directorio de trabajo (donde se guardarán los ficheros de trabajo) y el nombre que se desea dar al trabajo (a los archivos que se generan). También pueden configurarse otros parámetros en el resto de fichas de la ventana pero en general no es necesario. Para empezar a trabajar con ANSYS se hace clic en el botón Run.

Los valores introducidos en esta ventana son recordados entre sesiones de ANSYS y si estos no se van a cambiar puede omitirse el uso de la misma haciendo clic en el icono ANSYS de la carpeta ANSYS 11.0.

Debe tenerse en cuenta que si se utiliza un nombre de trabajo ya existente (Job Name) ANSYS no leerá de forma automática el archivo correspondiente al iniciarse, por lo que será preciso hacerlo de forma manual.

1.2 VENTANA PRINCIPAL DE ANSYS

Una vez iniciado ANSYS aparece la ventana de la Figura 2 (ventana principal del programa).

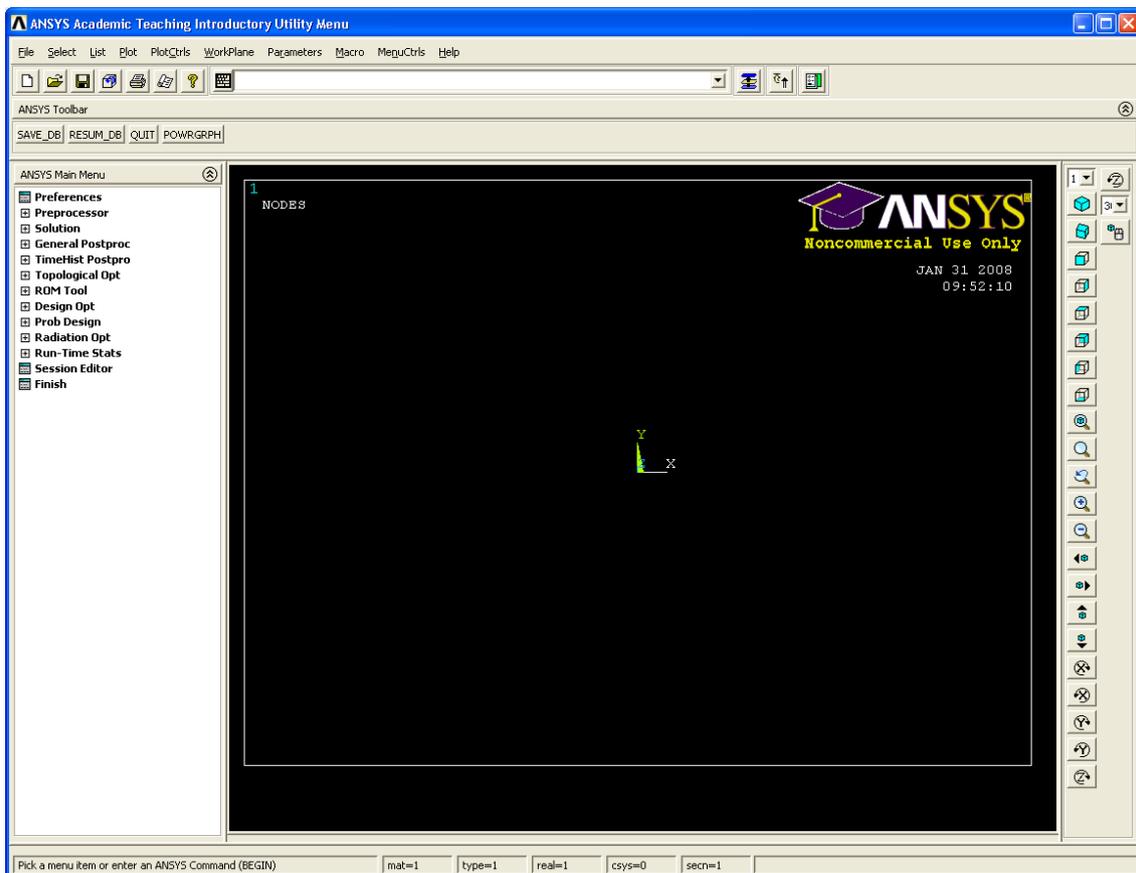


Figura 2. Ventana principal de ANSYS.

El título de la ventana principal dependerá de la licencia de ANSYS que se utilice y dentro de la misma se encuentran los siguientes elementos:

- Un menú bajo la barra de título (menú de utilidades) que presenta el aspecto habitual de las barras de menús desplegables de los programas de Windows. Este menú de utilidades permite acceder a todos los comandos de ANSYS.
- Debajo del menú aparece una barra de iconos con botones de acceso rápido a los comandos habituales en los programas de Windows (nuevo, abrir, guardar, imprimir...). A su derecha existe un cuadro de texto donde se pueden teclear y ejecutar comandos de ANSYS directamente (Command prompt). Más a la derecha hay otros tres iconos. El icono  sirve para poner en primer plano las ventanas de ANSYS que estén abiertas pero hayan quedado ocultas..
- Inmediatamente por debajo de la barra de iconos está la barra de herramientas del programa (ANSYS Toolbar), que permite ejecutar de forma rápida acciones usuales como guardar el trabajo (SAVE_DB), recuperar el trabajo guardado (RESUM_DB), salir del programa (QUIT) o activar y desactivar la opción PowerGraphics (POWRGRPH). Esta barra de herramientas es configurable.
- Bajo la barra de herramientas aparece el menú principal (ANSYS Main Menu), que contiene los elementos fundamentales de las diferentes etapas de modelado y resolución de un problema de elementos finitos (selección del tipo de problema, definición del modelo, con su geometría y condiciones de contorno, mallado, cálculo de la solución, postproceso de la solución, etc.).
- A la derecha del menú principal aparece un área de representación gráfica en la que se pueden crear, observar y manipular las diferentes entidades geométricas y de elementos finitos del modelo, así como mostrar gráficos con los resultados. El aspecto del área gráfica (número de vistas, orientación y posición del punto de vista) se puede controlar mediante los iconos de la derecha.
- Por último, en la zona inferior de la ventana se encuentra la barra de estado que indica en cada momento que operación se puede realizar, así como los atributos que están seleccionados para mallar (tipo de material, tipo de elemento y conjunto de constantes) y el sistema de coordenadas activo.

Para cerrar ANSYS se procederá como en cualquier programa de Windows o haciendo clic en el botón QUIT de la barra de herramientas.

1.3 VENTANA DE SALIDA

Además de la ventana principal ya descrita, con ANSYS también se abre una ventana de texto que contiene información sobre las operaciones que el programa va realizando en cada momento (Output Window). Consultar esta ventana es útil, por ejemplo, cuando se ejecuta un comando que no tiene un efecto visible en el área gráfica de la ventana principal.

1.4 MENÚ PRINCIPAL

Veamos cómo se organiza el menú principal de ANSYS (Main Menu). Las opciones del menú pueden ir acompañadas de un signo + o – a la izquierda, lo que significa que al hacer clic se despliega o pliega otro menú (cada nivel del menú aparece en un color diferente para facilitar la navegación). En lugar del símbolo anterior las opciones del menú pueden ir acompañadas de un icono en el lado izquierdo. El icono  significa que al hacer clic se ejecutará el correspondiente comando de ANSYS (si el comando lleva parámetros se abrirá un cuadro de diálogo para definir los mismos). El icono  significa que al hacer clic deben seleccionarse entidades en el área gráfica, geométricas o del modelo de elementos finitos, sobre las que se ejecutará el comando correspondiente a la opción del menú.

La primera opción del menú principal es Preferences, que permite establecer las preferencias para la interfaz gráfica, esto es, disciplina con la que se va a trabajar (problema estructural, térmico, fluidos, electromagnético...) y estrategia de refinamiento (método h o p), de manera que el menú filtrará las opciones válidas para la selección realizada facilitándose su uso.

Las cuatro opciones que siguen son las más importantes y representan los módulos habituales que pueden encontrarse en cualquier programa de elementos finitos:

- Preprocessor: contiene todos los comandos del preprocesador, en el que se define el problema, su geometría, las cargas, las condiciones de contorno y el modelo de elementos finitos (la malla).
- Solution: contiene los comandos para obtener la solución de un modelo de elementos finitos.
- General Postproc: incorpora los comandos del postprocesador, módulo que permite extraer la información sobre la solución calculada y representarla gráficamente.
- TimeHist Postpro: incorpora los comandos para postproceso de respuestas temporales o en frecuencia.

Las siguientes opciones permiten abordar análisis específicos relacionados con problemas de optimización.

Los comandos bajo la opción Run-Time Stats proporcionan información sobre el trabajo en curso (número de entidades en el modelo, memoria reservada, ocupada o necesaria, etc.).

La opción Session Editor abre una ventana de texto con todos los comandos ejecutados desde la última vez que se guardó el trabajo (por ejemplo con el botón SAVE_DB de la barra de herramientas), lo que puede ser interesante en algunas ocasiones para deshacer o modificar las últimas operaciones realizadas. Para utilizar esta opción hay que conocer los comandos de ANSYS que se van ejecutando con cada opción del menú.

Por último se tiene la opción Finish, que no es para salir de ANSYS como puede parecer sino para cerrar cualquiera de los módulos principales del programa (preprocesador, solución, postprocesador...) y dejar la base de datos en un estado apropiado para ser

leída por otro módulo. Habitualmente no será necesario utilizar esta opción porque ANSYS la ejecuta automáticamente la mayoría de las veces.

1.4.1 MENÚ DEL PREPROCESADOR

Este menú está organizado en diferentes categorías que tienen que ver con el modelo geométrico, el modelo de elementos finitos y las condiciones de contorno. Las opciones principales que utilizaremos son:

- Element Type: para definir los tipos de elementos que se van a utilizar.
- Real Constants: para definir conjuntos de valores constantes asociados a propiedades del modelo, por ejemplo el espesor de los elementos.
- Material Props: para definir las propiedades de los materiales.
- Sections: para definir las secciones de vigas y placas.
- Modeling: para definir la geometría.
- Meshing: para generar la malla de elementos finitos.
- Checking Ctrl: contiene comandos para comprobar la validez del modelo.
- Numbering Ctrl: permite optimizar la numeración de las entidades geométricas (puntos, líneas, áreas y volúmenes) y de elementos finitos (nodos y elementos).
- Archive Model: permite importar y exportar datos del modelo de elementos finitos.
- Coupling / Ceqn: permite acoplar grados de libertad.
- Loads: para definir el tipo de análisis y las condiciones de contorno.
- Path Operations: permite definir caminos sobre el modelo de elementos finitos en los que obtener el valor de una variable de la solución.

1.4.2 MENÚ DE SOLUCIÓN

En este menú aparecen de nuevo los comandos que permiten definir el tipo de análisis y las condiciones de contorno (es lo mismo que aparece en el menú del preprocesador), así como los comandos necesarios para calcular la solución del problema. Las opciones principales que utilizaremos son:

- Analysis Type: para definir el tipo de análisis y las opciones de cálculo asociadas.
- Define Loads: para definir las condiciones de contorno correspondientes al tipo de análisis. Se pueden imponer sobre el modelo geométrico o sobre el modelo de elementos finitos.

- Load Step Opts: opciones para trabajar con varios casos o pasos de carga.
- Solve: comandos para resolver uno o varios casos/pasos de carga.
- Unabridged/Abridged Menu: desactiva/activa el menú abreviado (el menú abreviado no muestra las opciones de solución que no sean adecuadas al tipo de análisis seleccionado).

1.4.3 MENÚ DEL POSTPROCESADOR

En el postprocesador general (General Postproc) se pueden encontrar entre otras las siguientes opciones:

- Data & File Opts: permite seleccionar los datos y archivos con los que trabajar en el postprocesador.
- Results Summary: ofrece un resumen de los resultados.
- Read Results: permite seleccionar el caso/paso de carga con el que trabajar.
- Plot Results: permite representar gráficamente los resultados.
- List Results: para obtener informes o listados de los resultados.
- Results Viewer: utilidad simplificada para visualizar un archivo de resultados.

En el postprocesador para respuestas temporales la opción más interesante es:

- Variable Viewer: utilidad que permite definir las variables que se desea analizar, así como obtener listados y representaciones gráficas de las mismas.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Antes de seguir con la utilización del programa, vamos a definir el problema que se analizará en esta práctica. Se trata de una placa con un agujero central sometida a un esfuerzo de tracción. Las dimensiones y propiedades del material son las de la Figura 3. Dada la simetría del problema se analizará solamente la cuarta parte de la placa junto con las condiciones de contorno de simetría adecuadas.

Consideraremos condiciones de tensión plana, ya que el espesor de la placa es muy pequeño en comparación con el resto de dimensiones. Si la tensión aplicada en la línea superior es $\sigma = 100$ MPa, la tensión máxima que se obtiene en el concentrador de tensiones es aproximadamente 434 MPa (utilizando el factor teórico de concentración de tensiones).

