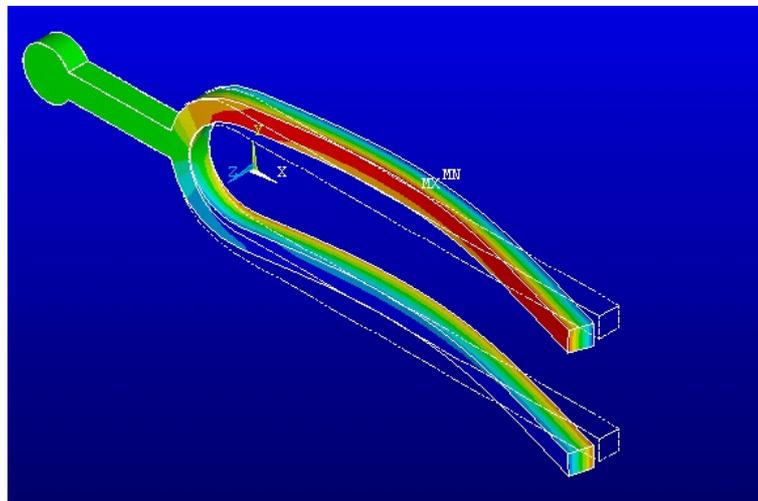




UNIVERSIDADE
DE VIGO

**MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS:
ANÁLISIS, SOFTWARE Y
APLICACIONES EN INGENIERÍA**

GUIÓN DE PRÁCTICAS



Cursos de Extensión Universitaria

VIGO, Julio de 2002

Índice General

1	Introducción a FEMLAB.	1
1.1	Características generales de FEMLAB	1
1.2	Inicio de la aplicación	2
1.3	Fase de Preproceso	5
1.4	Fase de Proceso	9
1.5	Fase de Postproceso	11
2	Práctica 1. FEMLAB. Problema estacionario de transmisión de calor.	15
2.1	Práctica resuelta: Sección transversal de un horno (caso 2D)	15
2.2	Práctica resuelta: Extensión del problema al caso 3D	23
2.3	Otras prácticas	28
3	Práctica 2. FEMLAB. Acústica y electromagnetismo.	31
3.1	Autofrecuencias en una habitación	31
3.2	Propiedades de una línea de transmisión	34
3.3	Otras prácticas	36
4	Introducción a ANSYS.	41
4.1	Características generales de ANSYS	41
4.2	¿Cómo iniciar ANSYS?	42
4.3	Presentación del programa ANSYS en pantalla	43
4.4	Opciones generales de ANSYS	44
4.5	Fase de preproceso	45
4.6	Fase de proceso	54
4.7	Fase de postproceso	57
5	Práctica 3. ANSYS. Problema evolutivo de transmisión de calor.	61
5.1	Práctica resuelta: tratamiento térmico de piezas	61
5.2	Otras prácticas	81
6	Práctica 4. ANSYS. Mecánica de Sólidos.	83
6.1	Consideraciones generales	83
6.2	h-adaptación y p-adaptación en ANSYS	85
6.3	Cálculo de un voladizo con diferentes hipótesis de carga	86
6.4	Modelado de probetas de ensayos de mecánica de fractura	88

7	Práctica 5. ANSYS. Problemas de vibración.	91
7.1	Consideraciones generales	91
7.2	Vibración de un voladizo	92
7.3	Vibración de un diapasón	95

1. Introducción a FEMLAB.

En esta sección se presenta de forma resumida el entorno de trabajo de FEMLAB, describiendo sus principales características y posibilidades, indicando cómo tiene organizadas las diferentes tareas y explicando cómo se utiliza de forma interactiva. Estas notas se refieren concretamente a la versión 2.2 de FEMLAB (Noviembre de 2001). Aunque el acceso a las principales funciones necesarias para este curso sería muy similar en otras versiones recientes, en la versión 2.2 se incorporan interesantes *añadidos* y *mejoras*, que ocasionan variaciones en las denominaciones de los modos y fases del proceso, sus organizaciones internas, o los menús y opciones disponibles.

Para esta versión de FEMLAB se requiere tener instalado MATLAB 6.0 o superior (aunque en Windows 95 / 98 podría ser suficiente MATLAB 5.3.1) y disponer de un mínimo de 128 MB de memoria libre, aunque para trabajar con modelos tridimensionales las recomendaciones son bastante más exigentes.

1.1 Características generales de FEMLAB

FEMLAB es una potente herramienta, que corre sobre MATLAB, para modelar y resolver problemas del ámbito científico y tecnológico basados en ecuaciones en derivadas parciales, mediante el método de elementos finitos. Además, permite trabajar, de forma relativamente sencilla, con modelos *multiphysics* que involucran simultáneamente problemas de diferente naturaleza. El programa no requiere unos conocimientos avanzados de tipo matemático, ni de análisis numérico, puesto que, además de construir modelos útiles definiendo las ecuaciones que los describen, permite hacerlo mediante la simple indicación de las cantidades físicas que intervienen en ellos. Para aumentar la potencia del código, proporciona la posibilidad de trabajar tanto desde un cómodo y flexible entorno gráfico de usuario (GUI), como a través de la línea de comandos de MATLAB (*Command Window*).

Para representar en FEMLAB las ecuaciones en derivadas parciales, puede hacerse configurando sus coeficientes *-coefficients form-*, forma adecuada para los problemas lineales; o mediante sus ecuaciones generales *-general form-*, forma más indicada para los casos no lineales; o mediante la formulación débil *-weak form-*, forma interesante para los casos en que se deben manejar restricciones no lineales o no tangenciales. El programa permite tratar problemas lineales y no lineales, estacionarios o evolutivos... Para resolver estos problemas de ecuaciones en derivadas parciales, FEMLAB utiliza el método de elementos finitos combinado con mallado adaptativo, control del error y con una gran variedad de *solvers* numéricos.

La aplicación de FEMLAB abarca un amplio abanico de fenómenos físicos en diferentes

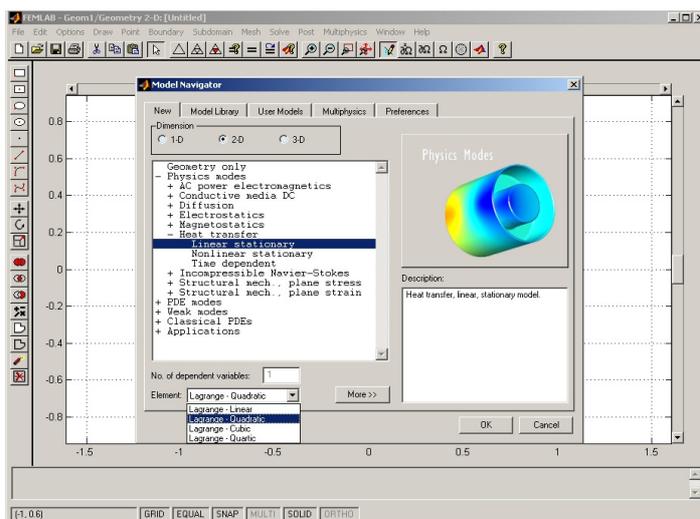
disciplinas, como acústica, reacciones químicas, difusión, electromagnetismo, dinámica de fluidos, física general, geofísica, transferencia de calor, flujo en medios porosos, mecánica cuántica, semiconductores, mecánica estructural y propagación de ondas. Para mostrar su utilidad en algunos de estos campos, FEMLAB proporciona, en el *Model Library*, una serie de ejemplos completos, preparados para ejecutar, que pueden servir tanto para aprender a utilizar la aplicación en diferentes marcos, como para tomarlos como punto de partida en el planteamiento y resolución de nuestros propios problemas.

Por otra parte, hay disponibles en el mercado módulos opcionales orientados a disciplinas específicas, como *Structural Mechanics Engineering* (SME), *Computation Electromagnetics* (CME) o *Chemical Engineering* (CHEM).

Dado que MATLAB es el motor de cálculo que está detrás de FEMLAB, ambos están perfectamente integrados y, frecuentemente, utilizan sintaxis y estructuras de datos comunes. Esto se complementa con la posibilidad de exportar modelos de FEMLAB a programas que corren directamente sobre MATLAB o a otros productos como *Simulink* o el *Control System Toolbox*. En el *Model Library* puede encontrarse algún ejemplo de este tipo de aplicaciones, bajo el nombre *Multidisciplinary*.

1.2 Inicio de la aplicación

La aplicación FEMLAB se puede lanzar bien desde su propio acceso directo o bien ejecutando previamente MATLAB y tecleando *femlab* en la ventana de comandos. Durante el proceso de carga de la aplicación, se van abriendo las ventanas correspondientes a los entornos de trabajo de MATLAB y FEMLAB, y una tercera ventana: el *Model Navigator* de FEMLAB, que permite explorar los modelos ya guardados o crear uno nuevo de cara a establecer la configuración principal de una sesión de FEMLAB. A esta ventana también se accede, en cualquier momento, desde la opción *New* del menú desplegable *File*.

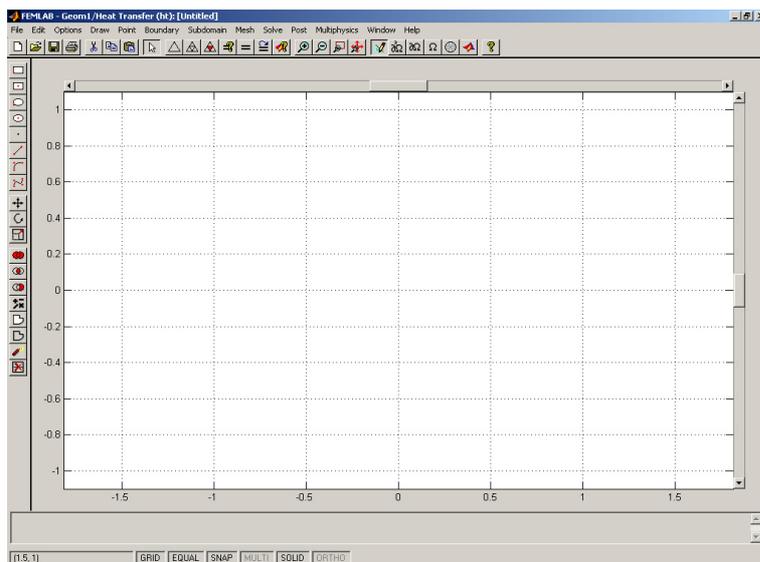


Esta ventana contiene cinco grandes bloques (pestañas): *New*, para construir un modelo

paso a paso; *Model Library*, para elegir un problema completamente configurado, listo para ejecutar, en el marco de las disciplinas citadas anteriormente; *User Models*, para cargar algún modelo previamente construido y guardado por el usuario; *Multiphysics*, para construir modelos acoplados entre problemas de distinta naturaleza; *Preferences*, para configurar algunas opciones generales de la aplicación, como el directorio en el que se almacenan los modelos que el usuario decida guardar.

El objetivo de estas notas radica en indicar cómo se modela y resuelve un problema de forma interactiva, por lo que nos centramos en la primera opción, pestaña *New*. En la ventana correspondiente a esta opción se puede inicializar el entorno de trabajo a uno de los modos previstos en la aplicación. Se debe comenzar fijando la dimensión del problema a resolver (1-D, 2-D o 3-D), puesto que los modelos físicos disponibles son diferentes. A continuación, se debe elegir el tipo de problema a resolver; en el ejemplo de la figura se ha elegido un caso lineal estacionario bidimensional, en el marco de problemas de transferencia de calor, incluido en los modos físicos. Por último, se debe indicar qué tipo de elementos se va a utilizar; en el caso de la figura se podría elegir entre Lagrange lineal, cuadrático, cúbico o cuártico.

Pulsando sobre el botón *OK* se cierra esta ventana y se accede al entorno de trabajo de FEMLAB (GUI: *Graphical User Interface*) donde se han cargado los menús, barras de herramientas, opciones y ecuaciones correspondientes al modo elegido, como se verá en las ventanas de las sucesivas fases del proceso. Para una mayor claridad, en este capítulo de introducción sólo se va a comentar el caso 2-D puesto que el entorno, las opciones disponibles y el funcionamiento de los casos 1-D y 3-D son sensiblemente diferentes, al adaptarse a las dimensiones del problema, pero siguen una filosofía totalmente análoga.



A la parte central de la ventana, en la que se ven los ejes y la cuadrícula, se la denomina

área principal.

En la *barra de menús* de esta ventana se incluyen los típicos de las aplicaciones Windows (*File, Edit, Window y Help*) y los particulares de este programa, que se corresponden con los diferentes pasos que se dan en el planteamiento y resolución de un problema: *Options*, configuración de los ejes, de la cuadrícula y de otras opciones generales del entorno de trabajo; *Draw*, construcción de la geometría del problema; *Point*, introducción de restricciones o cargas sobre puntos del dominio; *Boundary*, imposición de las condiciones de contorno sobre las fronteras del dominio; *Subdomain*, configuración de las ecuaciones en derivadas parciales que rigen el problema; *Mesh*, mallado de la geometría del problema, información sobre la malla y configuración de las opciones del mallador; *Solve*, resolución del problema y control de opciones del *solver*; *Post*, visualización de resultados; *Multiphysics*, control de los diferentes subproblemas de un problema acoplado.

En la *barra de herramientas principal*, situada justo debajo, se proporcionan una serie de atajos a algunas de las opciones de la barra de menús. Aparte de los primeros 8 botones, de funciones típicas que no vamos a comentar, se incluyen 3 grupos de botones. El primer grupo contiene 3 botones con diferentes opciones del mallado, otros 3 con opciones relativas a la resolución y un último botón para acceder a las opciones de visualización de resultados. El siguiente grupo incluye cuatro tipos de *Zoom*. El tercer grupo contiene 6 botones que indican cuál es el modo que está activado en cada caso: *Draw* –modo al que se accede inicialmente–, *Point, Boundary, Subdomain, Mesh y Post*, y que permiten cambiar de modo directamente. La barra termina con un botón de acceso a la ayuda de FEMLAB.

En algunos modos aparecen una o varias barras de botones en el margen izquierdo, incluyendo algunas de las opciones del menú desplegable correspondiente a esa fase del proceso. Esto sucede en el modo *Draw: barra de herramientas de dibujo* –en la figura se ve su versión 2D–, en el modo *Post: barra de herramientas de visualización*, o en los casos tridimensionales, en los que se añaden la *barra de herramientas de selección* y la *barra de herramientas de panorámica* en varios modos.

En la parte inferior de la ventana se reserva una zona, *message log*, para informar de las últimas tareas realizadas. Más abajo, en la *barra de estado*, además de mostrarse las coordenadas del punto en el que se encuentra el cursor se han dispuesto unos recuadros para indicar el estado actual de algunas de las opciones del entorno de trabajo. Si están activadas su nombre aparece en color negro –como SNAP en la figura–, y si están desactivadas, en color gris –como MULTI en la figura–. Para cambiar el estado de estas opciones, basta hacer doble click sobre su nombre.

Todas estas zonas y barras de herramientas pueden personalizarse en la opción *Customize* del menú *Options*.

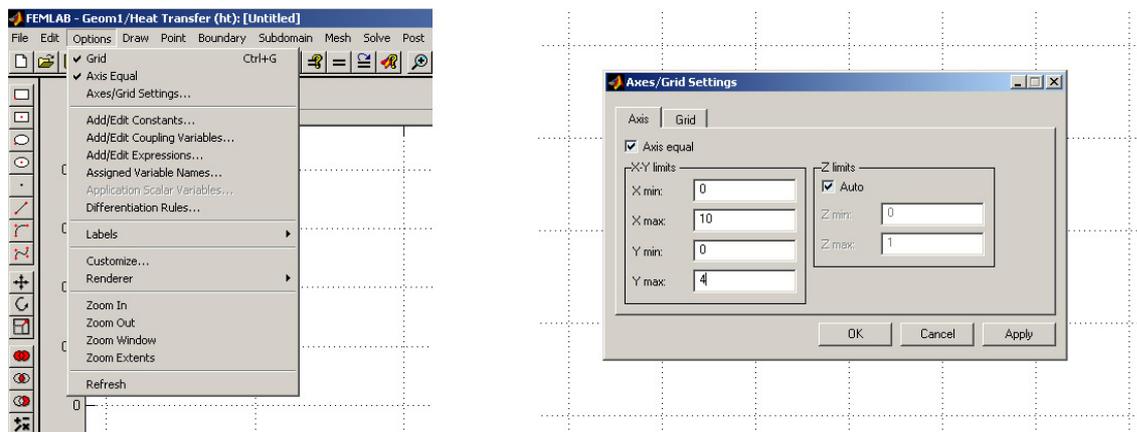
A continuación se describen brevemente los pasos a seguir para definir y resolver un problema con FEMLAB, agrupándolos en las tres fases habituales: *Preproceso* (fase que comprende la

configuración de la geometría, el establecimiento de parámetros y condiciones de contorno del problema y el mallado de la geometría), *Proceso* (fase de resolución propiamente dicha) y *Postproceso* (fase de visualización de los resultados obtenidos).

1.3 Fase de Preproceso

Esta fase abarca las siguientes partes de FEMLAB: *Options* y *Draw*, que permiten configurar la geometría del problema, *Subdomain*, *Boundary* y *Point*, en las que se configuran los parámetros de las ecuaciones del problema junto con las condiciones de contorno y *Mesh*, donde se construye una discretización espacial del dominio. Todas estas partes están incluidas en la barra de menú de la aplicación, de forma que se accede a ellas directamente y se despliega el menú correspondiente. En los botones de la derecha de la *barra de herramientas principal* o mediante la primera opción de cada uno de estos menús se pueden seleccionar los distintos modos (por ejemplo, *Draw Mode*); esto cambia la presentación del entorno de trabajo y, eventualmente, la barra de herramientas vertical del margen izquierdo, para facilitar la realización de las tareas principales de cada fase.