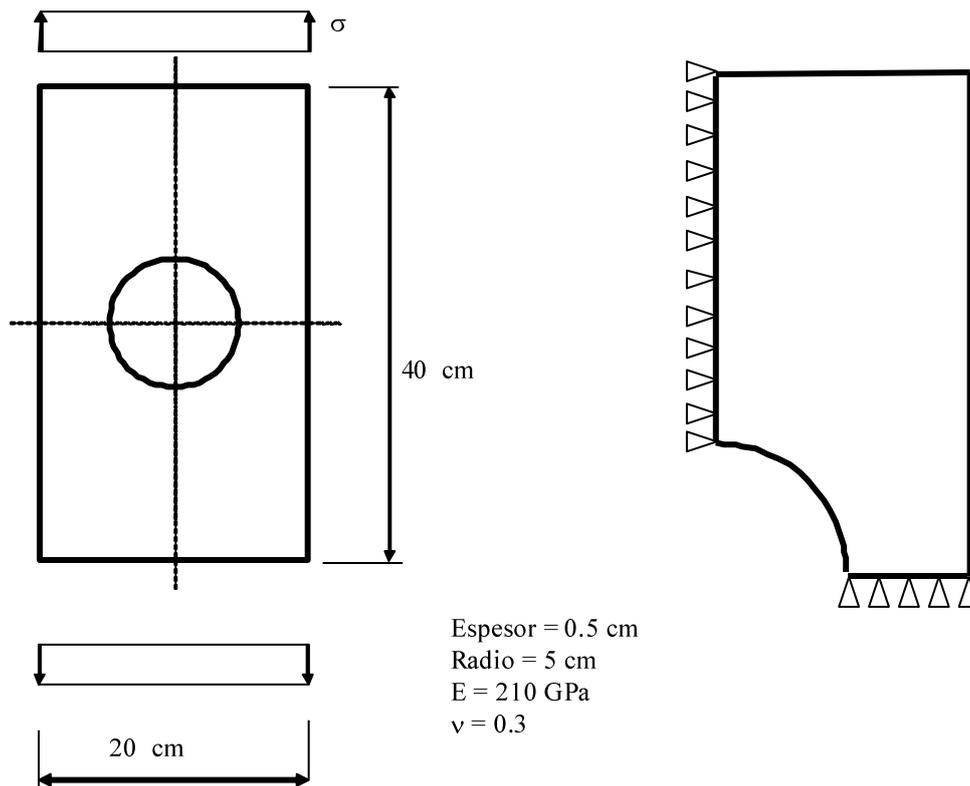


Figura 3. Placa con agujero central.

A continuación se indican todos los pasos a seguir para modelar el componente anterior en ANSYS, obtener una solución aproximada mediante el método de los elementos finitos y analizar la solución obtenida.

El modelado mediante ANSYS lo dividiremos en los siguientes apartados: preferencias de ANSYS, definición de tipos de elementos y de materiales, definición del modelo geométrico, generación de la malla de elementos finitos, condiciones de contorno, resolución del problema, análisis de resultados y mallado adaptativo.

2.1 PREFERENCIAS DE ANSYS

Una vez iniciado ANSYS, lo primero que podemos hacer es seleccionar el tipo de problema que se va a analizar con el fin de filtrar las opciones de la interfaz gráfica y que sólo se muestre lo que nos interesa. Esto se puede hacer con la opción Preferencias del menú principal. Aunque este paso no es necesario resulta conveniente para simplificar las opciones del programa. En la Figura 4 se representa el cuadro de diálogo de preferencias. Podemos especificar la disciplina del modelo (tipo de problema físico) y la opción de versión del MEF que utilizaremos (método *h* o método *p*).

Para esta práctica elegiremos la disciplina estructural (vamos a analizar un problema elástico lineal) y el método *h* (el más habitual, en el que el error de discretización de la solución de elementos finitos se controla reduciendo el tamaño de los elementos y todas las funciones de forma son nodales).

Una vez elegidas las preferencias hacemos clic en OK, se cierra el cuadro de diálogo y el programa sólo mostrará las opciones asociadas al tipo de problema elegido.

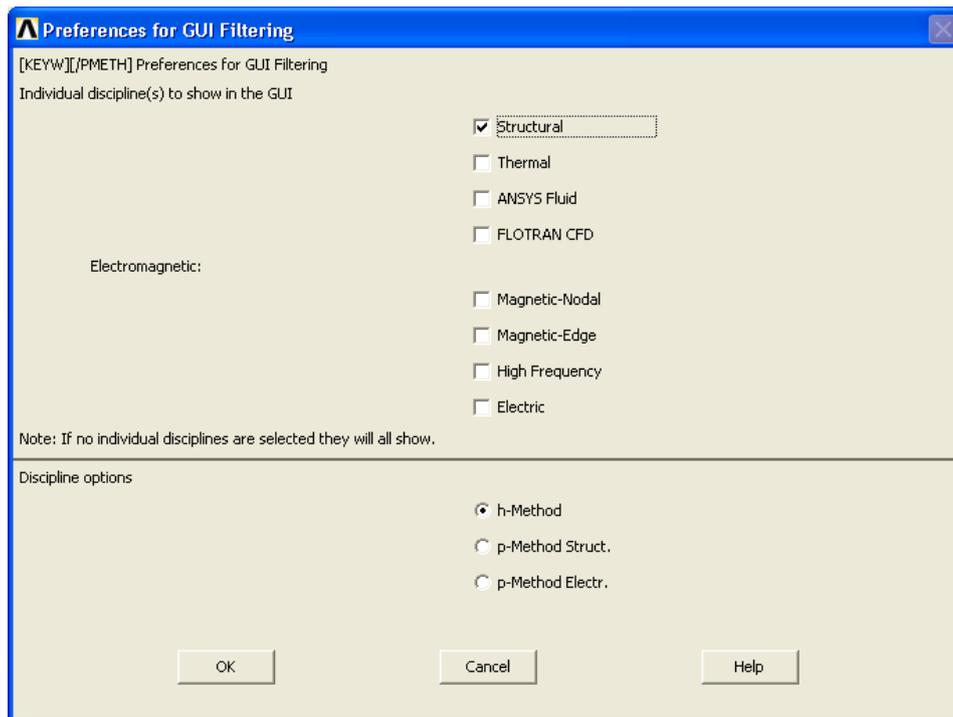


Figura 4. Cuadro de diálogo sobre preferencias.

A continuación hacemos clic en la opción Preprocessor del menú principal, ya que aquí están todos los comandos para crear el modelo geométrico y el de elementos finitos.

2.2 DEFINICIÓN DE TIPOS DE ELEMENTOS Y DE MATERIALES

Vamos a comenzar definiendo el tipo de elemento finito deseado. Para ello hacemos clic en Element Type y aparecen las opciones sobre tipos de elementos finitos. La primera opción es Add/Edit/Delete y haciendo clic se abre el cuadro de diálogo que permite añadir, modificar y eliminar tipos de elementos (Figura 5). Haciendo clic sobre el botón Add... podemos añadir el tipo de elemento requerido en la librería de tipos de elementos que se muestra en la Figura 6.

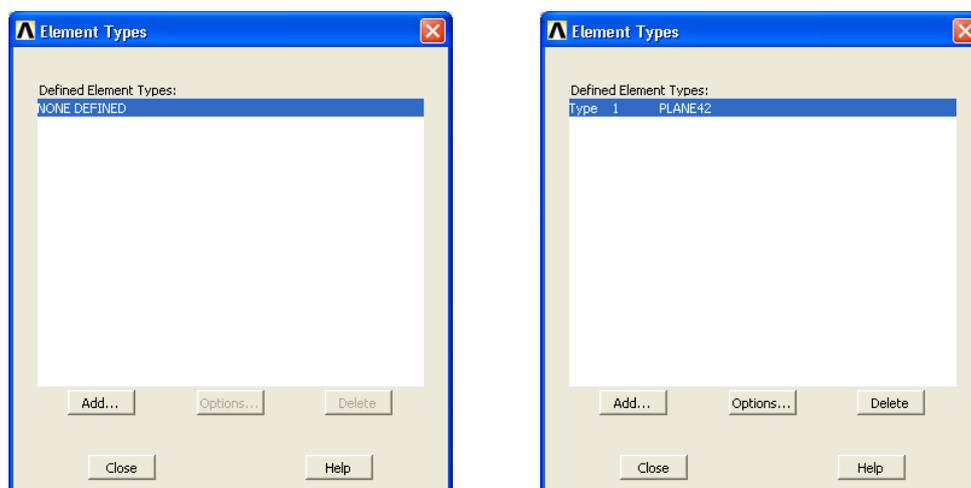


Figura 5. Cuadro de diálogo con los tipos de elementos definidos.

El tipo de elemento que utilizaremos en esta práctica es el cuadrilátero lineal, con la opción de tensión plana con entrada de espesor. Seleccionamos el elemento “Structural Solid” tipo “Quad 4node”, que para ANSYS es el elemento número 42 de su librería de elementos.

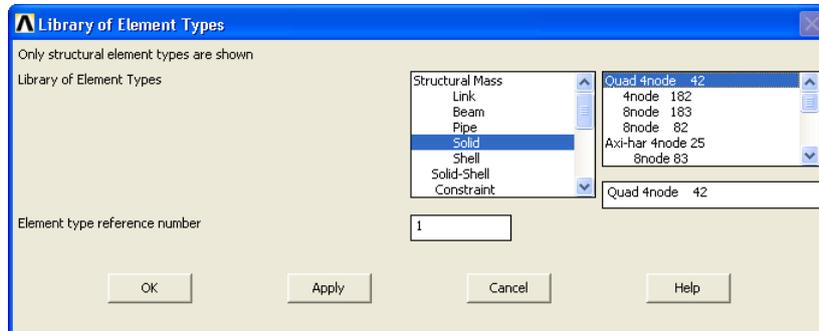


Figura 6. Librería de tipos de elementos.

Pulsando OK, vemos que el elemento PLANE42 ha quedado seleccionado (Figura 5). ANSYS le ha asignado el tipo de elemento número 1 (Type 1) de los posibles que se vayan a definir.

Falta por introducir la opción de tensión plana con entrada de espesor. En el cuadro de diálogo de tipos de elementos definidos seleccionamos el tipo 1 y hacemos clic en Options. Se abre un cuadro de diálogo que permite definir las opciones del elemento PLANE42 (Figura 7). Este tipo de elemento tiene seis opciones que podemos consultar haciendo clic en el botón de ayuda. En la opción K3 (comportamiento del elemento) seleccionamos “Plane strs w/thk”, es decir, tensión plana con entrada de espesor. Adicionalmente podemos seleccionar “Exclude” en la opción K2 (funciones de forma extra), que le indica a ANSYS que no debe utilizar funciones de forma no estándares.

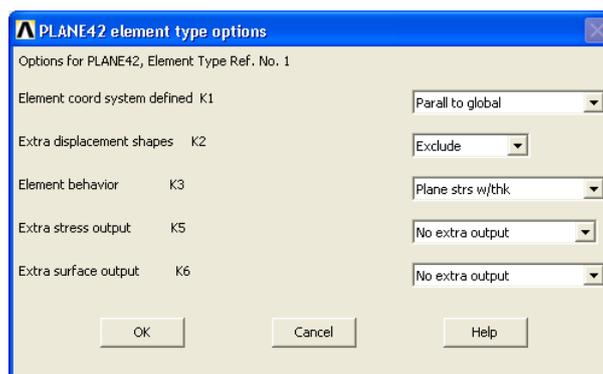


Figura 7. Opciones del elemento PLANE42.

Una vez seleccionadas las opciones deseadas hacemos clic en OK, luego cerramos la ventana Element Types haciendo clic en Close y por comodidad volvemos a hacer clic en la opción Element Type del menú principal, de manera que se escondan las opciones que cuelgan de la misma.

Ahora podemos definir el espesor de los elementos (dado que hemos seleccionado comportamiento de tensión plana con entrada de espesor). Para ello hacemos clic en la

opción Real Constants del menú principal y en la opción Add/Edit/Delete que abre el cuadro de diálogo de la Figura 8. En esta ventana podemos añadir, modificar y eliminar constantes asociadas a los tipos de elementos definidos, en nuestro caso el espesor del elemento PLANE42. Para ello hacemos clic en el botón OK y aparece la lista de tipos de elementos definidos, seleccionamos el tipo 1 y hacemos clic en OK. Aparece la ventana de la Figura 9 preguntando el espesor del elemento (THK) y que introduciremos en el Sistema Internacional de medida (0.005 m).

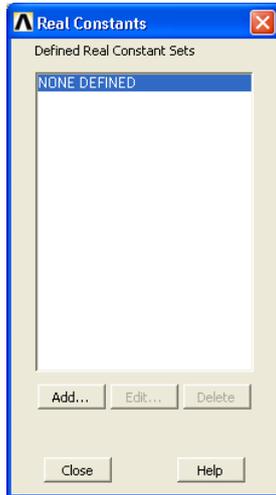


Figura 8. Definición de constantes reales.