En *Options* se pueden configurar varios aspectos más o menos generales del entorno de trabajo, como pueden ser las variables y constantes definidas, las reglas de diferenciación, el tipo de etiquetas que se van a mostrar o los ya comentados de la opción *Customize*.



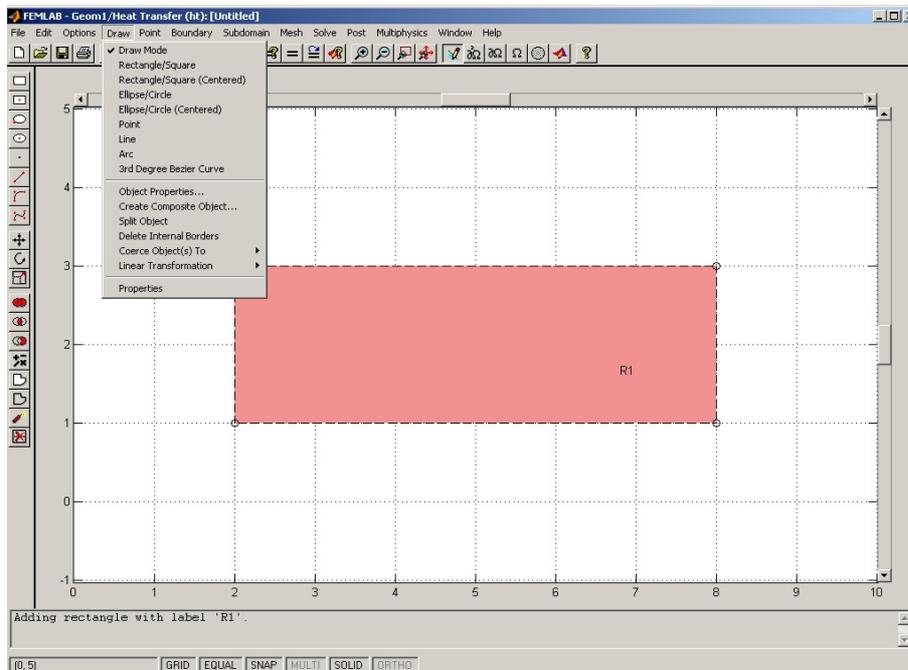
Sin embargo, las opciones que más nos interesan para iniciar el preproceso son las incluidas en *Axes/Grid Settings*, que aparece abierta en la figura de la derecha; aquí se pueden especificar tanto las dimensiones de la zona de trabajo o parte de los ejes que se desea mostrar (pestaña *Axis*), como la separación entre las líneas de la cuadrícula y la posibilidad de incluir líneas especiales o de referencia (pestaña *Grid*). Además, aquí se indica si se mantiene la proporción entre ambos ejes (*Axis Equal*), si se muestra la cuadrícula (*Visible*), si ésta es automática (*Auto*) y si se etiquetan los ejes (*Labels*).

Una vez se ha particularizado la zona de trabajo, se pasa a introducir la geometría del dominio mediante el menú desplegable *Draw* de la *barra de menús*, adaptado a la dimensión

del problema (en la figura se muestra el del caso 2-D).

Al elegir *Draw Mode* aparece a la izquierda la *barra de herramientas de dibujo*, como se aprecia en la siguiente figura, que incluye las principales funciones a las que se puede acceder desde el menú desplegable.

Ambos están divididos en tres grupos: uno de construcción de las figuras elementales, incluyendo rectángulos y elipses de dos tipos, puntos, líneas rectas, arcos y cuvas cúbicas; otro de transformaciones lineales como mover, rotar y reescalar; y otro de operaciones con los objetos creados para determinar la configuración completa de la geometría del problema, como son unión, intersección, diferencia, composiciones de objetos más elaboradas (abre una ventana para definir las utilizando + para la unión, - para la resta y * para la intersección), forzar objetos a formar un sólido o una curva, división de objetos y supresión de fronteras internas.

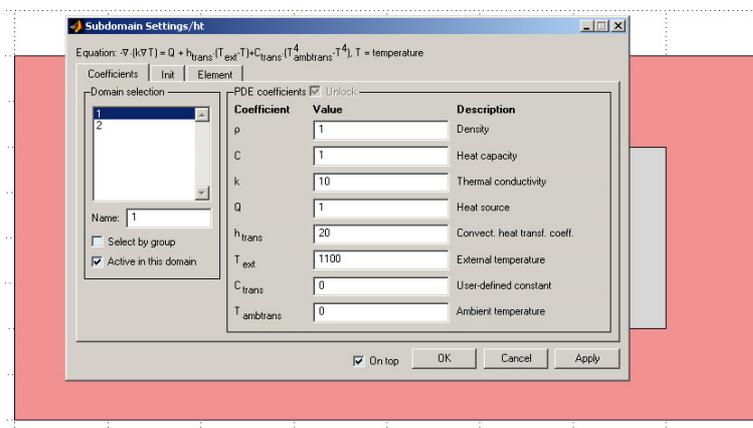


En esta fase suelen ser también útiles las funciones habituales de cortar y pegar, así como la opción *snap to grid* y los botones de Zoom de la *barra de herramientas principal*. La opción *snap to grid* está activada por defecto (SNAP está en negro en la *barra de status*) haciendo que todos los puntos se ajusten a los de la cuadrícula. Para eliminar esta restricción y poder acceder a cualquier punto, basta desactivar la opción en la *barra de status*. Por otra parte, es interesante la utilidad *Zoom Extents*, que ajusta los ejes y las escalas automáticamente (manteniendo o no las proporciones según se haya seleccionado) para optimizar la visualización y manipulación de la geometría del modelo.

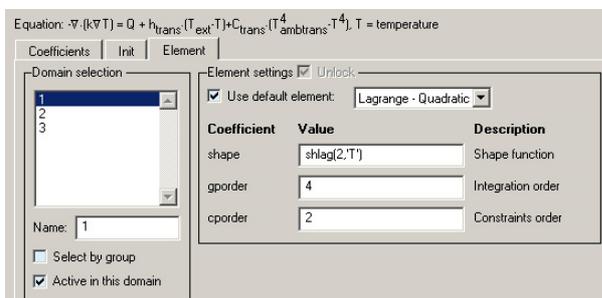
El siguiente paso consiste en fijar las propiedades de los materiales, es decir, los parámetros

de las ecuaciones en derivadas parciales correspondientes a cada subdominio, lo que se corresponde con el **Subdomain Mode**. Para ello, basta hacer doble click sobre un subdominio (o elegir la opción *Subdomain Settings* del menú *Subdomain*), con lo que se abre la ventana en la que se pueden introducir los valores de los parámetros de la ecuación (que se muestra en la parte de arriba de la ventana) para el subdominio seleccionado.

Como se ve en la siguiente figura, la ventana se organiza en tres páginas que se seleccionan mediante las pestañas *Coefficients*, *Init* y *Element*. En todas ellas se reserva la parte izquierda de la ventana para mostrar la lista de los subdominios considerados en la geometría del problema, de forma que se puedan elegir uno o varios para la introducción de los distintos aspectos característicos de cada material.



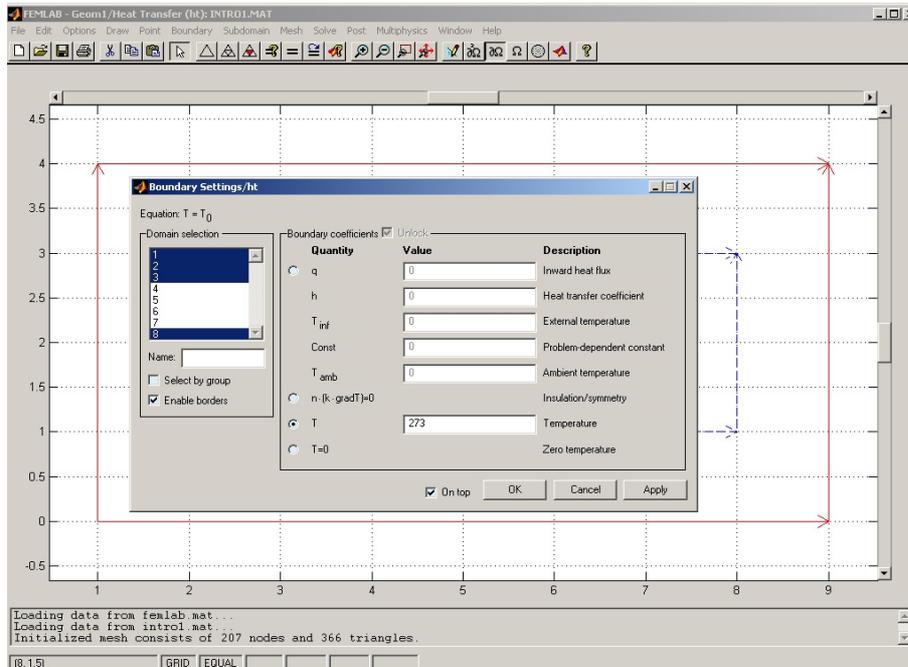
La página *Coefficients*, seleccionada en la figura anterior, permite introducir los coeficientes de las ecuaciones en derivadas parciales para cada material; en *Init* se pueden especificar las condiciones iniciales en cada subdominio para los problemas evolutivos o no lineales; y en la página *Element* se puede elegir, para cada subdominio, el tipo de elemento a utilizar, la función de forma, el orden de integración o el orden de las restricciones. Hay una lista de elementos disponibles para cada tipo de problema, pero también pueden definirse otros “personalizados”.



La última opción del menú desplegable *Subdomain* permite ver los coeficientes de las ecuaciones en derivadas parciales específicos de la aplicación como coeficientes de la ecuación genérica. En este caso, en la ventana *Subdomain Settings* se presenta la forma general de

la ecuación en derivadas parciales y se incluye una cuarta pestaña: *Weak*, que permite especificar términos débiles y restricciones.

Para completar la formulación del modelo, debemos introducir las condiciones de contorno; ésta es la finalidad del *Boundary Mode*.

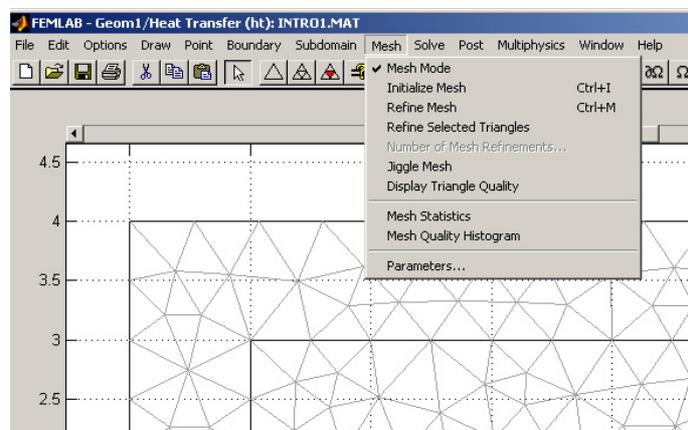


Al igual que en el modo anterior, basta hacer doble click sobre una frontera (o elegir la opción *Boundary Settings* del menú *Boundary*), con lo que se abre la ventana de la figura, en la que se pueden seleccionar una o varias fronteras en la parte de la izquierda (o en el propio dibujo de la geometría) y aplicarles la condición de contorno elegida en la parte de la derecha. En los casos en que se tengan condiciones de contorno iguales en varias fronteras, resulta especialmente útil la opción *Select by group* puesto que, si está activada, al pinchar en una de esas fronteras, las selecciona todas como un grupo; esto es muy cómodo para revisar qué condiciones de contorno se han impuesto y para modificar o corregir por bloques los datos de éstas.

Además de unas opciones comunes al menú *Subdomain* y otras que no vamos a comentar aquí, en este menú se incluyen dos opciones específicas: *Enable Borders* y *Show Direction Arrows*. La primera permite añadir las fronteras interiores (que separan los subdominios) a la lista de fronteras disponibles en la ventana *Specify Boundary Conditions*, para asignarles condiciones de contorno. La segunda activa o desactiva la indicación, mediante flechas, del sentido de recorrido de las fronteras.

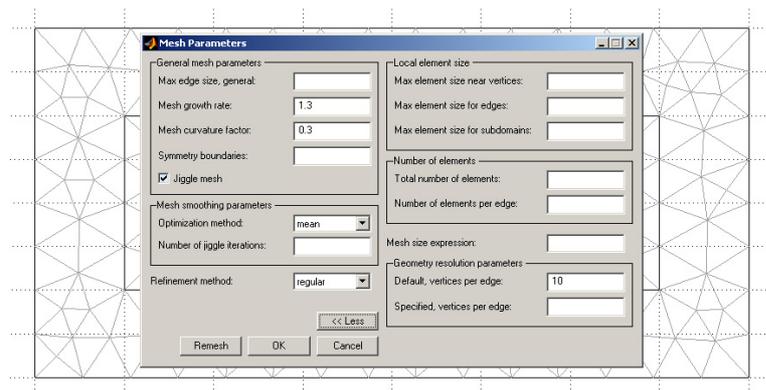
Para poder aplicar el método de elementos finitos ya sólo falta tomar una discretización espacial del dominio, es decir, una malla; éste es el objeto del modo *Mesh*. Las tres primeras

opciones del menú desplegable *Mesh*, que se muestra en la figura, coinciden con las incluidas en la *barra de herramientas principal*, que ya se han citado.



La primera de ellas, *Initialize Mesh*, sirve para generar una primera malla según las preferencias que estén seleccionadas; la segunda, *Refine Mesh*, permite refinar toda la malla; y la tercera, *Refine Selected Triangles*, se utiliza para refinar una zona concreta del mallado, que se habrá seleccionado previamente.

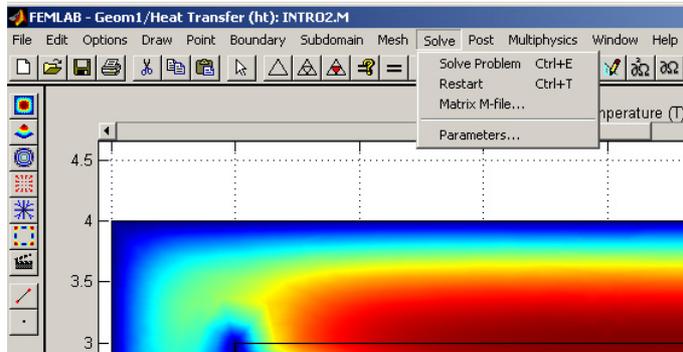
En el menú desplegable *Mesh* se incluyen, además, una serie de funciones para el control y mejora de las mallas: *Jiggle* regulariza la malla, *Display Triangle Quality* muestra mediante gama de colores la calidad de los triángulos de la malla, *Mesh Statistics* abre una ventana resumen del número de elementos y sus características, *Mesh Quality Histogram* representa mediante un histograma la calidad de los triángulos de la malla, y *Parameters* permite modificar los parámetros del proceso de mallado que se muestran en la figura siguiente.



1.4 Fase de Proceso

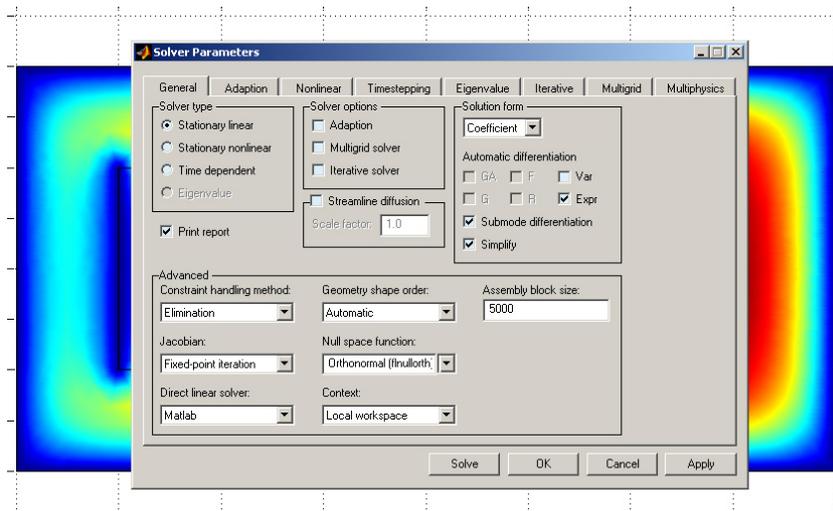
Ésta es la fase de resolución del problema y se corresponde con la opción **Solve** de FEMLAB, cuyo menú desplegable se muestra en la figura. Tres de estas opciones se incluyen también, como ya se indicó, en la *barra de herramientas principal*. FEMLAB resuelve el problema y

pasa automáticamente a la fase de postproceso, salvo que se haya desactivado la opción *Plot solution automatically* de la ventana *Plot Parameters* que se verá más adelante; es decir, nunca está en modo *Solve* y por ello no aparece ningún botón *Solve Mode* en la *barra de herramientas principal* ni la opción correspondiente en el menú *Solve*.



Para proceder a resolver el problema, puede pulsarse el botón con el símbolo $=$, que se corresponde con la opción *Solve Problem*. En el caso de que se trate de un problema evolutivo, puede reiniciarse una resolución interrumpida, pulsando en el siguiente botón hacia la derecha (opción *Restart*).

Por último, la opción *Parameters* permite controlar una gran cantidad de parámetros del *solver* de FEMLAB. Esta ventana, que se muestra en la siguiente figura, está dividida en 8 páginas (pestañas): *General*, *Adaptation*, *Nonlinear*, *Timestepping*, *Eigenvalue*, *Iterative*, *Multigrid* y *Multiphysics*.



El bloque *General*, que se ve en la figura, incluye una serie de parámetros que permiten configurar aspectos generales referentes al tipo de resolución que se va a llevar a cabo y a los métodos que se van a utilizar. Así, permite modificar el tipo de *solver* (estacionario lineal o no lineal, evolutivo o autovalores) fijado al iniciar el modelo, elegir si se quiere

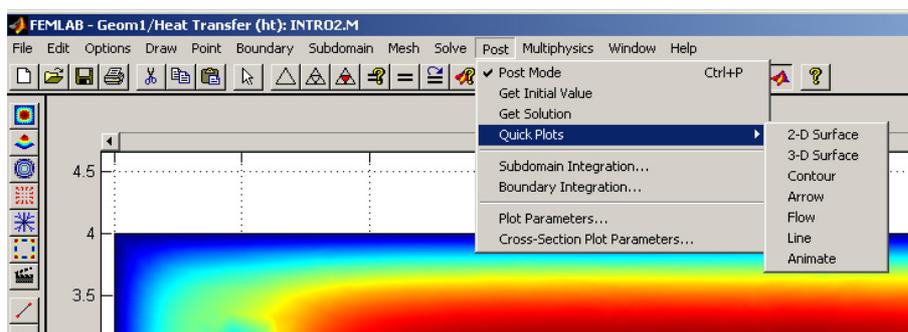
utilizar un *solver* iterativo, indicar si se quiere combinar el método de elementos finitos con mallado adaptativo o con técnicas multimalla, añadir difusión según las líneas de corriente para estabilizar problemas de tipo hiperbólico, activar la información del *solver* en la zona del *Message Log* y modificar la forma de resolución de las ecuaciones en derivadas parciales fijada al iniciar el modelo.

En la parte de abajo de la página *General* se incluye un grupo de propiedades avanzadas del *solver*, que también pueden configurarse aunque normalmente se utilizan las opciones por defecto.

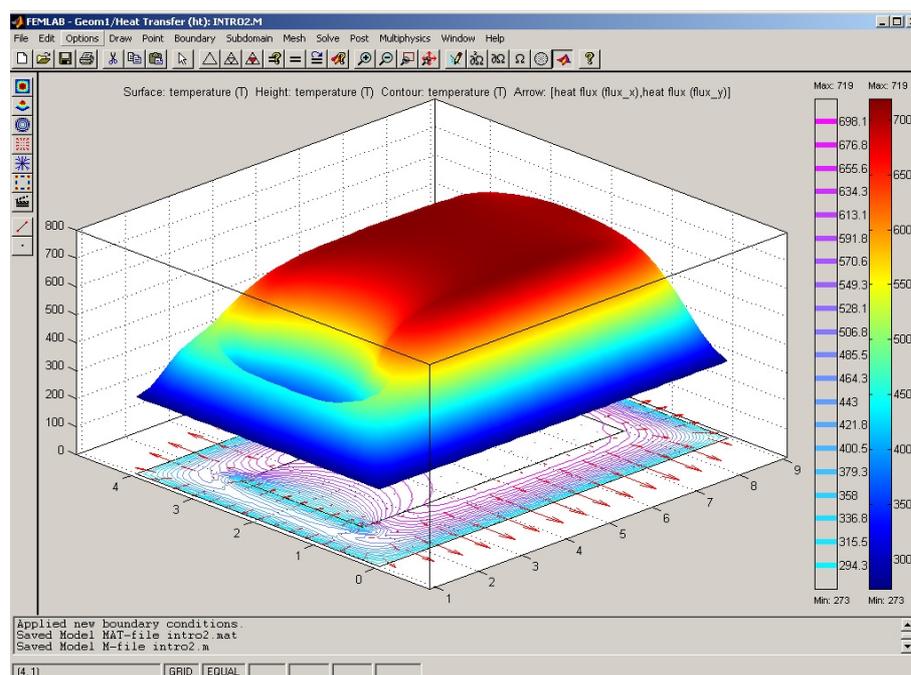
Las otras 7 páginas incluyen las configuraciones de las propiedades específicas de cada *solver*: mallado adaptativo (características del refinado, norma del error y método de selección de elementos), problemas no lineales (configuración de las iteraciones), problemas evolutivos (algoritmo y paso de tiempo), problemas de autovalores (número y rango), métodos iterativos (método, configuración del proceso y preconditionamiento), método multimalla (tipo de método y opciones de suavizado y ciclos) y problemas acoplados (actualizaciones manuales o automáticas de las variables). En caso de que se utilice alguno de ellos, puede ser de utilidad acceder a la página correspondiente y revisar la configuración prevista por defecto.

1.5 Fase de Postproceso

Una vez resuelto el problema, resulta muy útil poder examinar las aproximaciones obtenidas mediante diferentes gráficos; ésta es la finalidad del *Post Mode*, del que vamos a comentar la versión 2-D. Como se ve en la siguiente figura, al seleccionar este modo aparece a la izquierda la *barra de herramientas de visualización* que da acceso a 7 de las opciones de visualización más comunes. También puede accederse a estas opciones desde el submenú *Quick Plots* del menú *Post*.

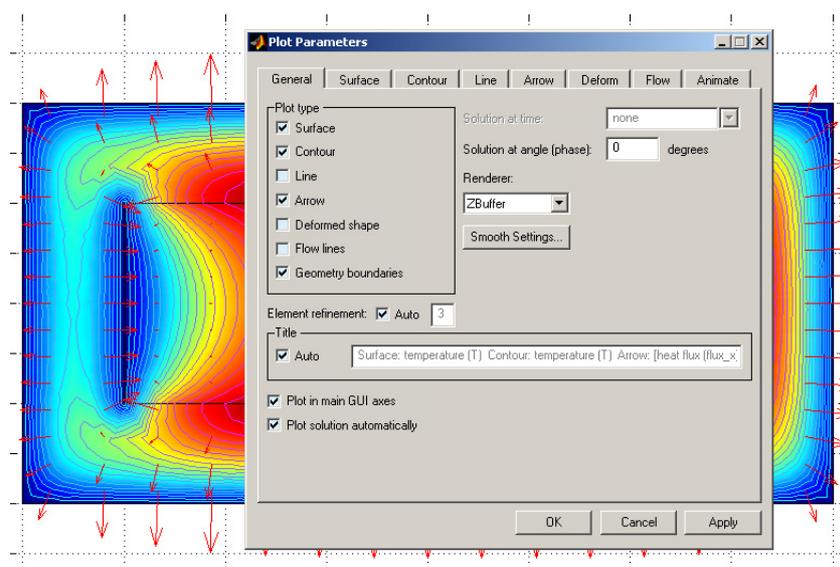


La opción *2D-Surface* muestra una superficie plana en la que se indican, mediante una escala de colores, los diferentes valores que alcanza la variable representada. *3D-Surface* es una variante de la anterior en la que se añade la representación, en altura, de los valores que alcanza cualquiera de las variables, con lo que resulta una gráfica tridimensional como la de la siguiente figura.



La opción *Contour* representa isolíneas de la variable seleccionada, *Arrow* muestra una magnitud vectorial mediante gráficos de flechas, *Flow* representa las líneas de flujo, *Line* representa los valores de una variable sobre las líneas de contorno (de los subdominios) y *Animate* muestra una animación de la solución de un problema evolutivo, en una ventana independiente de tipo figura.

Todos estos formatos de visualización utilizan las configuraciones establecidas en la ventana de diálogo *Plot Parameters*, que se muestra en la siguiente figura.



Entre las opciones previstas en esta ventana de configuración están la superposición de varias de estas gráficas (en el ejemplo de la imagen se han seleccionado tres de ellas además de la frontera), la opción de mostrar la gráfica en una ventana independiente tipo Figura de MATLAB, la selección de las variables que se quieren representar en cada tipo de gráfica. . . , proporcionando un gran control sobre la visualización de los resultados.

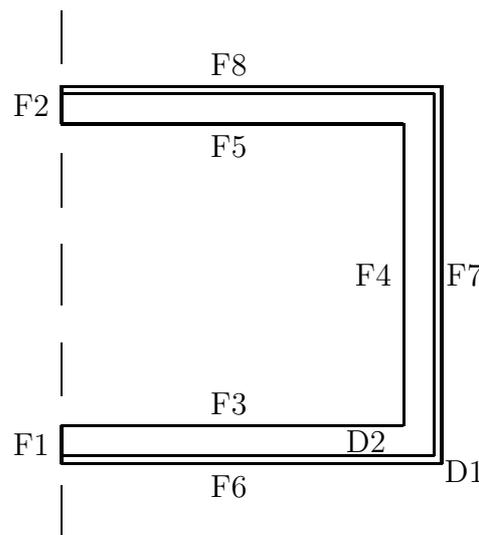
La ventana de diálogo está organizada en 8 páginas, de las que simplemente vamos a mencionar algunos de los parámetros que incluyen. En la pestaña *General* se accede al control principal de la gráfica, permitiendo elegir, de forma no excluyente, entre los distintos tipos de representaciones, pudiéndose indicar si se muestra o no el contorno. Además incluye otras opciones generales como el tipo de *rendering* o si la figura se abre en una ventana independiente. A partir de la segunda página se controlan aspectos referentes a cada tipo de gráfica como, por ejemplo, qué variables se utilizan para la representación en superficie (plano XY) y para la altura (eje Z). Si en esta última se elige *none*, resultará una gráfica 2-D). Además de esta elección, que se permite en casi todas las páginas de la ventana de diálogo, hay otras que son particulares de cada tipo de gráfica.

Así, en *Surface* y en *Line* pueden configurarse varias opciones referentes a las gamas colores utilizadas; en *Contour* puede fijarse el número de curvas de nivel que se quieren representar activar o desactivar su etiquetado; en la pestaña *Arrow* pueden controlarse las separaciones y ubicaciones de las flechas, así como si éstas se toman normalizadas o no, e incluso precisar qué representa cada una de sus componentes; en *Deform* puede elegirse entre escalado automático o manual de la deformación; en *Flow Lines* se tiene control sobre el número y características de las líneas de corriente; y, finalmente, en *Animate* se pueden configurar múltiples aspectos de la construcción de la animación con la solución de un problema evolutivo.

2. Práctica 1. FEMLAB. Problema estacionario de transmisión de calor.

2.1 Práctica resuelta: Sección transversal de un horno (caso 2D)

Este ejemplo se corresponde con un horno de tratamiento térmico que presenta una sección vertical rectangular de 10 m. de ancho por 5 m. de alto y se encuentra recubierto por una pared interna de refractario D2 (con una conductividad térmica de 3 W/mK) de 40 cm. de espesor y un recubrimiento exterior aislante D1 con una conductividad térmica de 0.5 W/mK) de 10 cm. de espesor. El horno tiene también una coraza exterior de chapa, pero su efecto térmico no es relevante habida cuenta de su conductividad térmica.



La temperatura de los gases en el interior del horno es de 1350°C y el coeficiente de convección estimado entre el refractario y los gases es de 20 W/m²K. Por otra parte, los coeficientes de convección desde el recubrimiento aislante exterior hacia el ambiente (a una temperatura de 25°C) se estiman en:

- 10 W/m²K para las paredes verticales
- 6 W/m²K para la pared inferior
- 13 W/m²K para la pared superior

Se busca obtener la distribución de temperaturas en el horno una vez alcanzado el régimen estacionario y representar la variación de las temperaturas en las paredes del mismo.

La ecuación matemática que modela el fenómeno en el horno es:

$$-\vec{\nabla} \cdot (k \vec{\nabla} T) = 0$$

donde los coeficientes de conductividad son:

$$k = 3 \frac{W}{mK} \quad \text{en el dominio D2}$$

$$k = 0.5 \frac{W}{mK} \quad \text{en el dominio D1}$$

Las condiciones de contorno son:

- en la frontera interior

$$(k \vec{\nabla} T) \cdot \vec{n} = h(T_{inf} - T)$$

donde $h = 20$, $T_{inf} = 1623$,

- en la frontera exterior

$$(k \vec{\nabla} T) \cdot \vec{n} = h(T_{inf} - T)$$

donde

$$h = 10, \quad T_{inf} = 298, \quad \text{en la pared vertical}$$

$$h = 6, \quad T_{inf} = 298, \quad \text{en la pared inferior}$$

$$h = 13, \quad T_{inf} = 298, \quad \text{en la pared superior}$$

- en la frontera de simetría

$$(k \vec{\nabla} T) \cdot \vec{n} = 0$$

En el planteamiento ya se ha tenido en cuenta la simetría del problema de cara a su resolución numérica, lo cual se traduce en la introducción de la última condición de contorno sobre la frontera de simetría. Además, se han convertido los datos de temperatura a Kelvin.

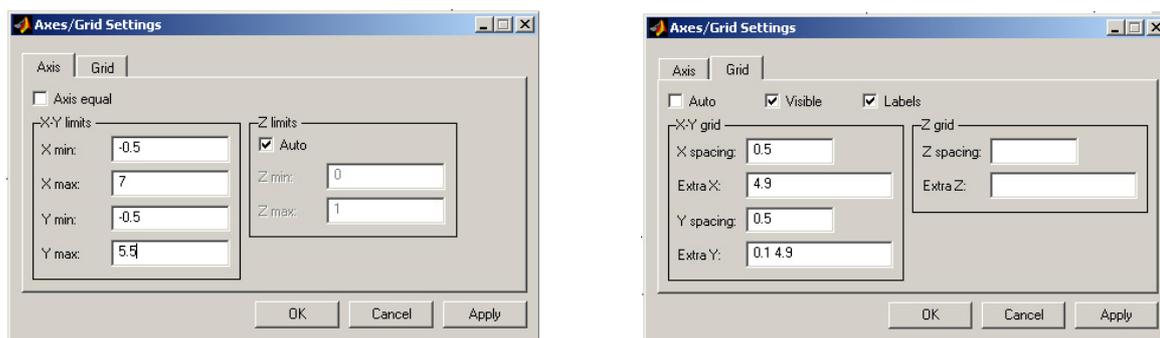
Preproceso

Elección del modelo

- Ir a **New page**: Se abre la ventana correspondiente al **Model Navigator**.
- Seleccionar **Physics modes** y exponer el submenú pulsando dos veces sobre el árbol de control (signo +).
- Expandir el siguiente submenú pulsando dos veces en **Heat transfer**.
- Seleccionar **Linear Stationary** y pulsar **OK** para confirmar esta elección en el menú navegador.

En este punto la ventana gráfica **GUI** se abre en el modo de aplicación *heat transfer* (como se indica en la barra de título de la ventana FEMLAB).

Será necesario ajustar algunos parámetros de la ventana gráfica **GUI**. Por ejemplo, se pueden modificar los límites de los ejes y las líneas de la cuadrícula, para facilitar la introducción de la geometría del problema.

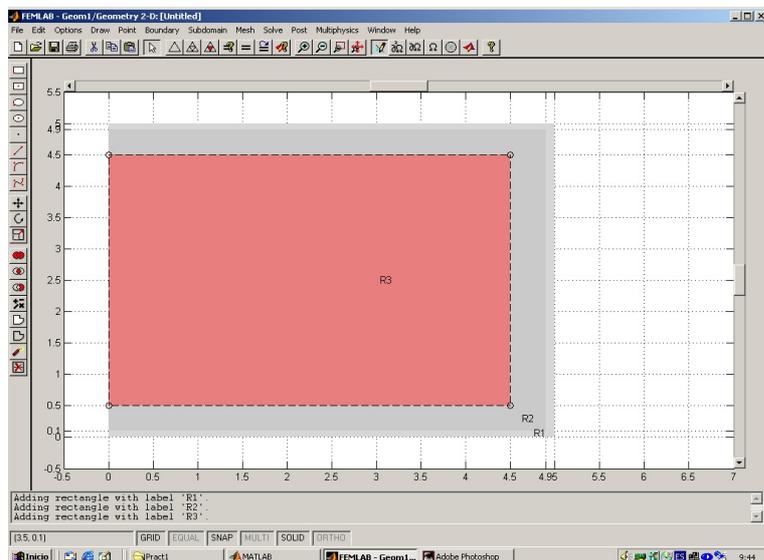


- En la barra de menú de la parte superior de la pantalla, seleccionar el menú **Options** y elegir **Axes/Grid settings**.
- Se abre una página de diálogo y en la página correspondiente a **Axis** se introducen los valores -0.5, 7, -0.5, 5.5 en **X min**, **X max**, **Y min**, **Y max**, respectivamente.
- Pulsar en la pestaña **Grid** y desactivar la caja **Auto**. Se introduce 0.5 como **X spacing** y 0.5 como **Y spacing** (ya lo hace por defecto). A continuación se introducen 4.5 4.9 en **Extra X** y 0.1 0.5 4.5 4.9 en **Extra Y**, que son las líneas fundamentales para la construcción de los diferentes materiales (subdominios) del horno.
- Pulsar **OK** para cerrar la ventana de diálogo y realizar los cambios. En la nueva configuración de la cuadrícula se observa que, además de las líneas con separaciones regulares, aparecen otras marcando los límites de los subdominios del horno.