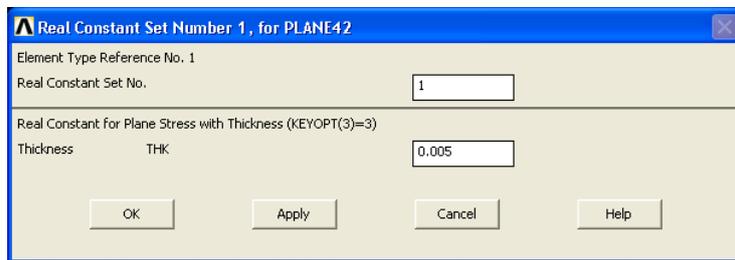


Figura 9. Espesor del elemento.

Para terminar con la definición del espesor hacemos clic en OK y luego en el botón Close del cuadro de diálogo Real Constants.

Definiremos a continuación las propiedades del material. En este problema (elasticidad lineal con cargas estáticas) sólo es necesario introducir el coeficiente de Poisson, que para el acero es $\nu = 0.3$, y el módulo de Young $E = 2.1 \cdot 10^{11}$ Pa. Para ello hacemos clic en la opción Material Props del menú principal y luego en Material Models. Se abre la ventana de la Figura 10 con la lista de materiales definidos por el usuario.

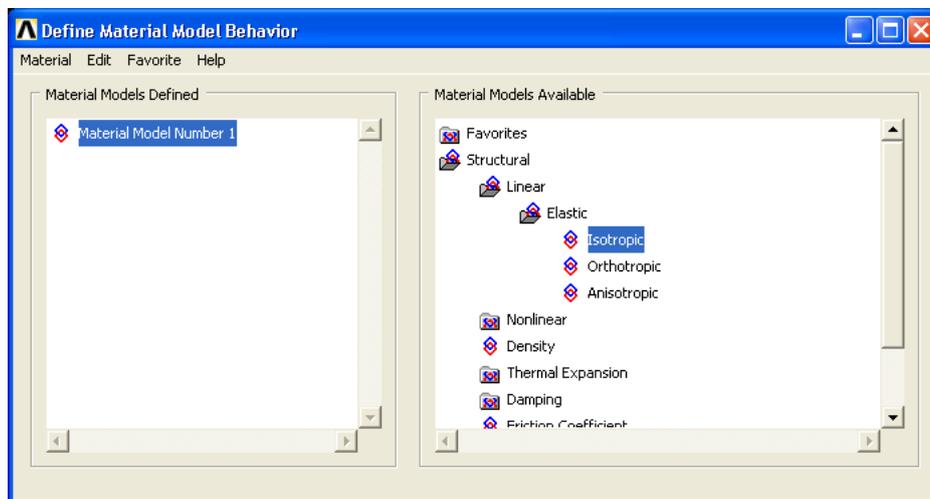


Figura 10. Definición de modelos de comportamiento de los materiales.

En la parte de la derecha seleccionamos el modelo de material “Structural Linear Elastic Isotropic” (haciendo doble clic en cada una de las opciones) y aparece la ventana de la Figura 11 donde introduciremos el módulo de Young (EX) y el coeficiente de Poisson (PRXY). Para terminar hacemos clic en OK y cerramos la ventana de definición de modelos de comportamiento de los materiales.

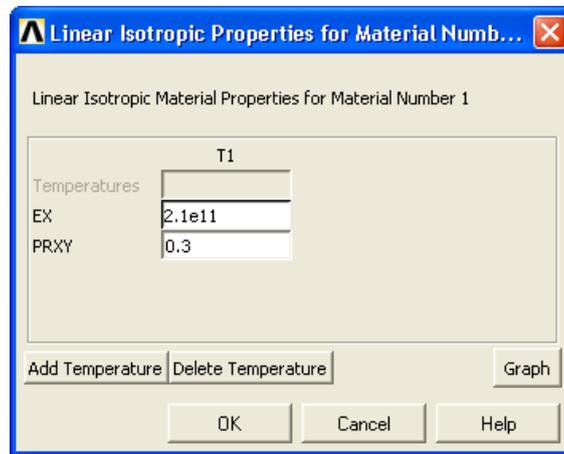


Figura 11. Propiedades de un material elástico lineal isótropo.

2.3 DEFINICIÓN DEL MODELO GEOMÉTRICO

Para definir la geometría en ANSYS se pueden utilizar diferentes estrategias. En este caso se realizará construyendo primero los puntos vértice del contorno, sobre estos las líneas del contorno y a partir de estas el área que define el dominio de la placa.

En primer lugar hacemos clic en la opción Modeling del menú principal, que contiene todos los comandos para trabajar con el modelo geométrico y de elementos finitos. A continuación hacemos clic en la opción Create, ya que vamos a crear la geometría. Vemos que aparecen opciones para diferentes tipos de entidades geométricas (puntos, líneas, áreas...).

En primer lugar definiremos los puntos llamados keypoints, puntos geométricos que se utilizan para determinar la geometría, ubicar sistemas de referencia, ubicar nodos, etc. Por ejemplo, un cuadrado puede quedar definido con cuatro keypoints asociados a las coordenadas de los vértices. Para nuestra pieza vamos a utilizar 5 keypoints, asociados a los 5 vértices que presenta. Para definirlos hacemos clic en la opción Keypoints del menú principal y a continuación en la opción In Active CS, que permite definir los puntos por sus coordenadas en el sistema de coordenadas activo. Aparece la ventana de la Figura 12 donde podemos introducir el número de keypoint (NPT) y las coordenadas. Si se deja en blanco el número de keypoint se asigna uno automáticamente, si se introduce un número ya existente se reemplazan sus coordenadas por las nuevas. Para seguir introduciendo puntos hacemos clic en Apply, para terminar hacemos clic en OK.

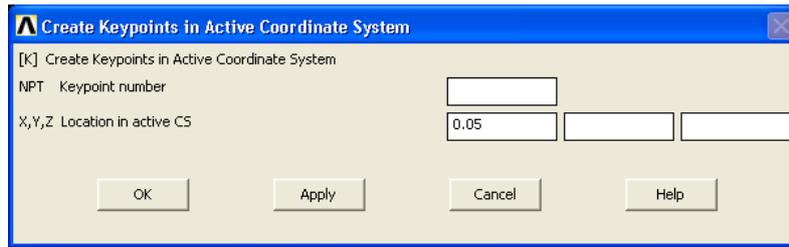


Figura 12. Generación de keypoints por sus coordenadas.

Los puntos a definir son:

NPT	X	Y
1	0.05	0.00
2	0.10	0.00
3	0.10	0.20
4	0.00	0.20
5	0.00	0.05

Cada vez que se genera un punto el área gráfica de la ventana principal de ANSYS se actualiza, mostrándose los puntos creados. Si nos equivocamos al definir algún punto basta con definirlo de nuevo.

Una vez definidos los vértices del modelo geométrico, estos se pueden conectar con las líneas que determinan el contorno. Para definir líneas hacemos clic en la opción Lines del menú principal (dentro de Create). En nuestro caso tenemos 4 líneas rectas (Lines) y un arco de circunferencia (Arcs). ANSYS permite considerar líneas de cualquier trazado (Splines), aunque éstas no se van a utilizar de momento.

Para definir las líneas rectas hacemos clic en la opción Lines dentro del menú Lines que ya hemos abierto. Aparecen varios métodos para crear una línea recta, elegimos la primera opción (Straight Line) que permite definir la recta a partir de los puntos extremos (keypoints). Aparece un cuadro de diálogo como el de la Figura 13, que es común a muchos comandos de selección de entidades geométricas. En la línea de estado inferior de la ventana principal de ANSYS podemos leer el mensaje “Pick or enter end keypoints of line”, es decir, tenemos que seleccionar los puntos extremos que definen la recta (es importante leer los mensajes de esta línea cada vez que ejecutemos un comando en el que haya que seleccionar entidades). Al llevar el cursor al área de representación gráfica se observa que su forma ha cambiado; ahora es una flecha vertical que indica que se pueden seleccionar objetos haciendo clic (flecha hacia arriba, opción Pick del cuadro de diálogo) o deseleccionar objetos que ya habían sido seleccionados (flecha hacia abajo, opción Unpick). Una vez seleccionado un punto podemos ver el resultado que se produciría antes de hacer clic en otro punto con sólo acercarse al mismo. Cada vez que seleccionemos dos puntos se creará automáticamente una línea uniéndolos. Cada línea será de un color diferente para poder distinguirlos fácilmente. Cuando terminemos de definir las líneas pulsaremos el botón OK o Cancel del cuadro de diálogo (la diferencia entre ambos botones es que el segundo cancelaría la definición de una línea que estuviera todavía en proceso, es decir, con sólo un punto seleccionado).

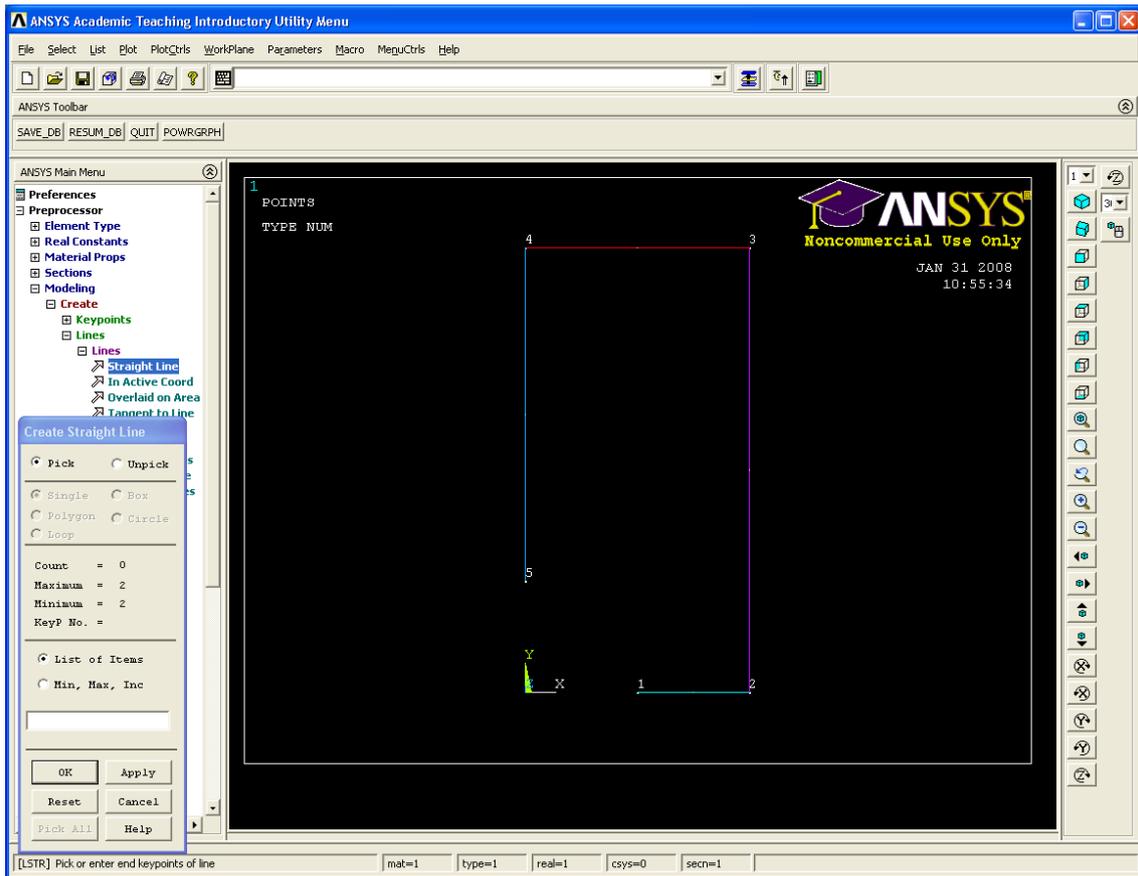


Figura 13. Generación de líneas rectas.

Para definir el arco de circunferencia hacemos clic en la opción Arcs del menú principal (dentro de Modeling Create Lines). A continuación elegimos la opción By End KPs & Rad de las varias que aparecen para crear arcos, con este método tenemos que seleccionar 3 puntos (los dos extremos del arco y un tercero que indica en qué semiplano de los dos definidos por los puntos anteriores está el centro del arco) y definir el radio del arco. La idea se aclara en la Figura 14. Para indicar el semiplano donde se ubica el centro del arco se selecciona un keypoint que se encuentre en el semiplano 1. También es posible seleccionar un keypoint del semiplano 2 y definir el radio con signo negativo. En este caso tenemos que utilizar la segunda opción, ya que no hemos definido ningún punto en el semiplano donde está el centro del arco.

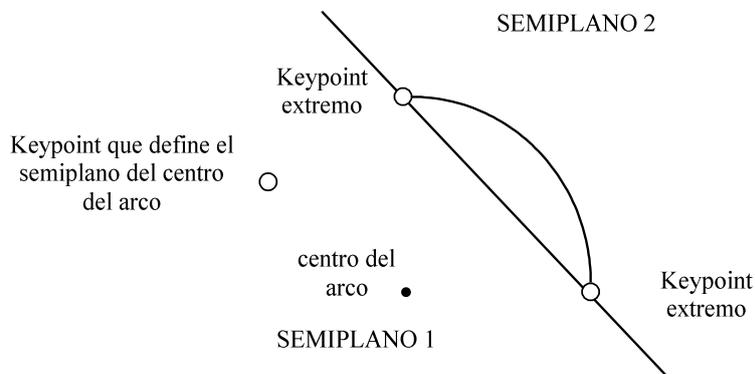


Figura 14. Definición del arco a través de dos keypoints y el radio.