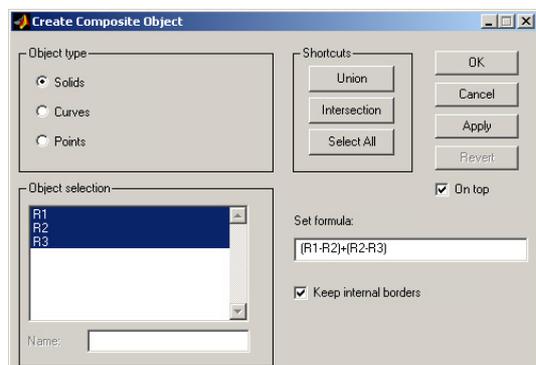
Modo dibujo

Para definir la geometría es necesario trabajar en **Draw mode**.

La ventana gráfica **GUI** entra automáticamente en este modo cuando se abandona el **Model navigator**.

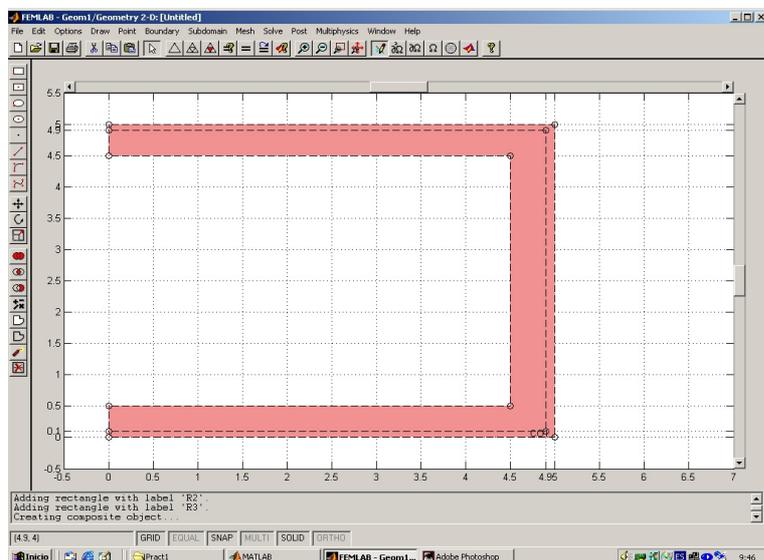


- Dibujar un rectángulo con esquinas en (0,0) y (5,5) usando el botón **Draw rectangle**. Es el primer botón de la barra gráfica, que está localizada en el lado izquierdo de la ventana gráfica **GUI**.
- Utilizando la misma técnica, dibujar un segundo rectángulo con esquinas en (0,0.1) y (4.9,4.9).
- Dibujar un tercer rectángulo con esquinas en (0,0.5) y (4.5,4.5).
- Ir a la barra de dibujo y pulsar el botón **Create composite object**. En el diálogo que aparece teclear la fórmula $(R1-R2)+(R2-R3)$, como se muestra en la figura, poniendo cuidado en activar la caja **Keep internal borders** para poder distinguir entre los dos materiales.



- Pulsar **OK** para realizar la composición y obtener la geometría del horno.

Para optimizar la visualización del horno en las siguientes fases, suele resultar útil la función **Zoom extents** (cuarto botón de zoom en la barra de herramientas principal), que centra el dominio en la ventana al mayor tamaño posible, como se ve en la siguiente figura.

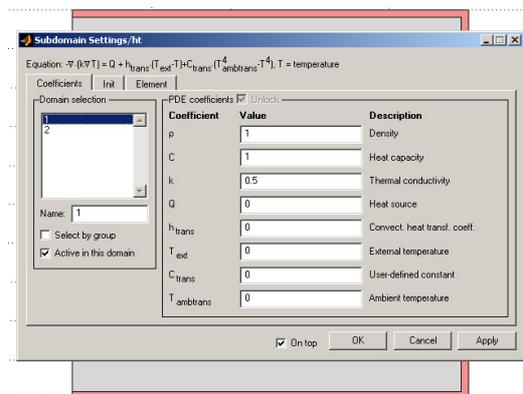


De cara a la utilización de esta geometría en ejercicios posteriores, conviene guardarla. Para ello se puede elegir la opción **Export to File-Geometry Model** del menú **File**.

Modo Subdominio

Para seleccionar las propiedades de los materiales de los dominios se debe ir al menú **Subdomain** y seleccionar **Subdomain specifications**.

- Como el problema es estacionario, los valores de la densidad y el calor específico no tienen efecto sobre la solución. Por tanto, pueden ignorarse dichos campos.



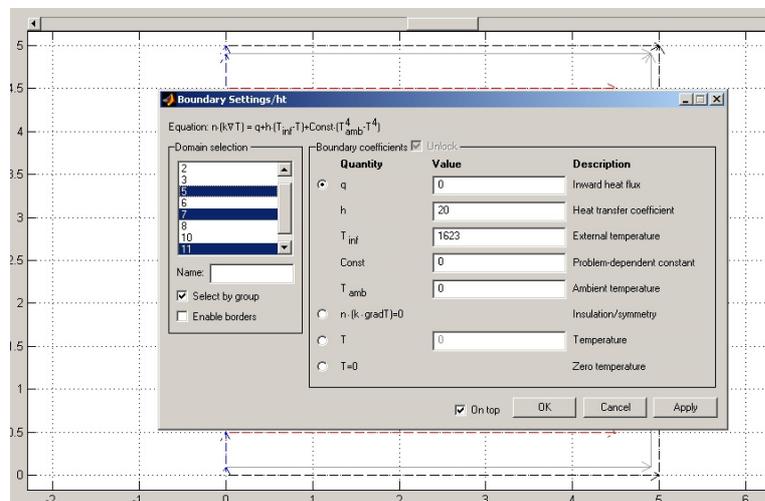
- Seleccionar el subdominio que corresponde al material aislante. Introducir el valor 0.5 en el campo correspondiente a **Thermal conductivity**. Este dominio no tiene fuente de calor, así que se introduce 0 en el correspondiente campo llamado **Q**.

- Seleccionar el subdominio que corresponde al material refractario. Introducir 3 para el campo **Thermal conductivity** y 0 en el campo **Q**.
- En la pestaña **Element** se selecciona el tipo de elemento que se desea usar (por defecto el simplex cuadrático). Esta elección pudo hacerse ya en la ventana correspondiente al **Model Navigator**.
- Pulsar **OK** para cerrar la ventana de diálogo.

Modo frontera

En la barra de menú superior seleccionar **Boundary mode** y elegir **Specify boundary conditions** en menú desplegable **Boundary**.

- Una vez abierta la ventana, seleccionar con el ratón (y pulsando la tecla de mayúsculas) las fronteras internas (F3, F4 y F5, que se van marcando en color rojo), activar la primera casilla de verificación (condición de tipo Robin), introducir el valor $h = 20$ en **Heat transfer coefficient** y $T_{inf} = 1623$ en **External temperature**, como se muestra en la figura. Pulsar **Apply**, para introducir estas condiciones sin cerrar la ventana de diálogo. Observar que las condiciones de contorno de este tipo se representan mediante líneas discontinuas negras. Se puede marcar la casilla **Select by group**, de esta forma, si ese quiere modificar algún dato en las condiciones de contorno, al pinchar en una de las fronteras selecciona todas las que tienen la misma condición frontera.

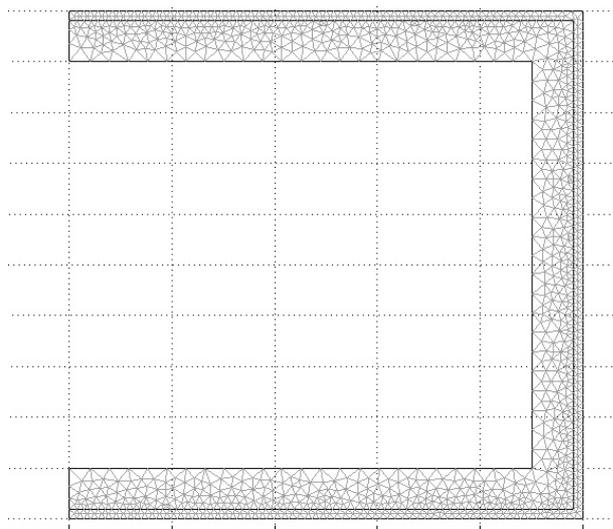


- Seleccionar sucesivamente las fronteras externas (F6, F7, F8) y asignar los valores correspondientes a cada una: $h = 10$ y $T_{inf} = 298$ para la pared vertical, $h = 6$ y $T_{inf} = 298$ para la pared inferior, $h = 13$ y $T_{inf} = 298$ para la pared superior.
- Seleccionar las líneas correspondientes a la frontera de simetría (F1 y F2, que comprenden dos líneas cada una) y activar la casilla de verificación **Insulation/Symmetry** (condición Neumann homogénea). Observar que las condiciones de contorno este tipo se representan mediante líneas discontinuas azules.

- Asegurarse de que el botón **Enable borders** está sin marcar (para no tener en cuenta condiciones de contorno sobre las fronteras entre materiales).

Modo malla

Se genera una discretización espacial utilizando los elementos finitos elegidos para este problema. Para ello basta pulsar sobre el botón de la barra que corresponde a **Initialize mesh**, con lo que se obtiene la malla de la figura siguiente. Posteriormente se puede pulsar sobre el botón de refinado de la malla **Refine mesh** para obtener una malla más fina.



Conviene echar una vistazo a las propiedades de la malla mediante las opciones del menú **Mesh**: **Mesh statistics**, **Display triangle quality** y **Mesh quality histogram**.

Proceso

Modo solución

Para resolver el problema con la geometría, los datos y la malla introducidos en la fase de preproceso, se pulsa sobre el botón de la barra de herramientas principal **Solve problem**. Es conveniente asegurarse previamente, mediante la opción **Parameters** del menú **Solve**, de que están activadas las opciones correspondientes al tipo de problema que se va a resolver (lineal estacionario, sin mallado adaptativo ni multimalla).

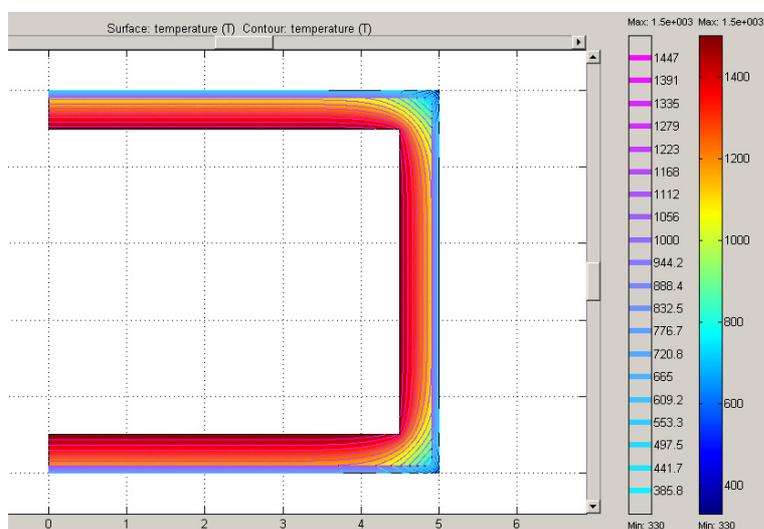
Al pulsar el botón indicado, FEMLAB procede a la resolución del problema (mostrando cierta información en la zona **message log**) y, una vez finalizada, pasa automáticamente a la fase de postproceso mostrando una representación gráfica de la solución obtenida.

Una vez resuelto el problema, es útil guardar la solución obtenida mediante la opción **Save as** del menú **File**.

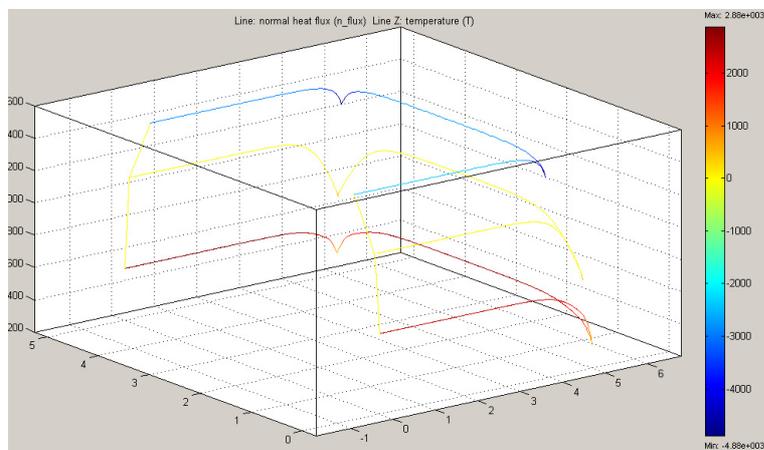
Postproceso

Modo dibujo

Tras la resolución se ha entrado automáticamente en el modo **Post**, mostrándose en pantalla el tipo de visualización que estuviese elegido previamente (por defecto **Surface 2D**, que representa los valores obtenidos para la temperatura en un gráfico de superficie). Para configurar otros tipos de presentaciones hay que acceder a la opción **Plot Parameters** del menú **Post**. Así, si se selecciona **Contour** (isolíneas), además de **Surface**, se obtiene la gráfica de la siguiente figura.



Para representar, como se pide en el enunciado de la práctica, la variación de las temperaturas en las paredes del horno, debemos elegir el tipo de gráfica **Line**, eligiendo la expresión T (temperatura) tanto en superficie como en la variable Z , con lo que se obtiene la siguiente figura.



2.2 Práctica resuelta: Extensión del problema al caso 3D

Este ejemplo se corresponde con la extensión al caso tridimensional del problema anterior donde el horno tiene una profundidad de 5 m. El resto de los datos coinciden salvo el coeficiente de convección desde el recubrimiento aislante exterior hacia el ambiente correspondiente a la pared superior que coincide con el de la pared inferior ($6 \text{ W/m}^2\text{K}$).

Preproceso

Elección del modelo

- Ir a **New page**: Se abre la ventana correspondiente al **Model Navigator**.
- Seleccionar **Physics modes**, *elegir el modo 3D* y exponer el submenú pulsando dos veces sobre el árbol de control (signo +).
- Expandir el siguiente submenú pulsando dos veces en **Heat transfer**.
- Seleccionar **Linear Stationary** y pulsar **OK** para confirmar esta elección en el menú navegador.

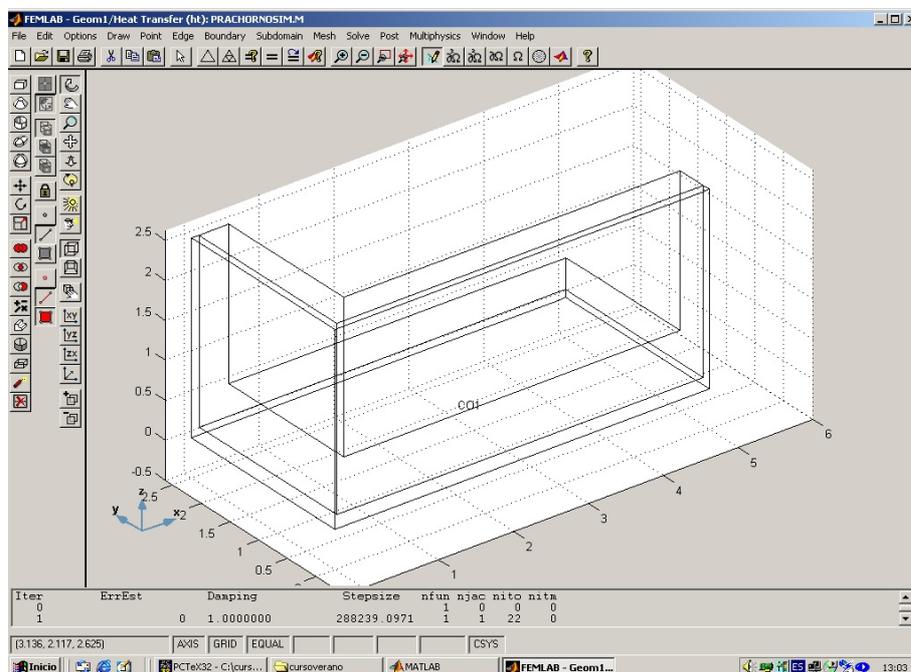
En este punto la ventana gráfica **GUI** se abre en el modo de aplicación *heat transfer*.

Modo dibujo

Para definir la geometría es necesario trabajar en **Draw mode**. Como hay simetría en los datos utilizaremos sólo un octavo del horno.

- Seleccionar el botón **Block**, primero de la *barra de herramientas de dibujo*, situada en el lado izquierdo de la ventana gráfica **GUI**. Se abre una página de diálogo, que habrá que expandir utilizando el botón **More**, y se introducen los valores 0, 0, 0 para el punto base de los ejes y 5, 2.5, 2.5 para las longitudes. Se genera entonces un paralelepípedo **BLK1** de tamaño $5 \times 2.5 \times 2.5$.
- Dibujar un segundo paralelepípedo **BLK2** con los valores 0.1, 0.1, 0.1 para el punto base de los ejes y 4.9, 2.4, 2.4 para las longitudes.
- Dibujar un tercer paralelepípedo **BLK3** con los valores 0.5, 0.5, 0.5 para el punto base de los ejes y 4.5, 2, 2 para las longitudes.
- Pulsar el botón **Create composite object** de la *barra de herramientas de dibujo*. En el diálogo que aparece, teclear la fórmula $(\text{BLK1}-\text{BLK2})+(\text{BLK2}-\text{BLK3})$, como se muestra en la figura, poniendo cuidado en activar la caja **Keep internal borders** para poder distinguir entre los dos materiales.