Una vez abierto el cuadro de diálogo de selección de entidades podemos leer en la línea de estado que debemos seleccionar los keypoints inicial y final del arco. Una vez hecho esto hacemos clic en el botón OK o Apply del cuadro de diálogo y nos pedirá que seleccionemos el keypoint que está en el mismo semiplano que el centro de curvatura del arco. Como no se ha definido ninguno se elige alguno del otro semiplano, por ejemplo el 3. Al seleccionarlo aparece una nueva ventana donde introducimos el valor del radio (con signo negativo), tal como se muestra en la Figura 15. Para terminar hacemos clic en el botón OK y aparece dibujado el arco en el área de representación gráfica.

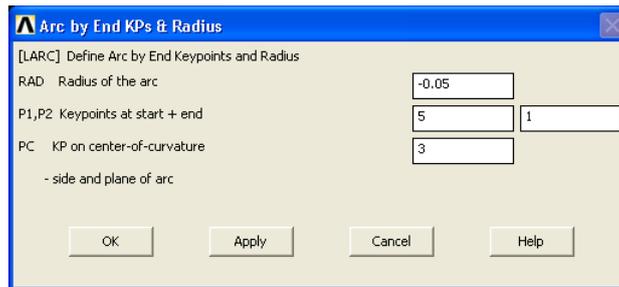


Figura 15. Definición de un arco por sus puntos extremos y el radio.

Para terminar con la definición de la geometría hay que generar la superficie de la placa, definida a partir de las líneas del contorno. Para ello hacemos clic en la opción Areas del menú principal (dentro de Modeling Create). Vemos que hay varias opciones para definir una superficie, en este caso elegimos Arbitrary y luego By Lines, que permite definir el área seleccionando todas las líneas del contorno. Se abre un cuadro de diálogo para seleccionar las líneas, las seleccionamos todas y hacemos clic en el botón OK. En el área de representación gráfica aparece la superficie que define la placa (modelo geométrico), tal como se muestra en la Figura 16.

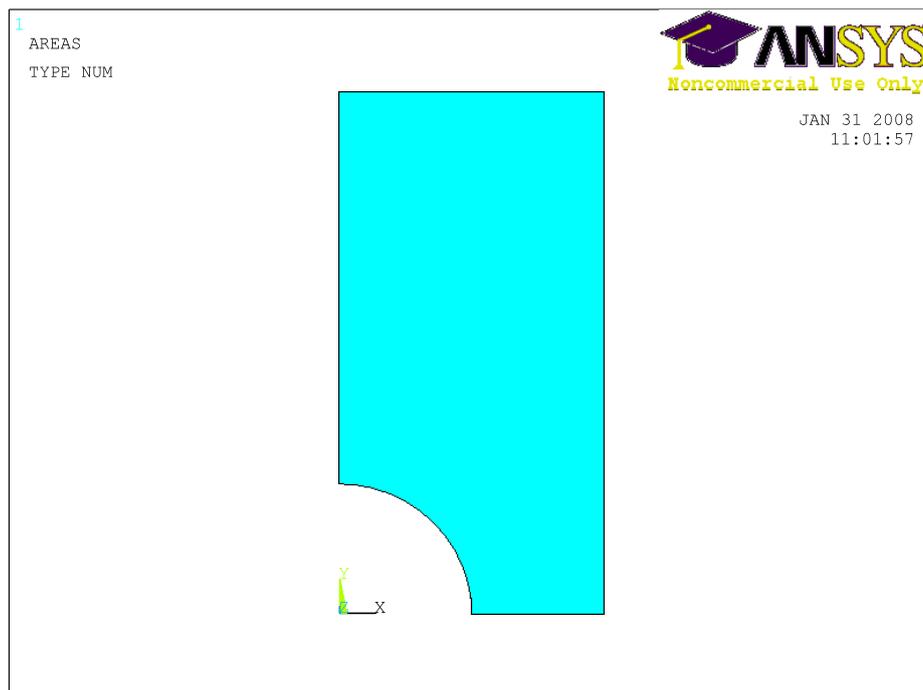


Figura 16. Modelo geométrico de la placa.

Es importante guardar el trabajo de vez en cuando y este es un buen momento para hacerlo. Una forma rápida de guardar es haciendo clic en el botón SAVE_DB de la barra de herramientas. Hay que llevar cuidado de no hacer clic en el botón RESUM_DB que hay al lado del anterior, ya que se recuperaría el estado guardado la última vez sin pedir ninguna confirmación, por lo que se perdería todo lo realizado desde entonces.

2.4 GENERACIÓN DE LA MALLA DE ELEMENTOS FINITOS

La generación de la malla es uno de los aspectos más importantes en elementos finitos. Es importante controlar el tamaño del elemento, de modo que éste sea adecuado para mantener acotado el error de la solución en los límites admisibles. Por otro lado, no se puede simplemente generar elementos muy pequeños en todo el modelo, dado que esto origina mallas con muchos nodos, sobre todo en problemas complejos en tres dimensiones, lo cual implica sistemas de ecuaciones con muchas incógnitas (por ejemplo, una malla de 100 nodos en un problema elástico bidimensional origina una matriz de rigidez de $200 \times 200 = 40000$ entradas, aunque muchas de ellas serán nulas).

En las zonas donde la solución sea muy suave (poca variación de las tensiones) es fácil que la solución aproximada de elementos finitos se acerque a la exacta, por lo que el error de discretización es pequeño y los elementos pueden ser grandes. En aquellas zonas donde es previsible que el error de discretización sea mayor (en este caso en torno al agujero, ya que aquí hay un mayor gradiente de las tensiones) se utilizarán elementos más pequeños para que la solución de elementos finitos se aproxime mejor a la solución exacta.

ANSYS permite establecer el tamaño de los elementos de la malla inicial de forma automática (opción Smart Size), estableciendo un nivel de refinamiento cualitativo, o de forma manual, estableciendo un tamaño específico para los elementos. En este caso estableceremos el tamaño de forma manual. Es posible definir el tamaño de elemento de múltiples formas. Una opción es definir el tamaño deseado en las cercanías de cada keypoint, que es la que adoptaremos a continuación. Para la malla inicial en el modelo de la placa utilizaremos los siguientes valores:

Keypoint	1	2	3	4	5
Tamaño de elemento	0.02	0.03	0.05	0.05	0.02

Para establecer el tamaño de los elementos hacemos clic en la opción Meshing del menú principal (dentro de Preprocessor). Aparecen varias opciones para el mallado, en este caso seleccionamos Size Cntrls (controles del tamaño), ManualSize y Keypoints. Aparecen tres opciones, All KPs para establecer el mismo tamaño en todos los puntos, Picked KPs para establecer un determinado tamaño en un conjunto de puntos que seleccionaremos y Clr Size para eliminar el tamaño definido previamente en los keypoints. Hacemos clic en Picked KPs y se abre un cuadro de diálogo para seleccionar keypoints. Seleccionamos por ejemplo el 1 y el 5, hacemos clic en el botón OK y aparece una ventana como la de la Figura 17 que permite definir la longitud de los lados de elemento que concurren en los puntos seleccionados. Tras introducir el tamaño hacemos clic en OK y repetimos el mismo procedimiento hasta que hayamos definido el tamaño de los elementos en todos los keypoints.

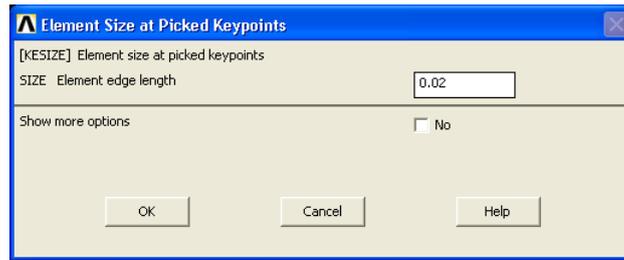


Figura 17. Definición del tamaño de elemento en keypoints.

Sólo queda dar la orden de mallar. El programa debe generar los nodos de la malla de elementos finitos en base a toda la información geométrica y de tamaño de elemento introducida. Para ello hacemos clic en la opción MeshTool del menú principal (dentro de Meshing). Se abre una ventana con herramientas para definir los atributos de la malla, el tipo de mallado (manual o automático), el tamaño de los elementos, la generación de la malla y el refinamiento. Desde esta utilidad se puede controlar casi todo el proceso de mallado, incluidas las operaciones que hemos realizado anteriormente.

Para generar la malla elegimos la opción Areas en el cuadro combinado que hay junto a la palabra Mesh (vamos a mallar una superficie), elegimos Quad en las opciones que hay junto a la palabra Shape (forma cuadrilátera de los elementos) y la opción Free (mallado libre, es decir, el generador de mallas coloca con total libertad los nodos en la superficie a mallar). Cuando hagamos clic en el botón Mesh se abrirá un cuadro de diálogo para seleccionar las superficies a mallar, seleccionamos la única que hemos definido y hacemos clic en el botón OK. Aparece una malla como la de la Figura 18 en el área de representación gráfica (la malla obtenida puede ser diferente).

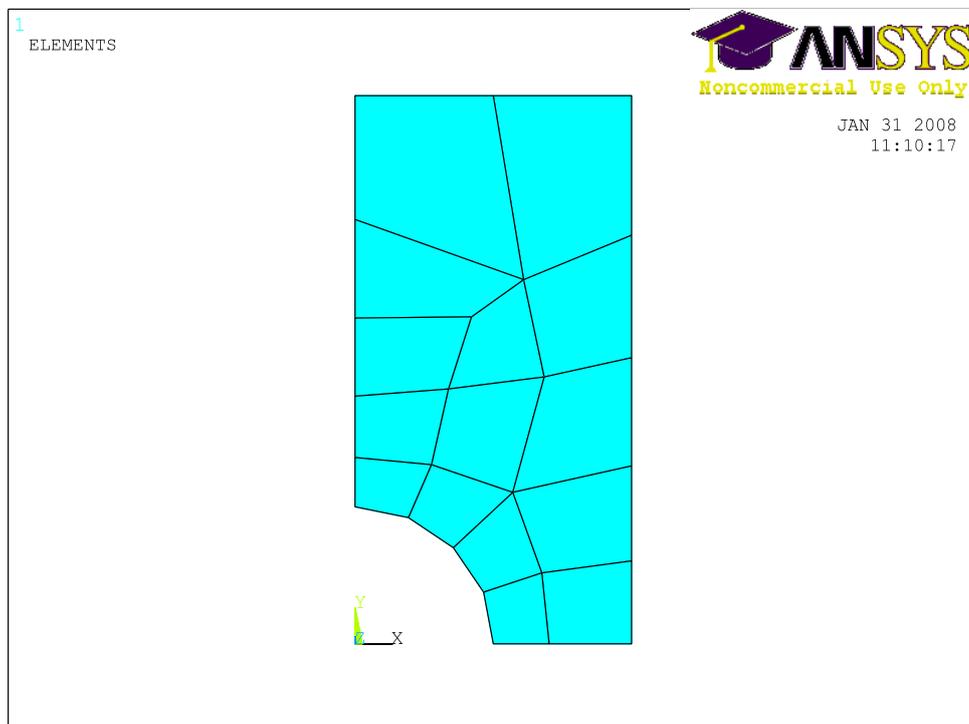


Figura 18. Malla de elementos finitos.

ANSYS utiliza el método frontal para resolver el sistema de ecuaciones final. En este método se van ensamblando secuencialmente los elementos y simultáneamente resolviendo las ecuaciones con los grados de libertad que hay activos en el frente. La eficiencia del método aumenta cuando se reduce el ancho de frente o *wavefront* (número de grados de libertad activos en cada momento). Este ancho de frente depende del orden en que se vayan ensamblando los elementos y por tanto se puede optimizar el proceso reordenando adecuadamente dicha secuencia. Para ello hacemos clic en la opción Numbering Ctrl's del menú principal (controles de numeración). Aparecen varias opciones para controlar la numeración de diferentes entidades. Hacemos clic en la última opción (Element Reorder) y aparecen más opciones para controlar la renumeración de los elementos (se trata de modificar la numeración interna de los elementos para la secuencia de ensamblado durante el proceso de solución, no afecta a la identificación de los elementos). Hacemos clic en la opción Reorder by List y se abre una ventana como la de la Figura 19.

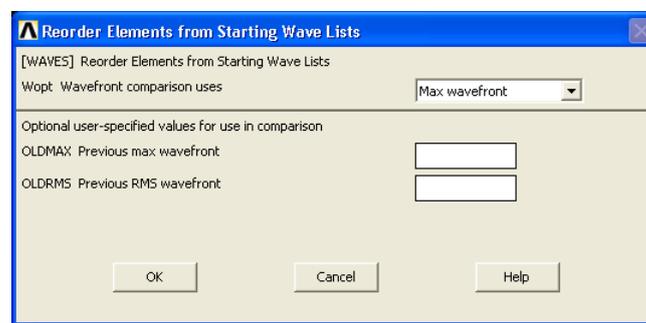


Figura 19. Renumeración de los elementos para reducir el ancho de frente.

Se puede elegir el criterio para comparar dos anchos de frente (valor máximo o valor cuadrático medio) y establecer el valor de comparación. Dejaremos las opciones que hay por defecto y haremos clic en el botón OK. ANSYS reordena la numeración de los elementos. Al acabar la renumeración podemos leer en la ventana ANSYS Output un mensaje donde se indican los valores máximo y medio del ancho de frente para la nueva numeración y para la anterior.

2.5 CONDICIONES DE CONTORNO

Antes de pasar a calcular la solución del problema planteado se deben imponer las condiciones de contorno que afectan al componente mecánico. Las condiciones de contorno pueden imponerse sobre el modelo sólido (líneas, áreas, volúmenes...) o sobre el modelo de elementos finitos (nodos y elementos). En general la primera opción suele ser más cómoda y rápida, dado que no es necesario volver a introducir las condiciones de contorno al refinar la malla. Evidentemente, para resolver el sistema de ecuaciones ANSYS utiliza las condiciones de contorno impuestas en el modelo de elementos finitos. Por ello, si se imponen en el modelo sólido, el programa se encarga de transferirlas automáticamente al modelo de elementos finitos antes de resolver el sistema de ecuaciones.

En el caso que nos ocupa se tiene aplicada una distribución uniforme de presión sobre el contorno superior de la pieza (carga de tracción) y dos condiciones de apoyo en las

líneas de simetría del componente (la condición de simetría supone desplazamiento nulo en dirección normal al contorno), tal como se indica en la Figura 20.

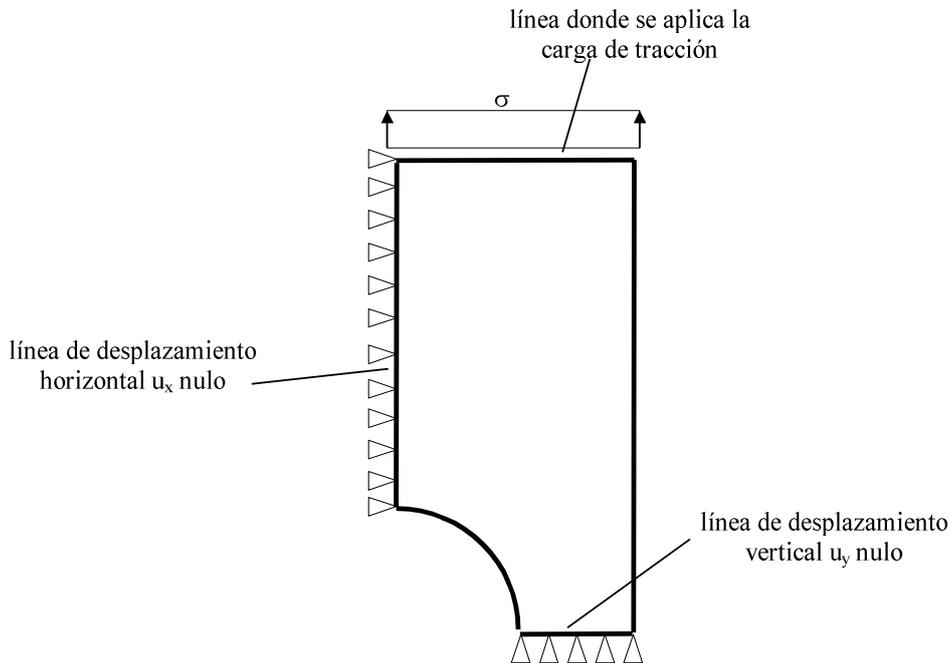


Figura 20. Condiciones de contorno aplicadas.

Para imponer las condiciones de contorno hacemos clic en la opción Loads (cargas) del menú principal (dentro de Preprocessor). En primer lugar indicaremos el tipo de análisis que vamos a realizar haciendo clic en Analysis Type y después en New Analysis. Aparece el cuadro de diálogo de la Figura 21 donde indicaremos que se trata de un análisis de tipo estático (Static). Para cerrar la ventana hacemos clic en OK.

A continuación elegimos la opción Define Loads del menú principal (dentro de Preprocessor Loads, aunque podemos encontrar la misma opción dentro del módulo Solution).

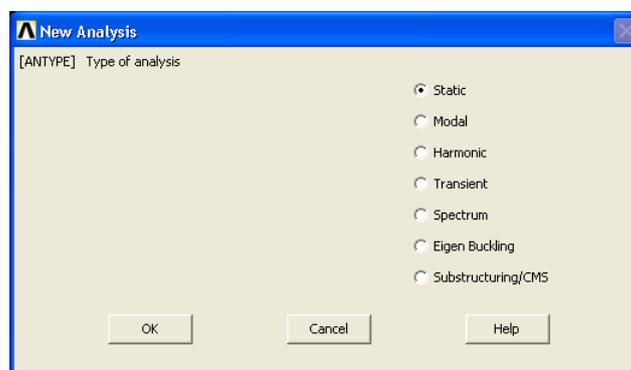


Figura 21. Selección del tipo de problema a resolver.

Hacemos clic en la opción Apply para aplicar nuevas condiciones de contorno. A continuación hacemos clic en Structural y aparecen los diferentes tipos de condiciones de contorno que podemos aplicar.

Empezaremos por las condiciones de desplazamiento (Displacement). Se pueden aplicar condiciones de desplazamiento (condiciones de apoyo) en diferentes entidades del modelo geométrico y en los nodos. En nuestro caso optamos por la opción Symmetry B.C. (condiciones de contorno de simetría) y hacemos clic en la opción On Lines para seleccionar las dos líneas de simetría sobre el contorno (se abre un cuadro de diálogo para seleccionar las líneas con funcionamiento similar a los que ya hemos utilizado anteriormente). Cuando terminemos podremos observar el símbolo S junto a las líneas del contorno donde hemos aplicado la condición de simetría.

Para aplicar la carga distribuida en la línea superior hacemos clic en la opción Pressure del menú principal (dentro de Apply Structural). Seleccionamos la opción On Lines y se abre un cuadro de diálogo para seleccionar líneas. Hacemos clic en la línea superior y pulsamos el botón OK del cuadro de diálogo. Aparece una ventana como la mostrada en la Figura 22 solicitando el valor de la presión aplicada (100 MPa). ANSYS considera las presiones de compresión positivas, y las de tracción, como es en nuestro caso, negativas.

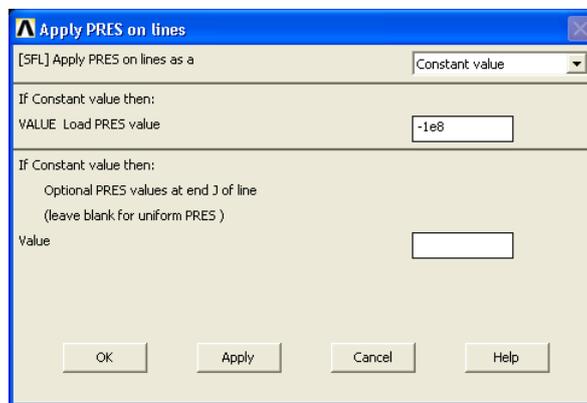


Figura 22. Aplicación de una tensión uniforme de 100 MPa en una línea.

Al hacer clic en el botón OK aparecerá representada la carga distribuida como una flecha de color rojo sobre el contorno.

Hasta ahora las condiciones de contorno están aplicadas en el modelo geométrico, si por ejemplo dibujamos los elementos de la malla (opción Plot Elements del menú de utilidades) veremos que ya no aparecen las condiciones de contorno, mientras que si dibujamos la superficie (opción Plot Areas del menú de utilidades) aparecen dibujadas de nuevo. ANSYS se encargar de transferir automáticamente las condiciones de contorno del modelo geométrico al modelo de elementos finitos antes de calcular la solución, pero si queremos visualizar dichas condiciones podemos transferirlas manualmente. Para ello hacemos clic en la opción Operate del menú principal (dentro de Define Loads) y a continuación en la opción Transfer to FE. Hacemos clic en la opción All Solid Lds y aparece un cuadro de diálogo informando de que se van a transferir las condiciones de contorno del modelo sólido (modelo geométrico) al modelo de elementos finitos. Hacemos clic en OK y dibujamos los elementos (Plot Elements en el menú de utilidades). Veremos representadas las condiciones de desplazamiento en cada nodo mediante un triángulo y la presión en los lados de los elementos que caen sobre el contorno superior mediante una flecha roja, tal como se muestra en la Figura 23. Posiblemente la presión se represente como una línea roja en el contorno en vez de una

flecha, para cambiar este comportamiento hay que seleccionar la opción “Show pres and convect as Arrows” en la ventana de configuración de símbolos (menú de utilidades, PlotCtrls, Symbols...).

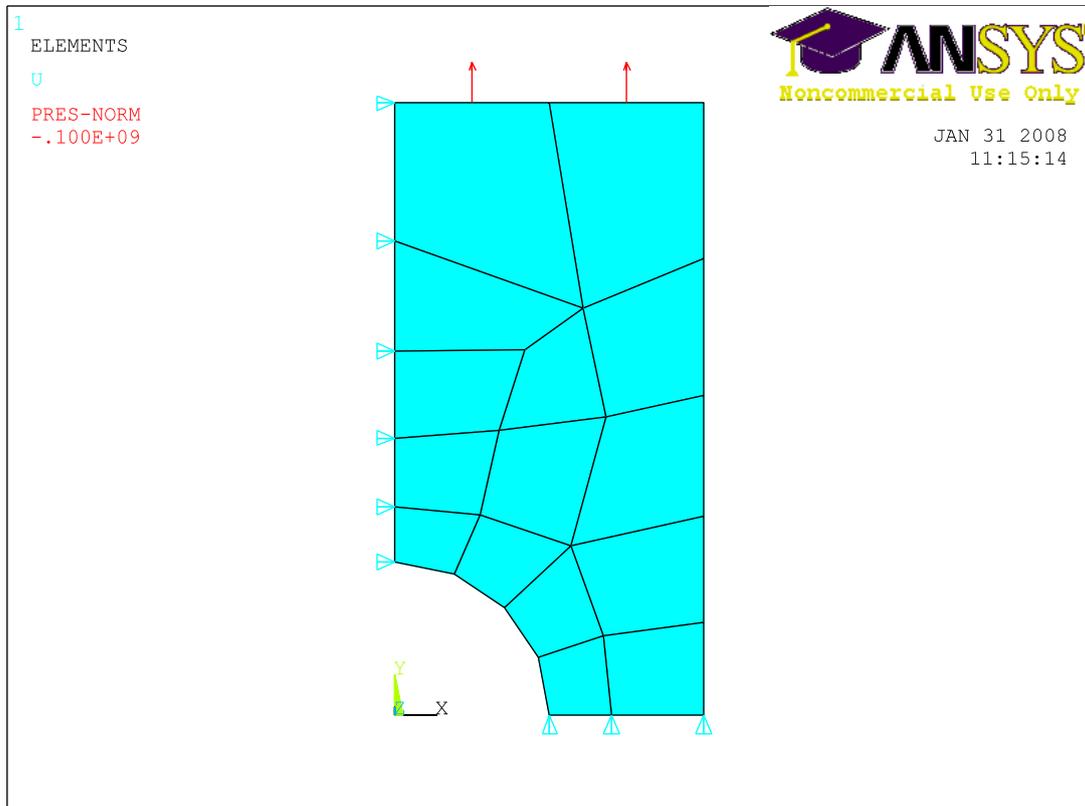


Figura 23. Condiciones de contorno aplicadas sobre el modelo de elementos finitos.

Ahora ya están completamente definidos el modelo sólido y el modelo de elementos finitos. Podemos cerrar el módulo preprocesador haciendo clic en la opción Preprocessor del menú principal. También es conveniente que guardemos el trabajo realizado hasta ahora (por ejemplo haciendo clic en el botón SAVE_DB de la barra de herramientas).

2.6 RESOLUCIÓN DEL PROBLEMA

Para calcular la solución del problema hacemos clic en la opción Solution del menú principal. Como se puede observar, en este menú aparecen de nuevo las opciones para definir el tipo de análisis y las condiciones de contorno (es indiferente hacerlo aquí o en el preprocesador). Hacemos clic en la opción Solve y aparecen otras tres opciones para calcular la solución. La que emplearemos es Current LS, que calcula la solución con el paso de carga actual (en un problema elastoestático sólo hay un paso de carga). Aparece un cuadro de diálogo informando de que va a comenzar el cálculo de la solución (comando SOLVE) y solicitando que se revise la información sobre el modelo definido, así como una ventana con dicha información (comando /STATUS), tal como se muestra en la Figura 24. Si hacemos clic en el botón OK comienza el cálculo de la solución, también podemos cancelar el cálculo haciendo clic en el botón Cancel. En la ventana de estado podemos comprobar que se ha definido un problema bidimensional con grados

de libertad UX y UY, es decir, desplazamientos en el plano XY, y que el tipo de análisis es estático.