- Pulsar **OK** para realizar la composición y obtener la geometría del horno.

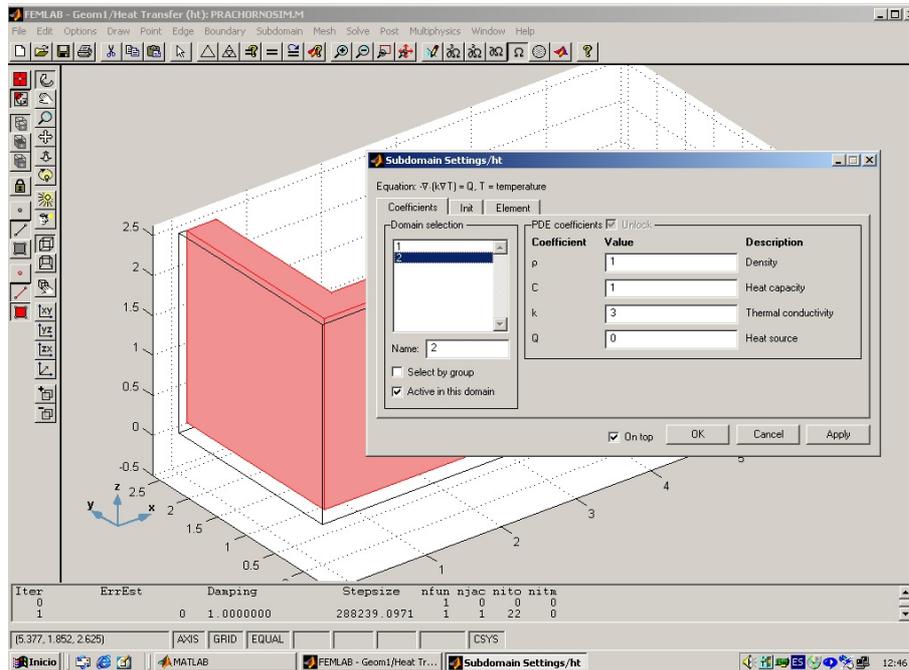


De cara a la utilización de esta geometría en ejercicios posteriores, conviene guardarla. Para ello se puede elegir la opción **Export to File-Geometry Model** del menú **File**.

Modo Subdominio

Para seleccionar las propiedades de los materiales de los dominios se debe ir al menú **Subdomain** y seleccionar **Subdomain specifications**.

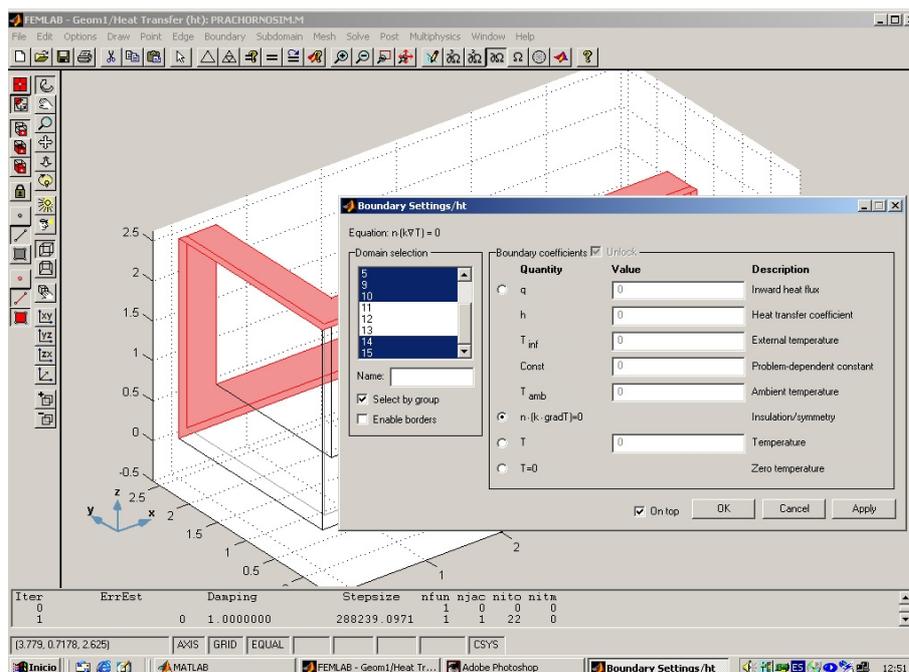
- Como el problema es estacionario, los valores de la densidad y el calor específico no tienen efecto sobre la solución. Por tanto, pueden ignorarse dichos campos.
- Seleccionar el subdominio que corresponde al material aislante. Introducir el valor 0.5 en el campo correspondiente a **Thermal conductivity**. Este dominio no tiene fuente de calor, así que se introduce 0 en el correspondiente campo llamado **Q**.
- Seleccionar el subdominio que corresponde al material refractario. Introducir 3 para el campo **Thermal conductivity** y 0 en el campo **Q**.
- Pulsar **OK** para cerrar la ventana de diálogo.



Modo frontera

En la barra de menú superior seleccionar **Boundary mode** y elegir **Specify boundary conditions** en menú desplegable **Boundary**.

- Una vez abierta la ventana, seleccionar con el ratón las fronteras y asignar las condiciones de contorno.

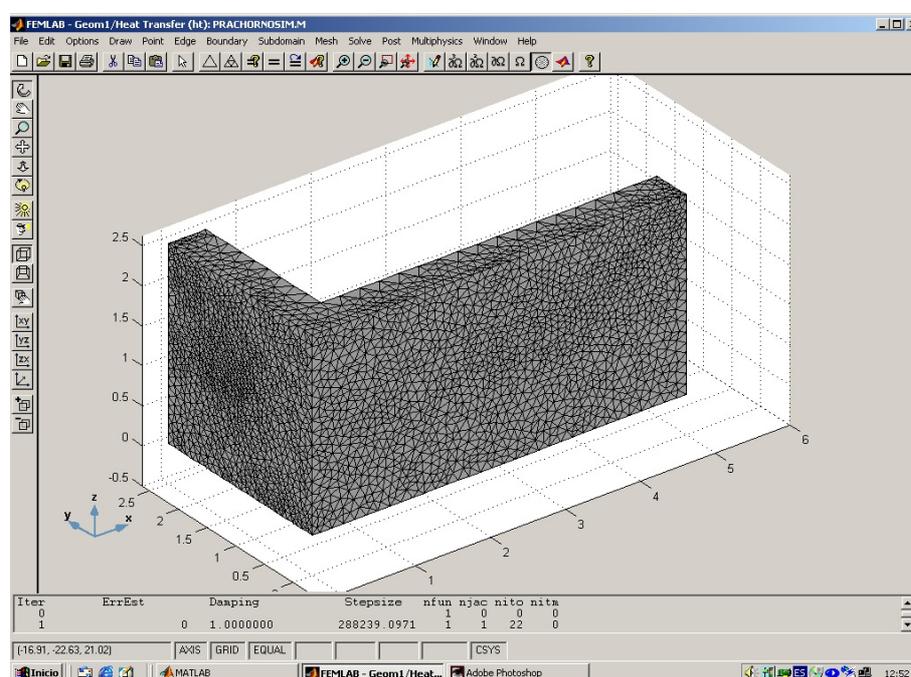


- Asegurarse de que el botón **Enable borders** está sin marcar (para no tener en cuenta condiciones de contorno sobre las fronteras entre materiales). Al igual que en el caso 2D, en esta fase puede ser útil activar la casilla **Select by group** (ver figura).

Modo malla

Elegimos una discretización espacial utilizando los elementos finitos tomados por defecto por FEMLAB para el problema térmico.

Para ello basta pulsar sobre el botón de la barra que corresponde a **Initialize mesh**, con lo que se obtiene la malla de la figura siguiente. Posteriormente se puede pulsar sobre el botón de refinado de la malla **Refine mesh** para obtener una malla más fina.



Conviene echar una vistazo a las propiedades de la malla mediante las opciones del menú.

Proceso

Modo solución

Para resolver el problema con la geometría, los datos y la malla introducidos en la fase de preproceso, se pulsa sobre el botón de la barra de herramientas principal **Solve problem**. Es conveniente asegurarse previamente, mediante la opción **Parameters** del menú **Solve**, de que están activadas las opciones correspondientes al tipo de problema que se va a resolver (lineal estacionario, sin mallado adaptativo ni multimalla).

Al pulsar el botón indicado, FEMLAB procede a la resolución del problema (mostrando

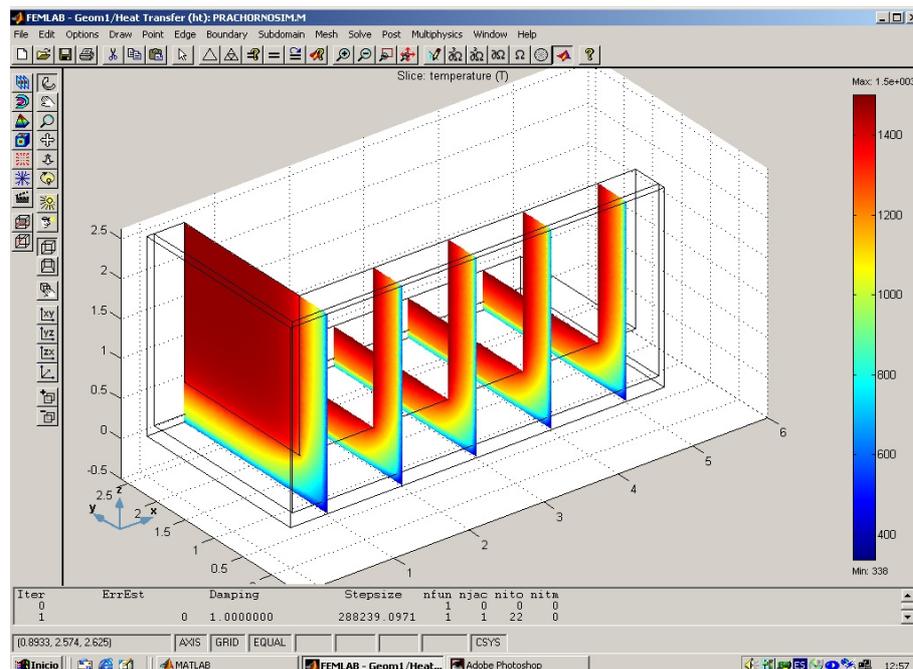
cierta información en la zona **message log**) y, una vez finalizada, pasa automáticamente a la fase de postproceso mostrando una representación gráfica de la solución obtenida.

Una vez resuelto el problema, es útil guardar la solución obtenida mediante la opción **Save as** del menú **File**.

Postproceso

Modo dibujo

Tras la resolución se ha entrado automáticamente en el modo **Post**, mostrándose en pantalla el tipo de visualización que estuviese elegido previamente (por defecto **Slice**, que representa los valores obtenidos para la temperatura en distintos planos de corte). Para configurar otros tipos de presentaciones hay que acceder a la opción **Plot Parameters** del menú **Post** o elegir alguno de los Quick Plots disponibles en la *barra de herramientas de Postproceso* (lado izquierdo de la ventana). Podría visualizarse la solución en el horno completo utilizando la opción **Add/Edit Coupling Variables** del menú **Options**.



2.3 Otras prácticas

Ejercicio 1

Repetir el problema anterior cambiando el valor de la conductividad del aislante por $0.05 \frac{W}{mK}$. Resolver y presentar las mismas gráficas en el postproceso para comparar las soluciones obtenidas en ambos casos. ¿Cómo influye esta reducción de la conductividad del aislante?

Ejercicio 2

Se supone que el horno de las prácticas anteriores se utiliza para tratar térmicamente tres piezas largas colocadas sobre la solera del horno de forma que se mantiene la simetría:

- una pieza de 2m de ancho por 20cm de alto situada en el centro
- dos piezas de 1m de ancho por 50cm de alto situadas a ambos lados de la anterior, manteniendo una separación de 50cm entre pieza y pieza.

La conductividad térmica de estas piezas es de $30 \frac{W}{mK}$ y el coeficiente de convección estimado entre ellas y los gases del interior del horno es de $20 \frac{W}{m^2K}$.

Se pide obtener la distribución de temperaturas en horno y piezas. Teniendo en cuenta que la temperatura de tratamiento térmico de estas piezas es de 1100°C , se pide estimar la mínima temperatura a la que se habrán de calentar los gases del horno para asegurar que toda la pieza alcanza al menos la temperatura de tratamiento.

Guión de resolución:

Una vez se haya planificado el trabajo a realizar, se debe repetir el preproceso partiendo de un problema nuevo (del mismo tipo que en las prácticas anteriores: transferencia de calor estacionario), insertando la geometría del horno guardada en la realización de la primera práctica, añadiendo las piezas de forma adecuada para poder seguir aprovechando la simetría, introduciendo TODOS los datos de las ecuaciones y de las condiciones de contorno, y mallando de nuevo. Se debe guardar la geometría construida. Repetir también el proceso y postproceso, para observar la distribución de temperaturas obtenida, mediante unas gráficas adecuadas.

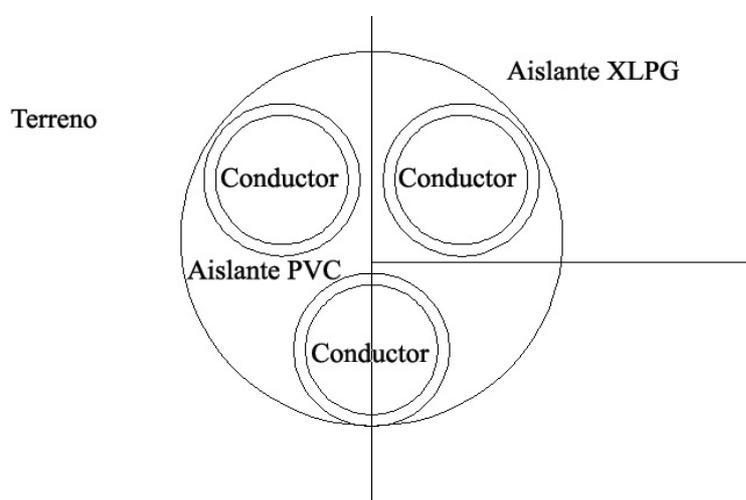
Para contestar a la segunda pregunta, puede ser útil representar $\text{sign}(T - 1373)$ para estar seguros de dónde se supera la temperatura de tratamiento (convertida a Kelvin). Como al resolver para la temperatura de los gases de la primera práctica se obtienen temperaturas elevadas, se sugiere repetir la práctica para varios valores de temperatura de los gases, comenzando por 1180°C y en incrementos de 10°C para estimar la temperatura pedida. Para ello, se debe modificar este dato en la fase de preproceso en todas las condiciones de contorno correspondientes a fronteras internas en contacto con los gases (horno y piezas), resultando útil la opción de seleccionar por grupo.

Ejercicio 3

Repetir la primera parte del Ejercicio 2 utilizando mallado adaptativo. Para ello, tras repetir la fase de preproceso, hay que iniciar la fase de proceso accediendo a la página **Adaption** de la opción **Parameters** del menú **Solve**. Ahí es donde se controlan los diferentes parámetros que configuran el mallado adaptativo. Se trata de analizar cómo afecta cada opción al proceso del mallado, observando especialmente qué regiones son las que más se refinan y por qué.

Ejercicio 4

Se considera el cálculo de la distribución estacionaria de temperaturas en el cable trifásico que se muestra en la figura



Las propiedades del conductor y los aislantes son las siguientes:

- conductividad térmica del conductor: $400 \frac{W}{m K}$
- resistividad eléctrica del conductor: $2 \times 10^{-8} \Omega m$
- conductividad térmica de la matriz (PVC): $0.15 \frac{W}{m K}$
- conductividad térmica del aislante (XLPG): $0.28 \frac{W}{m K}$.

En régimen nominal circula una intensidad (eficaz) de $800 A$ por cada conductor. La sección de éstos es de $500 mm^2$ de modo que se disipa, por efecto Joule, una potencia dada por $\rho \left(\frac{I}{s}\right)^2$ (donde ρ representa la resistividad eléctrica del conductor, I la intensidad (eficaz) que circula por él y s su sección).

El espesor del aislante XLPG es de $2.2 mm$ y el diámetro del cable trifásico $70 mm$.

El cable trifásico está enterrado a una profundidad (medida como la distancia entre el centro

del cable y la superficie) de 60 *cm* en un terreno con una conductividad térmica de $1 \frac{W}{m K}$. El coeficiente de convección desde el terreno al ambiente es de $7.38 \frac{W}{m^2 K}$ (con aire en reposo) y la temperatura ambiente es de 25 grados centígrados. Se supone que el terreno (lejos del cable) está en equilibrio térmico ambiente.

Obtégase la distribución de temperaturas sobre los aislantes en régimen estacionario.

3. Práctica 2. FEMLAB. Acústica y electromagnetismo.

A continuación se describen los contenidos de la segunda clase práctica que llevaremos a cabo con el programa FEMLAB y que está relacionada con aplicaciones en acústica y en electromagnetismo. En concreto se plantea una primera práctica relacionada con el cálculo de las frecuencias y los modos propios en la acústica de una habitación y una segunda en la que se propone calcular los modos transversales de propagación de un campo electromagnético.

3.1 Autofrecuencias en una habitación

Como primer ejemplo vamos a abordar la aproximación de las primeras frecuencias en una habitación vacía. Para ello recordamos aquí que si se considera la propagación estacionaria de un único armónico, la ecuación de ondas se simplifica obteniéndose que para cada frecuencia ω bastaría resolver la ecuación de Helmholtz

$$\Delta p + k^2 p = 0$$

siendo p la presión y $k = \frac{2\pi\omega}{c}$ con c la velocidad del sonido. Si se supone que las paredes son rígidas y que la velocidad normal se anula en todas ellas tendremos como condición de contorno

$$\vec{n} \cdot \vec{\nabla} p = 0$$

lo que nos lleva a resolver un problema de autovalores con condiciones de contorno Neumann. En el caso de una habitación con geometría sencilla se pueden obtener analíticamente los autovalores y autofunciones. En concreto, en una habitación con forma de paralelepípedo de tamaño $L_x \times L_y \times L_z$ cada autofrecuencia se corresponde con una terna $i, l, m \in N$ y viene dada por

$$\omega_{ilm} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{i}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{l}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{m}{L_z}\right)^2}$$

y la correspondiente autofunción, que describe la variación de la presión sonora dentro de la habitación, es

$$p_{ilm}(x, y, z) = \cos\left(\frac{\pi i x}{L_x}\right) \cos\left(\frac{\pi l y}{L_y}\right) \cos\left(\frac{\pi m z}{L_z}\right).$$

Se plantea aproximar los primeros modos, axiales (dos de los parámetros (i, l, m) son nulos) y tangenciales (al menos unos de los parámetros es nulo), de una habitación de $5m$ de largo por $4m$ de ancho y $2.6m$ de alto. Nos centraremos en los que quedan por debajo de una

frecuencia de 100 Hz (lo que se traduce en que $k^2 \in [0, 3.4]$). Los valores analíticos para este caso son los de la siguiente tabla

índices $i \ l \ m$	autofrecuencia k^2	índices $i \ l \ m$	autofrecuencia k^2
0 0 0	0.0000	0 1 0	0.6169
1 0 0	0.3948	1 1 0	1.0116
0 0 1	1.4600	0 1 1	2.0769
2 0 0	1.5791	2 1 0	2.1960
1 0 1	1.8548	1 1 1	2.4716
0 2 0	2.4674		
1 2 0	2.8622		
2 0 1	3.0391		
3 0 0	3.5531		

Con vistas a reducir el tamaño del dominio se considera un plano de simetría en la dirección del eje y pues, si bien en este caso tan sencillo hay también simetría en las otras direcciones, más adelante se va a plantear la influencia de añadir mobiliario, situación en la que se pierde esa propiedad en la dirección de los ejes x, z . En este caso sólo aparecen modos simétricos o antisimétricos lo que nos permite recuperarlos todos resolviendo dos problemas en la mitad del dominio: uno con condición de flujo nulo en el plano de simetría para recuperar los modos simétricos y otro con condición de presión nula para los otros. Debe considerarse, además, que después de resolver queremos exportar la solución a la otra mitad de la habitación, mediante el cambio de variable adecuado.

Se propone el siguiente análisis:

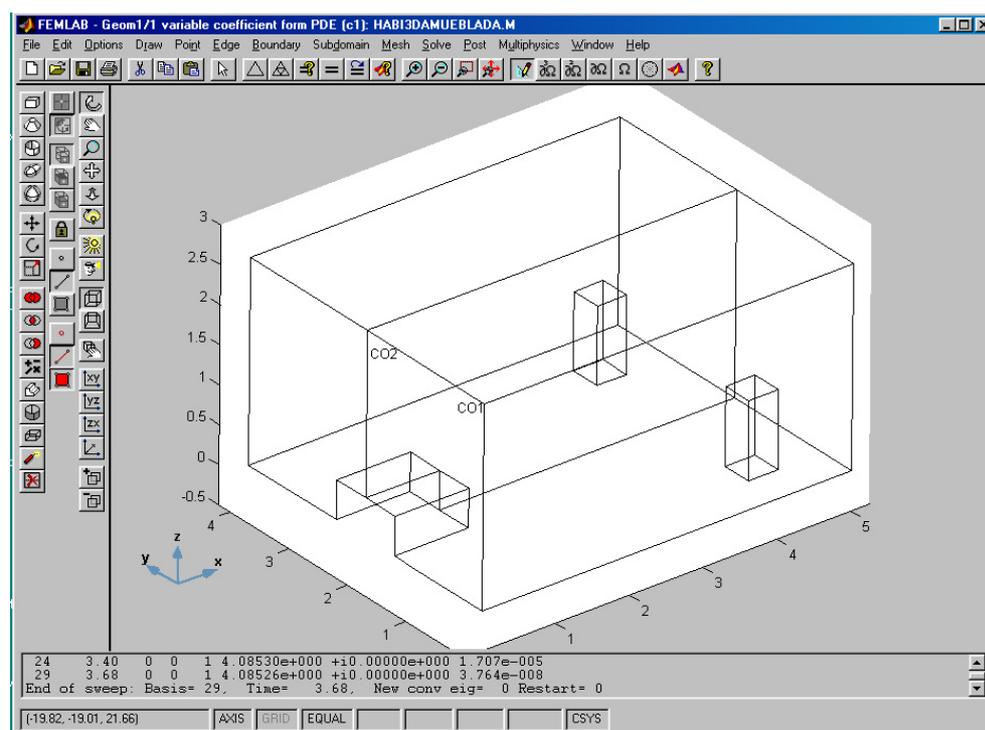
- Utilizar elementos finitos P_1 (**Lagrange-linear**) y observar el orden de precisión con que se aproximan las autofrecuencias.
- Utilizar elementos finitos P_2 (**Lagrange-quadratic**) y comprobar la mejora con respecto al apartado anterior.
- Uno de los parámetros que influyen es el tamaño de la malla. Resolver el problema utilizando elementos P_1 y una malla más fina que la malla inicial de FEMLAB.
- Utilizar el postproceso para visualizar los máximos de presión, los mínimos, y la recuperación de las autofunciones.

La resolución de este problema, usando FEMLAB, consta de los siguientes pasos:

- Arrancar el código y elegir un problema 3D modelado por una PDE dada por sus coeficientes y, dentro de estos, un problema de autovalores.
- Definir la geometría considerando 2 bloques, uno para cada parte de la habitación.

- Establecer los coeficientes de la ecuación a resolver en un subdominio, aprovechando para desactivar el otro.
- Establecer las variables acopladas en la pestaña de opciones.
- Fijar las condiciones de contorno.
- Crear la malla correspondiente.
- Fijar los parámetros de solución indicando un intervalo de autovalores.
- Utilizar las opciones de pintado para visualizar distintas propiedades.

A continuación se propone analizar la influencia que ejerce la presencia de mobiliario. Para simplificar la fase de diseño de la geometría y el tiempo de cálculo se propone añadir un arcón de 1m de ancho, 1 m de largo y 50 cm de alto centrado y pegado a la pared que está situada en el plano $x = 0$ y dos altavoces, de medidas $0.5 \times 0.5 \times 1$ metro, situados en la pared de enfrente, separados de ésta y de los lados 50 cm. El dominio resultante puede verse en la siguiente figura.

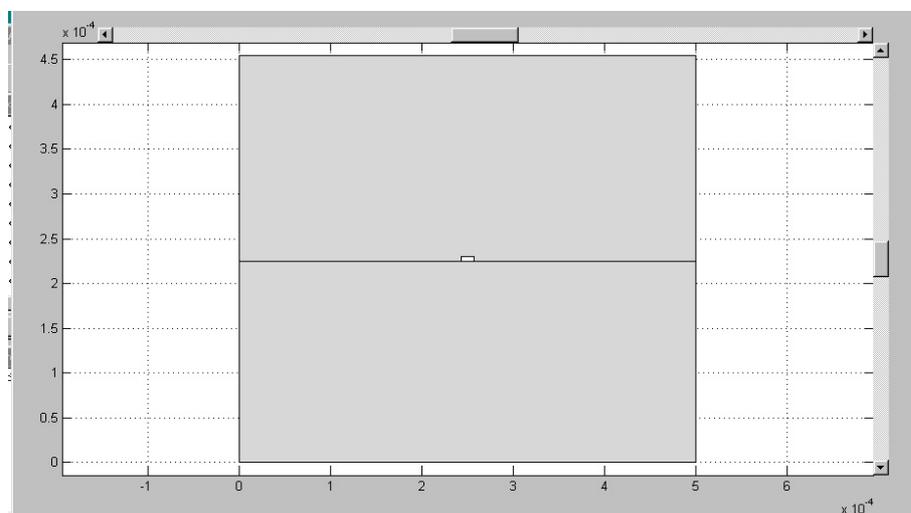


Si se supone también impedancia infinita en el contorno de los muebles y, se tiene en cuenta que esta distribución mantiene la simetría en la dirección del eje y , la solución puede obtenerse modificando el caso anterior. En concreto, basta añadir los obstáculos en el dominio, incorporar la misma condición de contorno en las nuevas fronteras, exportar la solución a las nuevas fronteras y resolver. Se pide calcular y analizar los resultados de la solución usando directamente elementos cuadráticos y malla sin refinar.

3.2 Propiedades de una línea de transmisión

Se considera una línea de transmisión y se propone, en primer lugar, obtener los modos eléctrico y magnético en la dirección transversal (TEM). En concreto, se considera un circuito integrado donde sobre un dieléctrico de arsenuro de Galio (GaAs) está impreso un conductor de oro y se plantea obtener los modos TEM considerando que la dirección de propagación es el eje z y que la sección transversal es la correspondiente a cortar con el plano xy . Se pide obtener el potencial eléctrico y , a partir de él, otras magnitudes.

Tal y como se ha visto en el primer tema de las clases teóricas, este caso se puede resolver como un problema electrostático. Se desean obtener las propiedades de la línea de transmisión de la siguiente figura, cuando se aplica una tensión de $10V$ entre el conductor y la pantalla.



Debemos entonces resolver el problema

$$\text{div}(\epsilon \nabla V) = 0$$

$$V = 10 \quad \text{en la frontera exterior}$$

$$V = 0 \quad \text{en la frontera interior}$$

La permitividad relativa del GaAs es de 2.54 y la del aire la aproximamos por 1. Se considera un conductor de tamaño $15\mu m$ de ancho y $5\mu m$ de espesor. El aislante tiene unas dimensiones de $500\mu m$ de ancho y $225\mu m$ de espesor y se considera una altura de la pantalla de $450\mu m$.

Se propone el siguiente análisis:

- Resolver el problema y obtener el potencial, el campo y la densidad de flujo de desplazamiento eléctrico.

- Obtener la inducción magnética, a partir del apartado anterior, considerando que en el dieléctrico y en el aire se puede considerar permeabilidad relativa $\mu_r = 1$.
- Obtener la corriente superficial y la densidad superficial de carga en el conductor.
- Obtener las propiedades de la línea de transmisión considerando una frecuencia de $10GHz$.

La resolución de este problema, usando FEMLAB, consta de los siguientes pasos:

- Arrancar el código y elegir un problema 2D, tomando como modelo el caso electrostático que aparece en los modelos físicos.
- Definir la geometría considerando 3 rectángulos, uno para cada material y restando del dominio con aire el conductor.
- Establecer los coeficientes de la ecuación a resolver en cada subdominio.
- Fijar las condiciones de contorno.
- Crear la malla correspondiente y resolver.

Este proceso permite obtener directamente el potencial, el campo y el desplazamiento eléctrico.

El resto de variables y propiedades requieren una fase que podemos incluir en el postproceso. Para ello se usan las relaciones entre el campo eléctrico y magnético y las definiciones vistas en la primera clase teórica (ver transparencias) y se implementan usando la opción de integración sobre la frontera que incorpora el código FEMLAB.

Datos:

$$\epsilon_0 = \frac{1}{36\pi} 10^{-9} \frac{As}{Vm} , \quad \mu_0 = 4\pi 10^{-7} \frac{Vs}{Am} .$$

3.3 Otras prácticas

A continuación se incluyen varias prácticas propuestas que, por su temática, serían una continuación natural de la Práctica 1. A pesar de no guardar relación directa con los problemas de acústica y de electromagnetismo tratados en esta práctica, hemos preferido incluirlas aquí para intentar que estas notas sigan la estructura real de las clases prácticas del curso.

Ejercicio 1

Se quiere estudiar el calentamiento del horno de la práctica 1 en un tiempo de 20 horas, partiendo de una temperatura inicial de 25°C (temperatura ambiente). Además de los datos allí proporcionados, se conocen la densidad del refractario $\rho = 1900 \frac{Kg}{m^3}$ y su calor específico $C = 875.7 \frac{J}{KgK}$ y se consideran los mismos valores para el aislante. Se trata de observar la evolución de la temperatura en el horno durante ese período de tiempo.

En el caso evolutivo la ecuación matemática que modela el fenómeno en el horno es:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} - \vec{\nabla} \cdot (k \vec{\nabla} T) = 0$$

con las mismas condiciones de contorno de la primera práctica en las fronteras interiores, exteriores y de simetría, y con condiciones iniciales

$$T(t_0) = 298K$$

en ambos subdominios.

Para realizar esta práctica debe tomarse un nuevo modelo, eligiendo **Time dependent** en el apartado **Heat transfer** del **Model Navigator**.

Una vez se llega al GUI, se puede insertar la geometría del horno guardada en la primera práctica. La fase de preproceso es totalmente análoga, con la diferencia de que se deben introducir los valores de la densidad y el calor específico tanto en el subdominio correspondiente al refractario, como en el correspondiente al aislante.

En la fase de proceso, al tratarse de un caso evolutivo, se deben introducir las condiciones iniciales seleccionando la pestaña **Init** en la ventana **Subdomain Settings** del menú **Subdomain**.

A continuación debe utilizarse la opción **Parameters** del menú **Solve**. En la pestaña **General** debe comprobarse que está marcada la opción correcta (Time Dependent). En la pestaña **Timestepping** deben configurarse adecuadamente los parámetros de tiempo de cara a la resolución. En este caso vamos a elegir **Output Times** (tiempos de salida de resultados) 0:3600:72000 que significa que entre 0 y 20 horas toma resultados intermedios cada hora (3600s). Puede compararse el tiempo de resolución usando matriz de masa llena (Full) o con Mass Lumping (Lumped).

Una vez configurados los parámetros del *solver*, se pulsa el botón **Solve problem**, de la barra de herramientas principal, para proceder a la resolución del problema evolutivo. Automáticamente, FEMLAB pasa a modo **Post** y presenta la solución correspondiente al último instante de tiempo ($t = 72000s$).

En la fase de preproceso se puede observar tanto una animación de la evolución de la temperatura con el tiempo, como la solución correspondiente a cada paso de tiempo de forma independiente. De hecho, se va a tener acceso a aquellos instantes de tiempo seleccionados en la opción **Output Times** en la fase de proceso.

Para generar una animación con las soluciones obtenidas en cada instante de tiempo simplemente hay que acceder a la opción **Plot Parameters** del menú **Post** y pasar a la página **Animate**.

En este caso hemos seleccionado **Matlab Movie** que abrirá una ventana de tipo figura de MATLAB sobre la que se mostrará la animación. Es importante ajustar los parámetros **Number of repeats**, para fijar el número de veces que se repite la secuencia, y **Frames per second**, para establecer la velocidad de la animación (número de imágenes, correspondientes a cada paso de tiempo, por segundo). Cuantos más pasos de tiempo se muestren, más alto se deberá elegir este parámetro para conseguir una animación fluida. Pulsando el botón **Animate**, se inicia la visualización de la animación.

Para ver gráficas correspondientes a un instante de tiempo concreto, hay que elegir dicho instante en la la página **General** de la opción **Plot Parameters** del menú **Postt**. Esto se hace en la casilla **Solution at time**, donde se incluye una lista con todos los instantes para los que se han guardado soluciones intermedias. Si se quieren comparar las soluciones correspondientes a varios instantes de tiempo resulta útil ir pulsando el botón **Apply**, para que muestre la gráfica elegida sin cerrar la ventana de diálogo.

Ejercicio 2

Repetir la práctica anterior tomando como condición inicial $T(t_0) = 400^\circ C$ y comparar ambos casos para analizar cómo influye el hecho de que el horno parta de temperatura ambiente o ya “precalentado”.

Ejercicio 3

El horno de la práctica 1 se emplea para tratar térmicamente una pieza larga de 2 m. de ancho por 20 cm. de alto colocada sobre el centro de la solera del horno, de forma que se mantiene la simetría.

La conductividad térmica de esta pieza depende de la temperatura de acuerdo con la siguiente fórmula:

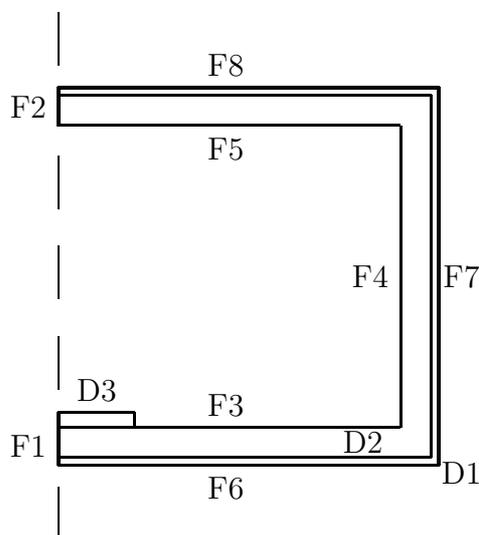
$$k(T) = 29.8 + 1.45 \cdot 10^{-3} (T - 273)$$

siendo T la temperatura en K, y el coeficiente de convección estimado entre ella y los gases del interior del horno es de $20 \frac{W}{m^2K}$.