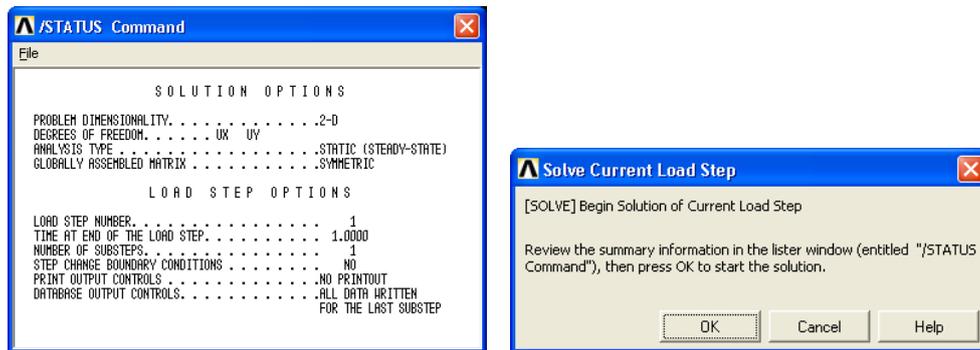


Figura 24. Ventana de estado y cuadro de diálogo para comenzar el cálculo de la solución.

El cálculo requiere unos segundos (en este caso). Al finalizar, ANSYS muestra un mensaje como el de la Figura 25 que indica que ha finalizado el cálculo. Cerramos el mensaje haciendo clic en el botón Close. También podemos cerrar el módulo de solución haciendo clic en Solution en el menú principal.

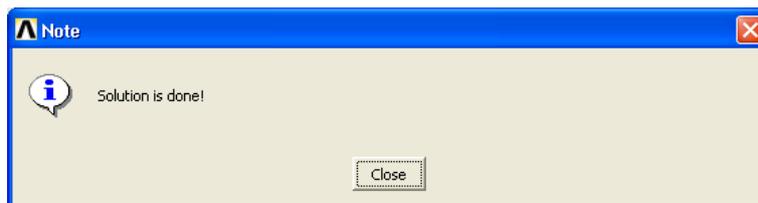


Figura 25. Aviso de que el cálculo ha terminado.

2.7 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Una vez resuelto el problema mediante el método de los elementos finitos podemos analizar los resultados con el postprocesador de ANSYS. Para entrar en el postprocesador hacemos clic en la opción General Postproc del menú principal. Como puede observarse, existe otro postprocesador en el menú principal llamado TimeHist Postpro, éste se utiliza en problemas donde existe dependencia del tiempo.

El postprocesador es un módulo fundamental en los programas de elementos finitos, pues permite ver los resultados, realizar representaciones gráficas de interés, dibujar en mapas de colores y vectoriales los campos de las variables consideradas, como por ejemplo tensiones, deformaciones, tensiones equivalentes, error de discretización, etc. Además posibilita el llevar a cabo operaciones con los resultados para obtener información necesaria y que no haya sido obtenida directamente por el programa.

Es importante que cualquier resultado que se vea en pantalla se compare con lo que intuitivamente se espera que ocurra en la realidad. Es muy usual obtener resultados que no son correctos debido a errores en la etapa de creación del modelo, sobre todo cuando no se tiene cierta experiencia con este tipo de programas.

En este apartado veremos cómo dibujar la deformada del componente al aplicar las cargas bajo las condiciones de contorno impuestas. También veremos cómo obtener representaciones de diferentes variables, por ejemplo, se visualizará el campo de tensiones en dirección vertical, SY, que aparece en el interior de la pieza. Veremos cómo obtener listados de cualquier variable, por ejemplo, para los nodos de la línea inferior se listarán los valores numéricos de sus desplazamientos. También veremos cómo representar gráficamente el valor que toma una variable a lo largo de un camino, por ejemplo cómo varía SY en las proximidades del agujero. Otro resultado importante a tener en cuenta es la estimación del error cometido al resolver el problema mediante el MEF con la discretización empleada.

Bajo General Postproc (en el menú principal) aparece un gran número de opciones para mostrar información, leer resultados, hacer representaciones gráficas, sacar listados, hacer consultas y realizar diferentes tipos de operaciones con los resultados.

Lo primero que haremos es dibujar la deformada del componente, lo que nos puede dar idea de si las condiciones de contorno se han aplicado correctamente y el modelo de elementos finitos se comporta como cabe esperar. Para ello hacemos clic en la opción Plot Results del menú principal y aparecen las diferentes opciones para dibujar un gráfico con ANSYS (las mismas opciones podemos encontrarlas en el menú Plot Results del menú de utilidades). La primera opción es Deformed Shape y haciendo clic aparece un cuadro de diálogo como el de la Figura 26,

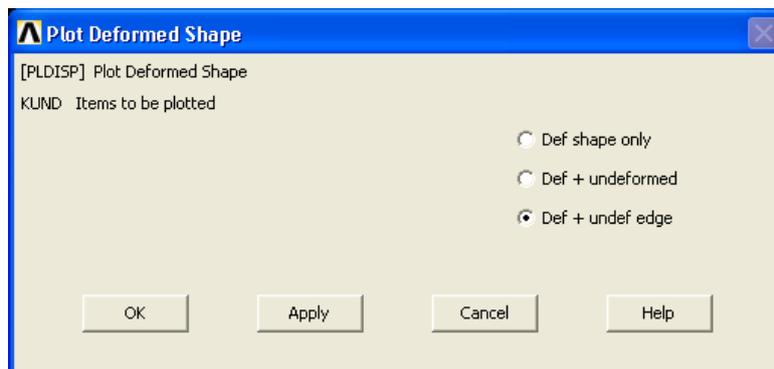


Figura 26. Cuadro de diálogo para dibujar la deformada.

donde se puede elegir si dibujar sólo la deformada, superponer también la no deformada (para poder comparar y así ver mejor la deformación que tiene lugar) o superponer el contorno de la no deformada. En este caso elegimos la última opción y hacemos clic en el botón OK, aparece un gráfico como el de la Figura 27.

La figura muestra que la tracción ha alargado la pieza, de modo que la línea superior se desplaza hacia arriba. En la zona central se observa un cierto estrechamiento. Evidentemente los valores numéricos de los desplazamientos son muy pequeños, así que el dibujo muestra desplazamientos multiplicados por un factor de escala para que sean visibles. Las condiciones de contorno esenciales (restricciones de desplazamientos) se verifican en las líneas de simetría, ya que están impuestas directamente en el sistema de ecuaciones que se resuelve.

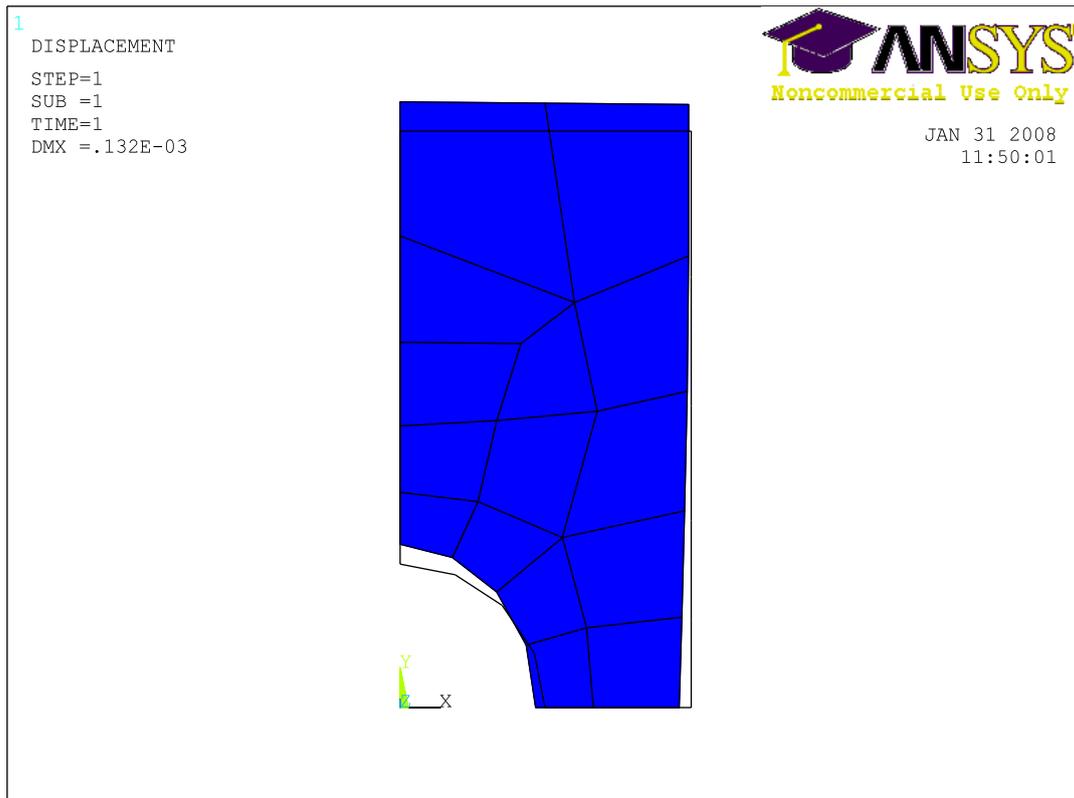


Figura 27. Placa deformada bajo carga de tracción.

Para ver como varía una variable en el dominio de un componente lo más habitual es dibujar un gráfico de contornos, que muestra mediante un mapa de colores la variable deseada. Esto lo podemos hacer con la opción Contour Plot (dentro de Plot Results). Pueden dibujarse gráficos de contorno para soluciones nodales (como los desplazamientos) y para soluciones en elementos (como las tensiones). Las soluciones en elemento pueden promediarse en los nodos (habitualmente para obtener una solución continua) y dibujarse entonces como si fueran soluciones nodales. Para dibujar el campo de tensiones en dirección y, SY, hacemos clic en Element Solu. Aparece la ventana que se muestra en la Figura 28, donde podemos elegir el campo a representar y algunas opciones gráficas. Elegimos Stress Y-direction SY y hacemos clic en OK. En el área de representación gráfica aparece el gráfico de contorno con su leyenda, tal como podemos ver en la Figura 29.

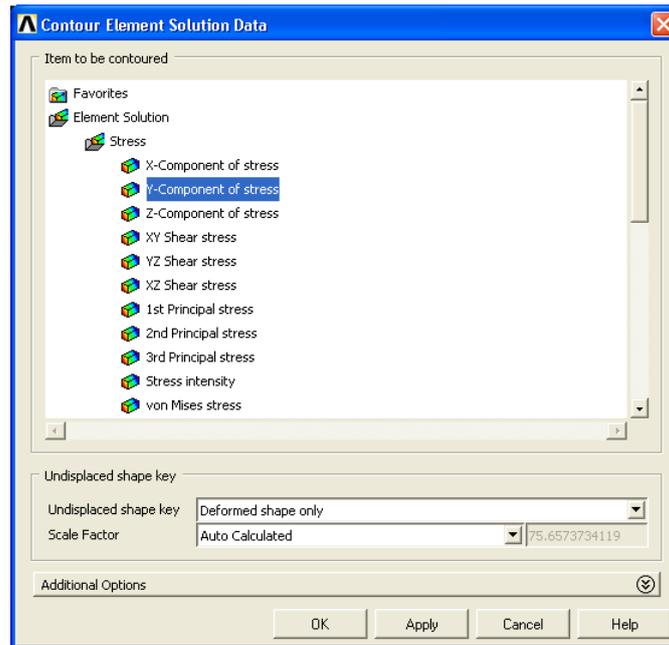


Figura 28. Cuadro de diálogo para gráficos de contorno de soluciones en elemento.