Se supone también que la conductividad del refractario no es constante, sino que depende de la temperatura de acuerdo con la ley:

$$k(T) = 3 + 1.45 \cdot 10^{-4} (T - 273)$$

Se pide obtener la distribución de la temperatura en el horno y en la pieza. Teniendo en cuenta que la temperatura de tratamiento térmico de esta pieza es de 1100C, se pide estimar la mínima temperatura a la que se habrán de calentar los gases del horno para asegurar que toda la pieza alcanza al menos la temperatura de tratamiento.



En este caso la ecuación matemática que modela el fenómeno en el horno es:

$$-\vec{\nabla} \cdot (k(T) \vec{\nabla} T) = 0$$

donde los coeficientes de conductividad son (en W/mK):

$$k(T) = 3 + 1.45 \cdot 10^{-4} (T - 273) \quad \text{en el dominio D2}$$

$$k(T) = 0.5 \quad \text{en el dominio D1}$$

$$k(T) = 29.8 + 1.45 \cdot 10^{-3} (T - 273) \quad \text{en el dominio D3}$$

Las condiciones de contorno son:

- en la frontera interior

$$(k(T) \vec{\nabla} T) \cdot \vec{n} = h(T_{inf} - T)$$

donde $h = 20$, $T_{inf} = 1623$,

- en la frontera exterior

$$(k(T)\vec{\nabla}T)\cdot\vec{n} = h(T_{inf} - T)$$

donde

$$h = 10, \quad T_{inf} = 298, \quad \text{en la pared vertical}$$

$$h = 6, \quad T_{inf} = 298, \quad \text{en la pared inferior}$$

$$h = 13, \quad T_{inf} = 298, \quad \text{en la pared superior}$$

- en la frontera de simetría

$$(k(T)\vec{\nabla}T)\cdot\vec{n} = 0$$

Para realizar esta práctica debe tomarse un nuevo modelo, eligiendo **Stationary Nonlinear** en el apartado **Heat transfer** del **Model Navigator**.

Una vez se llega al GUI, se puede recuperar la geometría del horno y añadir la pieza. La fase de preproceso es totalmente análoga, con la diferencia de que los valores de la conductividad dependen de la temperatura en D2 y D3.

En la fase de proceso debe utilizarse la opción **Parameters** del menú **Solve**. En la pestaña **General** debe comprobarse que está marcada la opción correcta (Nonlinear stationary) y seleccionar el método de resolución elegido. Además, en la pestaña **Nonlinear** se pueden configurar el número máximo de iteraciones, el número máximo de pasos de Broyden y la tolerancia.

Una vez configurados los parámetros del *solver*, se pulsa el botón **Solve problem**, de la barra de herramientas principal, para proceder a la resolución del problema no lineal. Automáticamente, FEMLAB pasa a modo **Post** y presenta la solución.

4. Introducción a ANSYS.

En este tema se describen de modo somero las principales características del código ANSYS. Esta descripción incluye una revisión de la organización del código así como una breve introducción a su uso mediante la ejecución en modo interactivo.

4.1 Características generales de ANSYS

El código ANSYS es un programa informático de resolución, mediante el método de elementos finitos, de problemas en diversos campos de la ingeniería. Existen tanto versiones específicas que resuelven problemas en un solo campo (por ejemplo en mecánica de sólidos) como versiones que permiten resolver problemas de diferentes tipos (transmisión de calor, mecánica de sólidos, dinámica de fluidos o electromagnetismo), ya se trate de problemas acoplados o desacoplados. Se trata así de un código de carácter general, que es además bastante popular en la industria.

Aunque este código incorpora tanto módulos de preproceso como de postproceso, ninguno de éstos está especialmente refinado, a diferencia de lo que ocurre con el módulo de proceso. Así, es habitual emplear ANSYS junto con otros códigos para las etapas de preproceso y postproceso.

Por el contrario, el módulo de proceso de ANSYS es de una gran potencia (contiene más de un centenar de tipos de elementos finitos distintos) y va incorporando además otros códigos específicos (como los programas DYNA para cálculos dinámicos en sólidos con grandes desplazamientos o FLOTRAN para la resolución de problemas en dinámica de fluidos).

Existen las siguientes versiones de ANSYS:

- ANSYS/Mechanical (módulo de mecánica de sólidos)
- ANSYS/Structural (módulo de cálculo de estructuras)
- ANSYS/Emag (módulo de electromagnetismo)
- ANSYS/FLOTRAN (módulo de dinámica de fluidos)
- ANSYS/LS-DYNA (módulo de dinámica de sólidos con grandes desplazamientos)

junto con una versión denominada ANSYS/Multiphysics que incorpora todos los módulos anteriores.

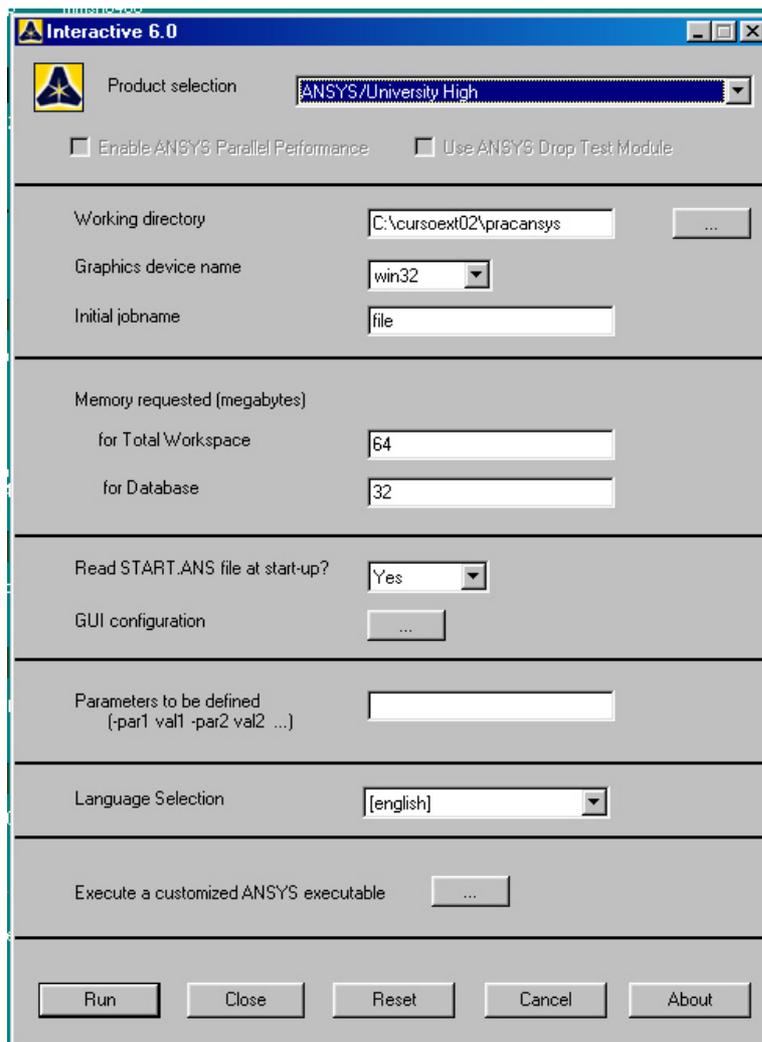
Las presentes prácticas se desarrollarán con la versión 6.0 (diciembre de 2001) del módulo ANSYS/University High (versión para universidades de ANSYS/Multiphysics).

4.2 ¿Cómo iniciar ANSYS?

Para iniciar el programa y configurar además algunas opciones de éste se elegirá (salvo que se haya creado un acceso directo a este programa) desde el menú de inicio del sistema operativo:

Programas > ANSYS 6.0 > Interactive

que hará aparecer el siguiente menú



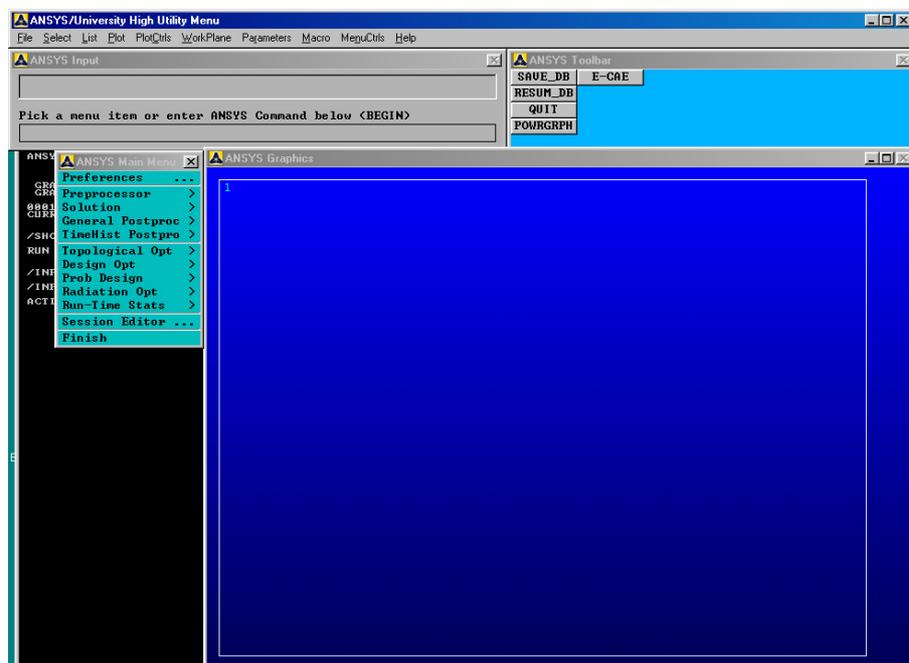
donde se puede elegir (entre otras opciones)

- directorio donde se almacenarán los archivos generados
- nombre que se asignará al trabajo que se va a realizar (que aparecerá en los resultados y que por defecto es **file**)

Tras configurar estas u otras opciones, se deberá iniciar el programa (mediante el botón **Run** en la esquina inferior izquierda).

4.3 Presentación del programa ANSYS en pantalla

Tras iniciar ANSYS tal y como se acaba de describir, el programa mostrará diversas ventanas en la pantalla. Así, una vez concluido el arranque (que puede llevar unos segundos) la pantalla aparecerá tal y como se muestra en la imagen siguiente.



A continuación se describe (con el mismo nombre con el que se muestra en la pantalla) cada una de las seis ventanas que aparecen en pantalla:

- **ANSYS/University High Utility Menu**

Aparece en la parte superior de la pantalla y contiene funciones, de carácter general, disponibles a lo largo de toda la sesión de ANSYS (tales como el control de archivos, la selección de opciones de gráficos o la obtención de listados de variables). Este menú se emplea también para finalizar la sesión de ANSYS.

- **ANSYS Input**

Se encuentra debajo del anterior y sirve para introducir comandos de ANSYS o algunas opciones para comandos ejecutados desde otras ventanas así como para mostrar algunos mensajes relacionados con los comandos ejecutados. Muestra además todos los comandos ejecutados previamente.

- **ANSYS Main Menu**

Este menú, que aparece en el margen izquierdo de la pantalla, contiene las principales funciones de ANSYS organizadas por módulos (preproceso, proceso y postproceso).

- **ANSYS Toolbar**

Situada en el extremo superior, esta ventana contiene botones (que pueden ser personalizados por el usuario) que ejecutan directamente algunos comandos usuales de ANSYS.

- **ANSYS Graphics**

Esta ventana, que ocupa la parte central de la pantalla, muestra los gráficos creados por ANSYS o importados por el programa.

- **ANSYS 6.0 Output Window**

Es la ventana que aparece al fondo de la pantalla y donde aparece información sobre cada una de las operaciones que el programa realiza.

En las presentes notas se hará referencia, básicamente, al empleo del menú principal (ANSYS Main Menu) y, en menor medida, al menú de utilidades (ANSYS Utility Menu). Sin embargo, la totalidad de las tareas descritas pueden ser llevadas a cabo mediante comandos ejecutados en la ventana de entrada (ANSYS Input) y algunas de ellas, que se repetirán con frecuencia, convendría llevarlas a la barra de herramientas (ANSYS Toolbar) para que puedan ser ejecutadas de modo más sencillo.

4.4 Opciones generales de ANSYS

Al iniciar un trabajo de ANSYS, conviene fijar ciertas opciones de carácter general que se refieren a:

- tipo de problema que se va a resolver
- técnica de convergencia que se empleará

Con respecto a la primera opción, el programa permite elegir entre

- problemas en mecánica de sólidos
- problemas en transmisión de calor
- problemas en dinámica de fluidos
- problemas en electromagnetismo

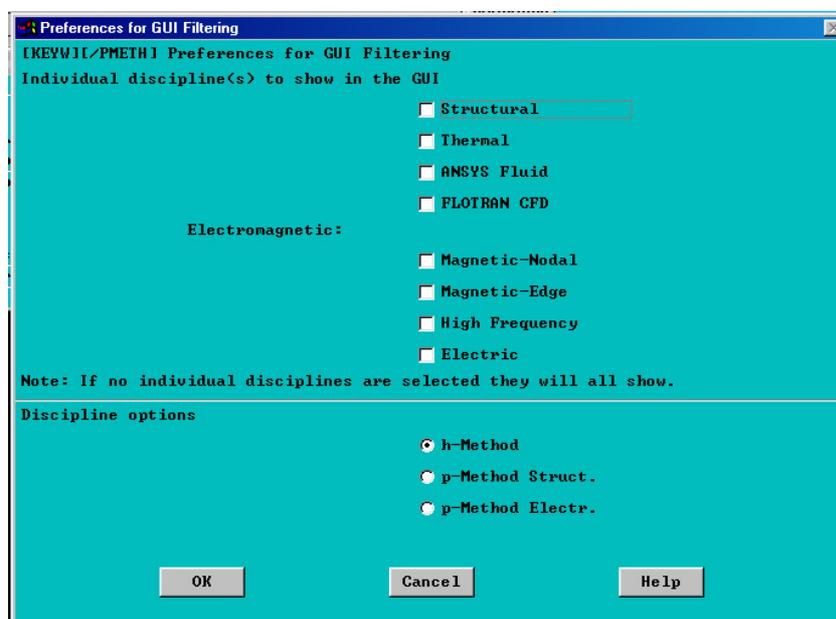
Esta elección servirá para ofrecer, posteriormente, el resto de los menús ya adaptados al tipo de problema que se va a resolver (de modo que sólo queden, dentro de las opciones ofrecidas, aquellas compatibles con el problema que se resuelve).

Por otro lado, la segunda opción permite elegir entre

- h-convergencia
- p-convergencia

La primera opción es válida para cualquier tipo de elementos. Sin embargo, la segunda está restringida tanto a un cierto tipo de problemas (problemas en mecánica de sólidos y problemas en electromagnetismo en el caso de la versión 6.0) como a algunos elementos (ANSYS define unos elementos especiales que recogen los distintos términos de las familias de elementos conforme se aumenta el grado de los polinomios).

Para activar estas opciones, se seleccionará **Preferences ...** dentro del menú principal, lo que hará que se despliegue una ventana como la que se muestra a continuación.



4.5 Fase de preproceso

Durante la fase de preproceso habrán de llevarse a cabo las siguientes tareas:

- definición del tipo (o tipos) de elementos
- definición de constantes asociadas (en algunos tipos de elementos)
- definición de propiedades del material (o materiales)
- definición de geometría del dominio
- definición de propiedades de los subdominios
- generación de un mallado
- imposición de condiciones de contorno y términos fuente

Aunque no es estrictamente necesario seguir el orden anterior, sí resulta conveniente hacerlo.

Definición del tipo (o tipos) de elementos

La definición del tipo de elementos que se van a emplear incluye además, en ANSYS, alguna opción relativa al análisis que se va a llevar a cabo. Así, por ejemplo, los elementos *sólidos* bidimensionales permiten resolver problemas en tensiones planas, en deformaciones planas o axisimétricos; al elegir el elemento es preciso seleccionar además qué tipo de análisis se quiere hacer.