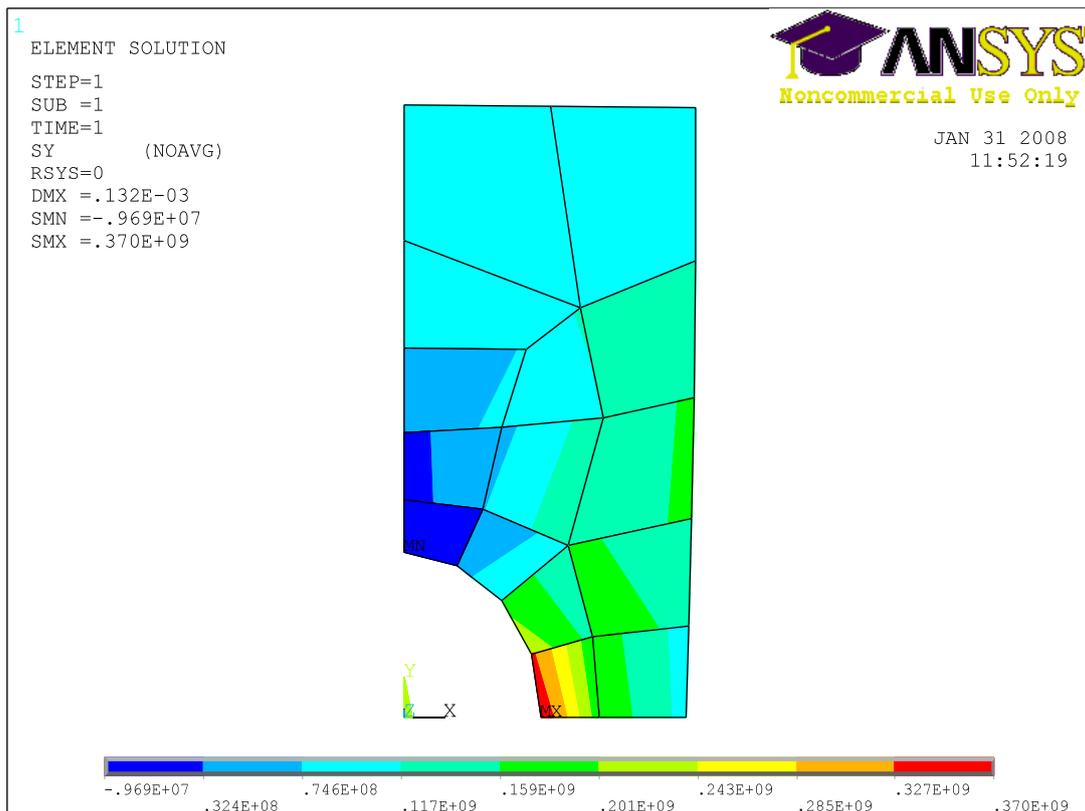


Figura 29. Campo de tensiones SY sin promediar.

Como puede observarse, el campo de tensiones no es continuo entre elementos, esto es debido a que las tensiones se obtienen a partir de las derivadas de los desplazamientos (grados de libertad que utiliza ANSYS). Dado que las funciones de forma usuales son de continuidad C^0 en la frontera entre elementos, el campo de desplazamientos será continuo pero no lo será el campo de deformaciones o de tensiones. Al margen de esto,

se observa que el valor máximo se alcanza en el agujero, reduciéndose la tensión al alejarnos de éste, lo que resulta lógico alrededor de un concentrador de tensiones. En la leyenda del gráfico se indica el tipo de solución (en elemento o nodal), la variable (SY), si está promediada o no (en este caso no lo está, NOAVG), el valor mínimo (SMN, localizado en el gráfico con MN) y el valor máximo (SMX, localizado en el gráfico con MX), así como la escala empleada en el mapa de colores.

Es posible obtener un campo de tensiones mejorado mediante técnicas de alisado, por ejemplo promediando la tensión en los nodos. Este procedimiento da lugar a un campo de tensiones continuo en la frontera entre elementos. Para representar el campo promediado hacemos clic en la opción Nodal Solu del menú principal (dentro de Contour Plot). Aparece una ventana similar a la de la Figura 28 pero con las soluciones nodales en vez de en elemento. Elegimos de nuevo Stress Y-direction SY y hacemos clic en el botón OK. En el área de representación gráfica aparece el gráfico de contorno de las tensiones promediadas, como en la Figura 30. Puede observarse cómo ahora el campo es continuo entre elementos (el contorno de los elementos no aparece por defecto).

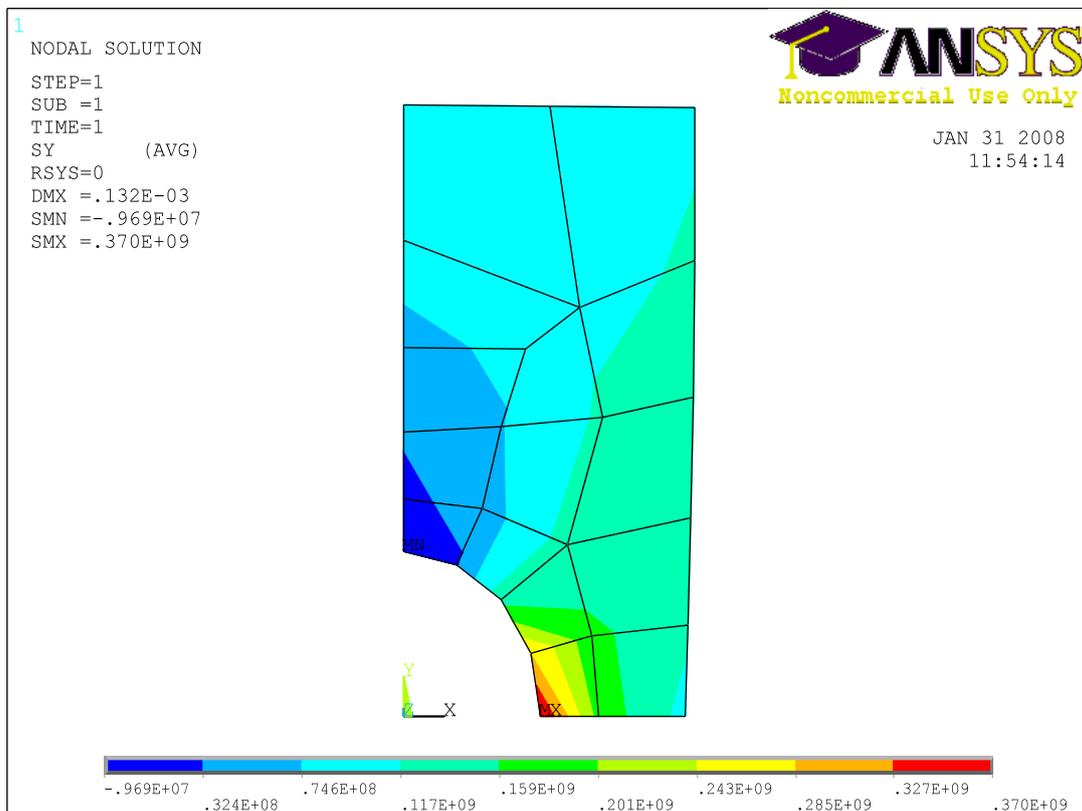


Figura 30. Campo de tensiones SY promediado en nodos.

Es interesante disponer de los valores numéricos calculados. Para ver como se puede obtener un listado sacaremos los valores numéricos de los desplazamientos en los nodos de la línea inferior ($Y=0$). En primer lugar hay que seleccionar dichos nodos. Para ello hacemos clic en la opción Select del menú de utilidades y luego en Entities... en el menú que se despliega. Aparece la ventana de selección de entidades de la Figura 31. Por defecto aparece Nodes como entidad, aunque se puede seleccionar cualquier otro tipo, también se puede elegir el método de selección (haciendo clic en la pantalla, por

localización, por atributos...). Dejamos las opciones por defecto y hacemos clic en el botón OK.



Figura 31. Cuadro de diálogo para selección de entidades.

A continuación hacemos clic en los tres nodos de la línea en cuestión y de nuevo hacemos clic en el botón OK del cuadro de diálogo. Para comprobar que están seleccionados los tres nodos podemos hacer un gráfico de nodos, para ello usamos la opción Plot Nodes del menú de utilidades. Sólo deben aparecer en pantalla los tres nodos seleccionados de la línea inferior.

Para listar cualquier resultado basta con ir al menú del postprocesador y elegir List Results. Aparecen todas las opciones para listas de resultados. En particular nos interesa la solución nodal, así que hacemos clic en Nodal Solution. Aparece la ventana de la Figura 32, elegimos DOF solution, Displacement vector sum (se listarán todos los grados de libertad y la resultante en cada nodo) y hacemos clic en el botón OK. Se abre una ventana con el listado solicitado, tal como en la Figura 33. El listado indica al final los valores máximos para cada variable y en qué nodo se localizan.

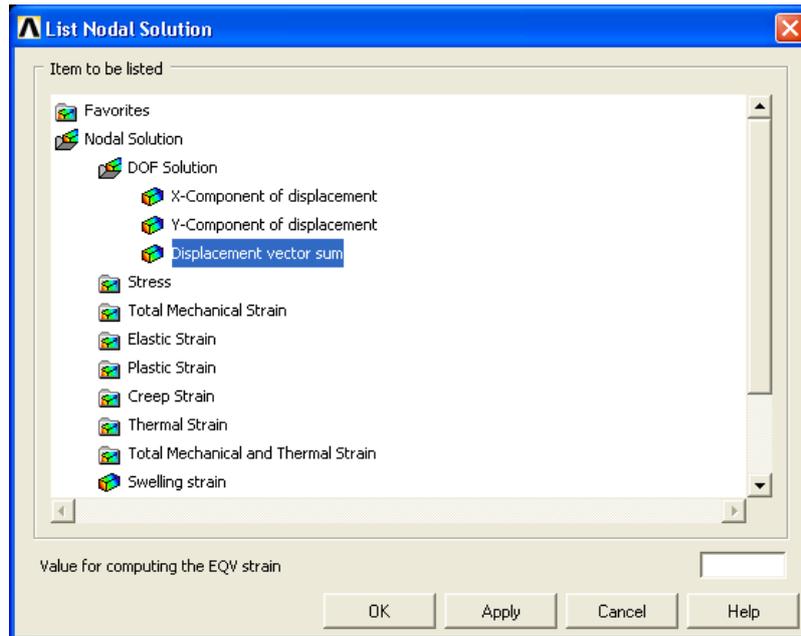


Figura 32. Cuadro de diálogo listar soluciones nodales.

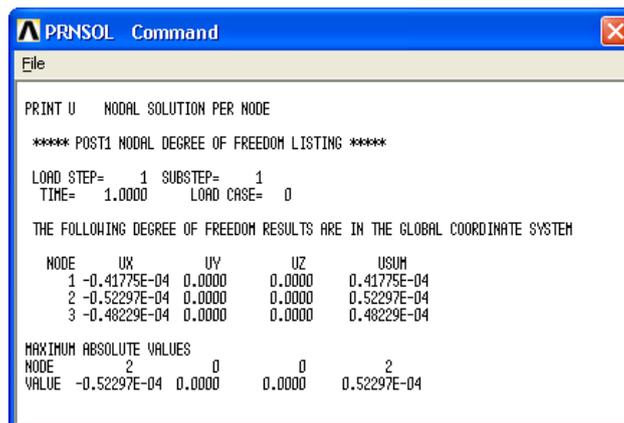


Figura 33. Listado de desplazamientos en los nodos seleccionados.

Para volver a seleccionar todos los nodos hacemos clic en la opción *Select Everything...* del menú de utilidades. Por supuesto se puede obtener un listado de cualquier variable sin hacer ninguna selección específica de entidades (solución en todos los nodos por ejemplo).

La tensión vertical S_Y a lo largo de la línea inferior del componente varía desde su valor mínimo en la superficie exterior hasta su valor máximo en el agujero. Es posible hacer una gráfica donde se observe dicha variación. Para ello, primero se debe definir un camino (en este caso la línea inferior) e indicar qué se desea representar sobre el mismo. Para definir un camino hacemos clic en la opción *Path Operations* del menú principal (dentro de *General Postproc*). Aparecen varias opciones para definir, eliminar y operar con caminos, así como realizar gráficos de las variables seleccionadas. En primer lugar hacemos clic en *Define Path* para definir el camino. Existen varias posibilidades para crear un camino, en esta ocasión lo haremos a partir de los nodos, hacemos clic en *By Nodes* y seleccionamos en pantalla los nodos extremos de la línea inferior (a través de la ventana usual de selección). Al hacer clic en el botón *OK* aparece el cuadro de diálogo

de la Figura 34 que solicita un nombre para el camino que se va a crear, por ejemplo LIN_INF, y algunos parámetros que dejaremos como están.

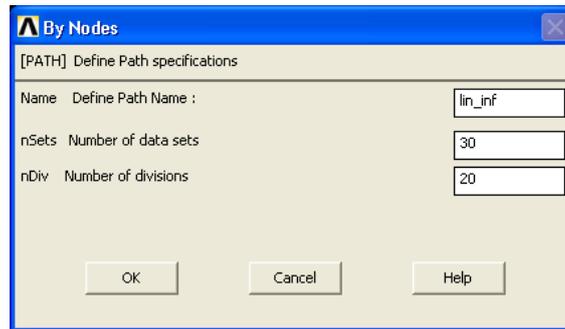


Figura 34. Cuadro de diálogo para definición de caminos.

Al hacer clic en el botón OK queda definido el camino y se abre una ventana con información sobre el mismo. Cerramos dicha ventana y pasamos a seleccionar la variable que queremos asociar a ese camino, en este caso SY. Para ello hacemos clic en la opción Map onto Path del menú principal (dentro de Path Operations). Aparece la ventana de la Figura 35 para seleccionar la variable (similar a las vistas anteriormente), con la novedad de que podemos indicar un nombre a la misma (si se deja en blanco pondrá el que tiene por defecto, en este caso SY). Se puede elegir promediar o no los resultados entre elementos (para tener un campo continuo). Al hacer clic en el botón OK se cierra la ventana y no se observa ningún cambio, pero si miramos la ventana ANSYS Output podemos ver alguna información sobre el camino creado y la variable asociada al mismo.

Para obtener el gráfico deseado hacemos clic en la opción Plot Path Item del menú principal (dentro de Path Operations) y luego en la opción On Graph. Aparece la ventana de la Figura 36 para seleccionar la variable a representar, elegimos SY y hacemos clic en OK.

En el área de representación gráfica aparece el gráfico de la Figura 37.

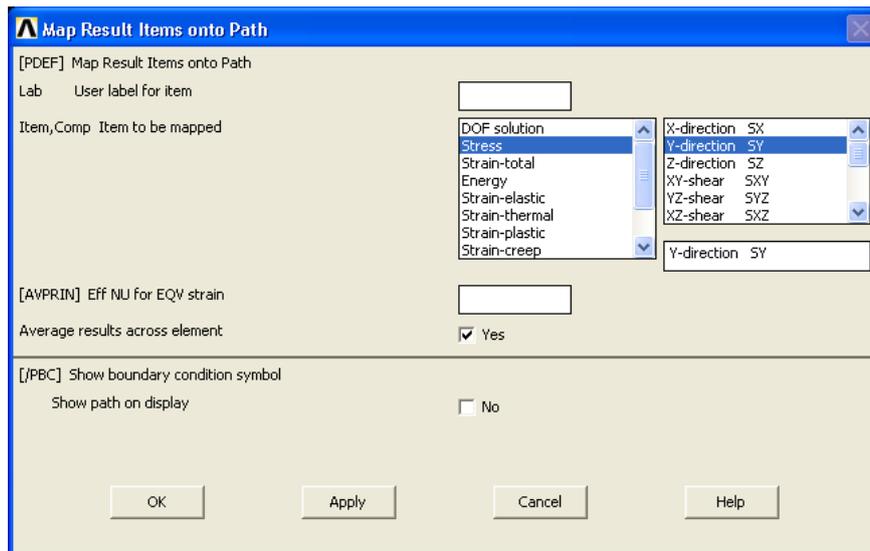


Figura 35. Cuadro de diálogo para asociar resultados a un camino.

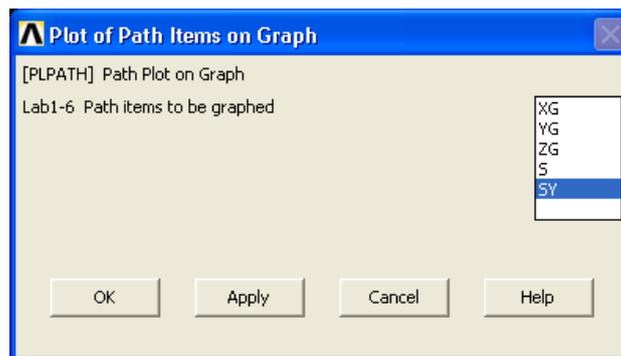


Figura 36. Cuadro de diálogo para seleccionar la variable a dibujar en un camino.

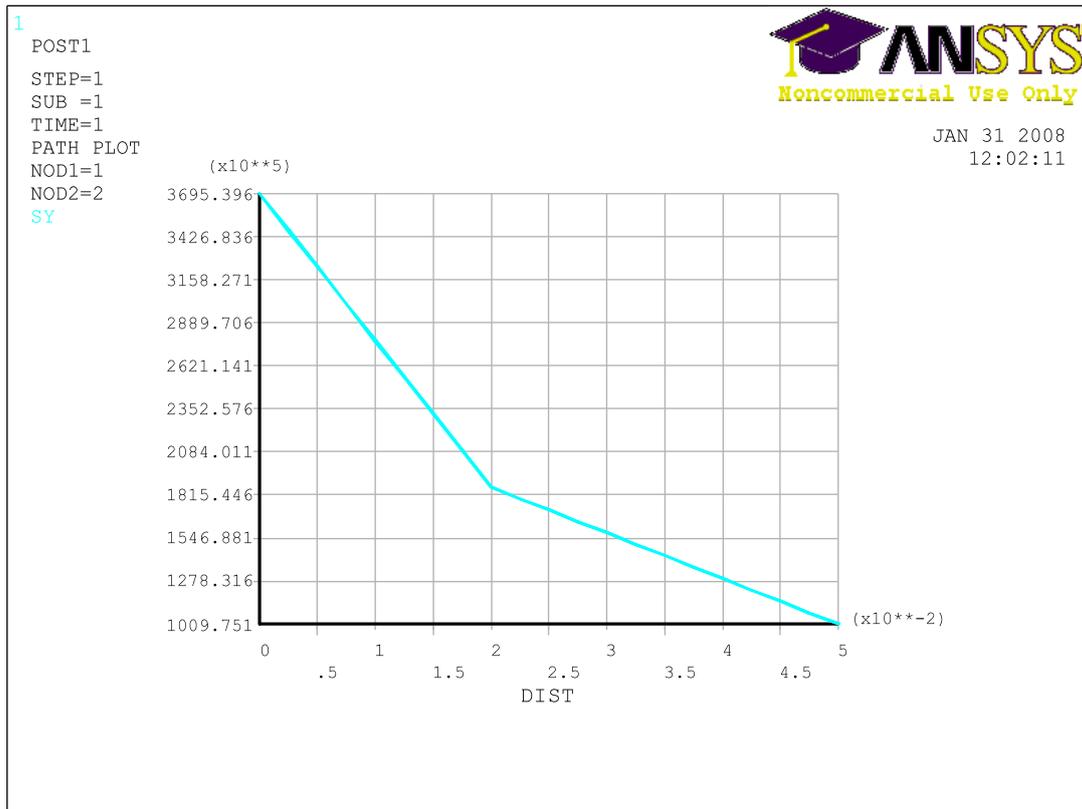


Figura 37. Campo de tensiones SY promediado en el camino definido.

Por último vamos a obtener la estimación del error de discretización cometido en el cálculo. Previamente se debe desactivar la opción PowerGraphics de ANSYS, esto lo podemos hacer con el botón POWRGRPH de la barra de herramientas. Aparece la ventana de la Figura 38, seleccionamos OFF y OK.

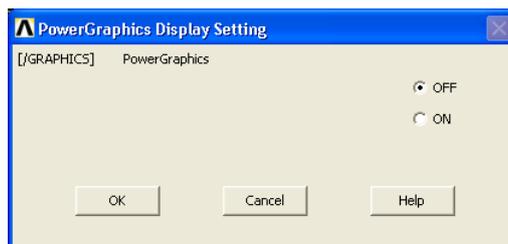


Figura 38. Cuadro de diálogo establecer la opción PowerGraphics.

A continuación volvemos a la opción List Results del menú principal (o del menú de utilidades) y hacemos clic en la opción Percent Error. Se abre una ventana con el valor del error estimado en norma energética en tanto por cien, que no es más que

$$\eta_{es} = 100 \frac{\| e_{es} \|}{\sqrt{\| u_{ef} \|^2 + \| e_{es} \|^2}},$$

es decir, el cociente entre la energía de deformación del error y la estimación de la energía total de deformación (si aparece un mensaje de error diciendo que el error no está disponible debemos leer la solución de nuevo, haciendo clic en la opción Read

Results First Set del menú principal). Dado que se trata de una malla con pocos elementos, el error que aparece es elevado (casi un 20%). De hecho, la tensión SY vale según los cálculos de elementos finitos 370 MPa aproximadamente (se puede obtener este valor por ejemplo de la Figura 29, Figura 30 o Figura 37), mientras que la solución exacta es 434 MPa (enunciado del problema).

2.8 MALLADO ADAPTATIVO

El proceso de mallado adaptativo consiste en realizar un refinamiento de la malla de manera que el tamaño de los elementos se adapta en cada zona, con el fin de obtener un error en la solución inferior a un valor predeterminado. El proceso se llama adaptativo porque el programa va refinando automáticamente en sucesivos análisis la malla de elementos finitos, hasta conseguir el error que se desea. El tamaño de cada elemento se calcula a partir del error estimado y de la ley de convergencia del error.

Para realizar un mallado adaptativo utilizamos la opción Adaptive Mesh dentro de Solve en el menú Solution (en el menú principal). Si la opción no está visible es porque el menú está abreviado, para que aparezca hay que utilizar primero la opción Unabridged Menu del menú Solution. Se abre un cuadro de diálogo como el mostrado en la Figura 39, donde hay que indicar el número de soluciones permitidas (es decir, el número de veces que se permite refinar la malla de forma iterativa) y el error deseado Structural (error en porcentaje del error en norma energética).

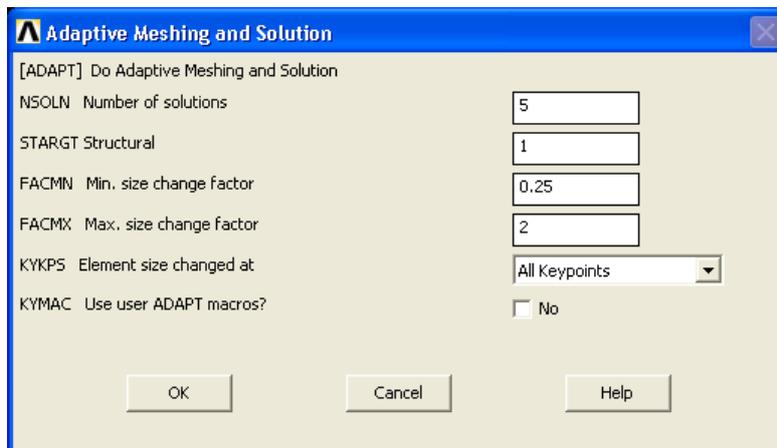


Figura 39. Cuadro de diálogo para refinamiento adaptativo.

En este caso realizaremos un proceso de refinamiento adaptativo para conseguir un error menor o igual a 1% con un máximo de 5 soluciones. Hacemos clic en OK y ANSYS empieza a calcular. Tras cada iteración ANSYS representa gráficamente el campo de tensiones de von Mises promediado.

Una vez obtenida la malla final, puede comprobarse que la tensión SY en el agujero es muy parecida al valor teórico de 434 MPa, como se muestra en la Figura 40. El error obtenido es del orden de 1.3%, es decir, con 5 soluciones no se ha podido alcanzar el error deseado, aunque la precisión ya es bastante elevada.

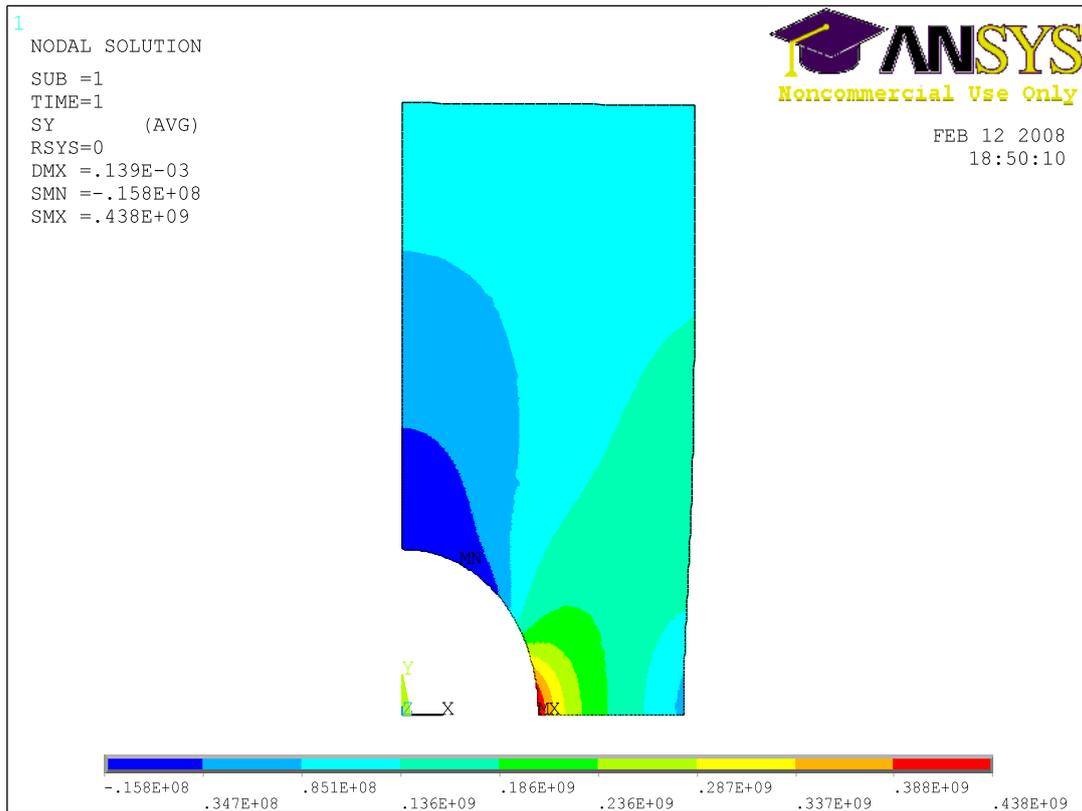


Figura 40. Campo de tensiones SY promediado en la malla final.

2.9 SALIDA DEL PROGRAMA

Para salir de ANSYS se hace clic el botón QUIT de la barra de herramientas. El programa preguntará qué información se desea guardar, ante la duda se puede elegir guardar todo (Save Everything).