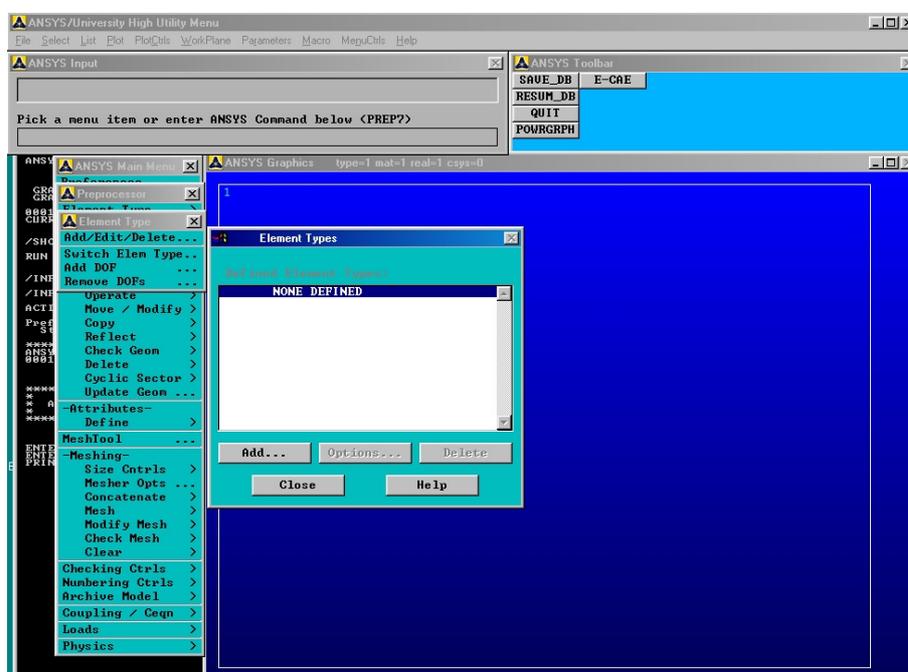
La definición completa del tipo de elemento requiere entonces elegir

- categoría del elemento (por ejemplo, dentro del módulo de mecánica de sólidos se puede optar por emplear elementos estructurales como elementos-lámina o elementos *sólidos*)
- elemento particular (dentro de la categoría especificada permite ahora elegir un tipo determinado de elemento, incluyendo la elección de la dimensión espacial pues ANSYS permite combinar elementos con distintas dimensiones)
- opciones del elemento (por ejemplo, en el caso ya descrito de los elementos *sólidos*, elección del tipo de análisis: deformaciones planas, tensiones planas o axisimétrico)

La definición del tipo de elementos se hace a través de las opciones

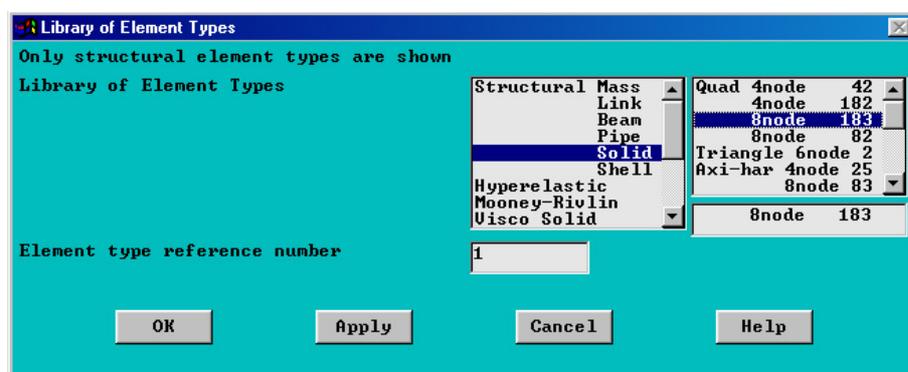
Main Menu: Preprocessor > Element Type > Add/Edit/Delete

que conduce a una ventana

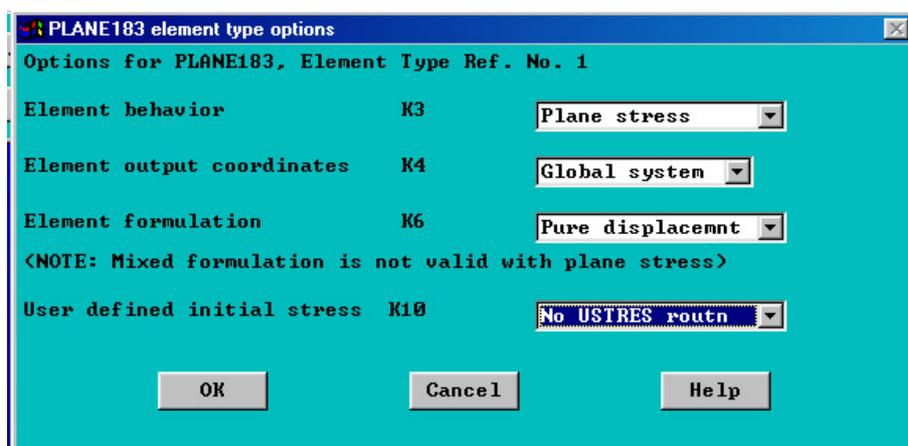


donde se empleará la opción **Add** para incluir un nuevo elemento y **Options** para fijar las opciones asociadas a cada elemento.

Así, por ejemplo para elegir un elemento bidimensional de serendipity Q^2 (esto es, cuadrángulo de ocho nodos) deberá hacerse, tras seleccionar **Add** en el menú anterior,



en tanto que para fijar el tipo de análisis correspondiente a este elemento se deberá seleccionar dicho elemento de la lista de elementos ya definidos y pulsar **Options** accediendo a una ventana como la que sigue,



y ajustando la opción deseada en **Element behavior**.

Definición de constantes asociadas a algunos tipos de elementos

En aquellos elementos en los que sea preciso (o conveniente) asociar algunas constantes a los elementos, esto se puede hacer a través las opciones

Main Menu: Preprocessor > Real Constants > Add/Edit/Delete .

Así por ejemplo, el elemento cuadrangular de ocho nodos permite, cuando se emplea para resolver problemas en tensiones planas, incluir como constante asociada el espesor (lo que evitará tener que convertir algunas variables del problema).

Definición de propiedades de los materiales

La definición de las propiedades de cada material se puede hacer mediante

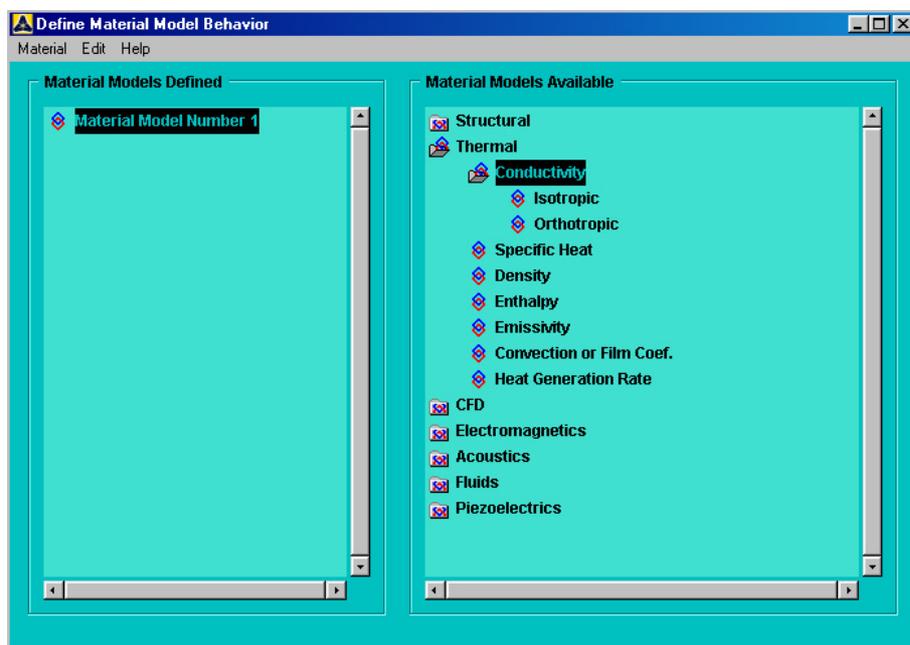
- descripción directa de las propiedades
- empleo de bases de datos de materiales.

En cualquiera de las dos opciones pueden incluirse tanto el caso de propiedades constantes como variables, ya sea con las coordenadas espaciales o con la solución (que pueden suministrarse a partir de tablas o mediante ajustes polinómicos).

La descripción directa de las propiedades se hace mediante

Main Menu: Preprocessor > Material Props > Material Models

que conduce a una ventana como la siguiente.



En caso de haber seleccionado previamente algún tipo de problema específico (en la opción **Preferences...**) esta ventana ofrecerá solamente los tipos de comportamiento correspondientes a dicho problema (en la ventana anterior aparece desplegado el caso térmico).

En caso de resolver problemas en mecánica de fluidos con el módulo FLOTRAN la descripción de las propiedades de los fluidos es ligeramente distinta.

Definición de geometría del dominio

Esta operación se puede también llevar a cabo de dos formas distintas:

- describiendo la geometría directamente a partir de las utilidades del programa
- leyendo la descripción de la geometría generada en otra aplicación (generalmente un programa de CAD).

En el caso de la segunda opción, es preciso llevar a cabo ciertas operaciones sobre la geometría importada (a fin de eliminar, por un lado, aquellos detalles innecesarios durante el análisis mediante elementos finitos y asegurarse, por otro lado, que aquellos detalles importantes durante este análisis están adecuadamente recogidos en la información suministrada). Como ya se ha mencionado, las posibilidades de ANSYS en la descripción de la geometría son relativamente limitadas y resulta muy común, en la práctica, que los usuarios del programa empleen esta opción para generar la geometría del dominio de resolución para los casos de dominios complejos (a partir de archivos IGES, Pro/E, Parasolid, Unigraphics, CATIA o SAT).

Para la descripción directa de la geometría, ésta se hará a partir de la definición de elementos geométricos sencillos sobre los que posteriormente se opera. Estos elementos sencillos están formados por

- puntos
- líneas (rectas, arcos o *splines*)
- áreas (rectangulares, circulares, poligonales u otras definidas a través de líneas o puntos)
- volúmenes (bloques, cilindros, prismas, esferas, conos, toros u otros definidos a través de áreas, líneas o puntos).

Por otro lado, las operaciones sobre estos elementos geométricos incluyen

- operaciones lógicas o *booleanas* (como la unión, intersección o sustracción, entre otras)
- copia de elementos geométricos
- generación de elementos geométricos tridimensionales a partir de otros bidimensionales (mediante *extrusiones*)
- *pegado* de elementos geométricos.

Es importante distinguir entre las operaciones de *unión* (*add*) y *pegado* (*glue*), ya que en la primera desaparecen los elementos geométricos originales en tanto que en la segunda éstos persisten. Así, la segunda operación se empleará siempre que se trate de elementos geométricos correspondientes a materiales distintos (y es además imprescindible realizarla para que reconozca la conexión entre ambos elementos) y se usará también con elementos geométricos del mismo material si se quiere forzar que la malla se ajuste a la separación entre ambos elementos.

Estas operaciones se llevan a cabo mediante los menús

Main Menu: Preprocessor > -Modeling-Create

Main Menu: Preprocessor > -Modeling-Operate

Definición de propiedades de los subdominios

Para cada uno de los subdominios definidos en la etapa anterior será preciso asignar

- material del que está compuesto
- elementos finitos que se emplearán para su discretización.

En el caso de emplear elementos para los cuales sea preciso (o posible) definir algunas constantes asociadas, también se habrá de asignar el correspondiente conjunto de constantes.

Esta operación se hará mediante

Main Menu: Preprocessor > -Attributes-Define .

Generación de un mallado

En esta fase, es preciso indicar el tipo de mallado que se va a emplear (para cada uno de los subdominios):

- mallado estructurado (**mapped** en la terminología de ANSYS), para lo cual será preciso aportar toda la información necesaria para generar la malla
- mallado no estructurado (**free** en la terminología de ANSYS), para lo cual sólo será necesario indicar el tamaño característico de los elementos.

Debe observarse la notable diferencia entre ambas técnicas de mallado:

- el mallado estructurado conlleva una notable carga de trabajo previo (para descomponer el dominio en subdominios cuadrangulares, cuyas aristas pueden ser curvas, o subdominios poligonales fácilmente reducibles a cuadrangulares) pero permite controlar de forma muy estricta la malla que se genera
- el mallado no estructurado no precisa ningún trabajo previo pero sólo permite controlar de un modo indirecto (a través de los tamaños característicos) el mallado que se genera.

Por otro lado, durante la generación de mallados en problemas bidimensionales es preciso indicar si se desea generar una malla de triángulos o una malla de cuadrángulos. Esto es así porque algunos elementos finitos triangulares se pueden definir a partir de los correspondientes elementos cuadrangulares mediante el *colapso* de nodos (así ocurre, por ejemplo, con los elementos P^1 y Q^1). En tales casos, ANSYS incorpora solamente el elemento cuadrangular en el catálogo de elementos disponibles pudiendo emplear en los cálculos el elemento triangular si en la generación del mallado se opta por una malla de triángulos (de hecho, en la generación de mallados no estructurados de cuadrángulos sobre geometrías complicadas es habitual que el propio programa genere algunos elementos triangulares). Algo similar ocurre en la generación de mallas en problemas tridimensionales.

La determinación del tipo de mallado que se va a emplear (junto con otras opciones de malla) se hace a través de

Main Menu: Preprocessor > -Meshing-Mesher Opts

en tanto que la determinación del tamaño característico de los elementos (en las mallas no estructuradas) se hace con

Main Menu: Preprocessor > -Meshing-Size Cntrl

Una vez fijados los parámetros de mallado, se ejecutará

Main Menu: Preprocessor > -Meshing-Mesh

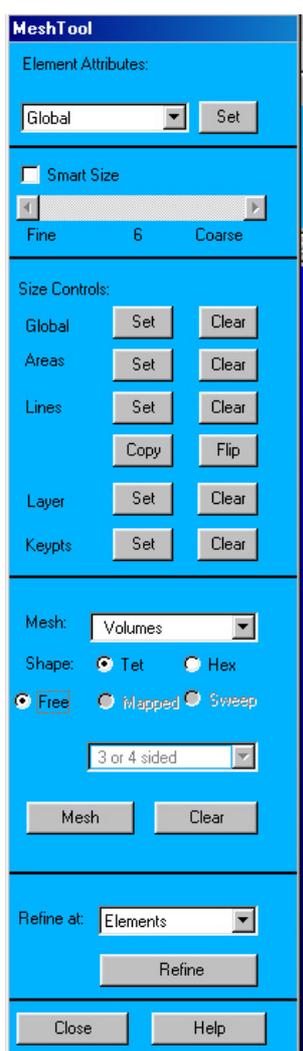
en tanto que la malla puede ser borrada a través de

Main Menu: Preprocessor > -Meshing-Clear

En todo caso existe además una aplicación que integra los comandos anteriores, a la cual se accede mediante

Main Menu: Preprocessor > MeshTool

que conduce a una ventana como la que se muestra a continuación.



Es recomendable guardar toda la información del modelo antes de proceder a la etapa de generación de la malla para poder retomar la geometría si no se está de acuerdo con la malla generada (algunos elementos finitos de la malla no pueden ser borrados fácilmente una vez generada la malla). En cualquier caso, se recomienda hacer esta operación con cierta frecuencia durante todo la sesión.

Para guardar, en el archivo por defecto, los datos almacenados durante la sesión se pulsará la opción **SAVE_DB** en la barra de utilidades, en tanto que para retomar la sesión, de ese mismo archivo, en el punto en que se almacenaron los datos por última vez se pulsará **RESUM_DB** en esta misma barra.



Estas acciones se pueden también ejecutar a través de

Utility Menu: File > Save as Jobname.db

Utility Menu: File > Resume from Jobname.db

En el menú de utilidades aparecen también las opciones análogas (**save as** y **Resume from**) para elegir archivo.

Imposición de condiciones de contorno y términos fuente

La imposición de condiciones de contorno incluye, en el caso de los problemas en mecánica de sólidos,

- condiciones sobre desplazamientos
- condiciones sobre fuerzas
- condiciones de simetría

y en los problemas de transmisión de calor

- condiciones sobre temperaturas
- condiciones sobre flujos de calor (que incluyen las de simetría).

En los problemas de dinámica de fluidos, habitualmente se tendrán (véanse las notas teóricas del curso)

- condiciones sobre las velocidades en las zonas de entrada de fluido
- condiciones sobre la velocidad o condiciones de deslizamiento en las fronteras con velocidad nula o flujo tangente
- condiciones sobre la presión en las zonas de salida de fluido.

Por otro lado, la imposición de términos fuente incluye, para los problemas en mecánica de sólidos,

- fuerzas gravitatorias o inerciales
- fuerzas de origen térmico
- fuerzas originadas por la presencia de campos eléctricos o magnéticos

en tanto que en los problemas térmicos estarán constituidas por todas aquellas fuentes o sumideros de calor que actúen de modo distribuido por el dominio donde se resuelve el problema (recuérdese que esto incluye los flujos de calor perpendiculares al plano en el caso de modelos bidimensionales).

Tanto las condiciones de contorno como los términos fuente pueden asociarse, en ANSYS, a los elementos geométricos empleados en la descripción de la geometría (puntos, líneas, áreas y volúmenes) o directamente a los nodos de la malla de elementos finitos que se genere.

La imposición de condiciones de contorno y términos fuente se hace a través de

Main Menu: Preprocessor > Loads > -Loads-Apply

apareciendo, en cada caso, sólo algunas opciones dependiendo del tipo de problema seleccionado (a través del menú **Preferences...** y el tipo de elementos finitos definidos). Si se desea eliminar alguna condición de contorno o término fuente para sustituirlo por otro, se hará mediante

Main Menu: Preprocessor > Loads > -Loads-Delete .

4.6 Fase de proceso

En la fase de proceso es preciso tomar varias decisiones acerca de

- tipo de análisis que se desea llevar a cabo
- determinación de condiciones iniciales en problemas evolutivos
- determinación de la evolución temporal de las cargas
- opciones de resolución numérica
- opciones acerca de las estrategias de resolución.

Elección del tipo de análisis

El programa ANSYS permite elegir entre los siguientes tipos de análisis para problemas en mecánica de sólidos:

- problema estático
- problema evolutivo (incorporando, junto al problema evolutivo completo, la resolución simplificada del problema evolutivo por composición de unos pocos modos)
- búsqueda de modos propios de vibración
- problemas de pandeo (*buckling*),

en tanto que para problemas en transmisión de calor o dinámica de fluidos, estas opciones se limitan a la resolución de problemas estacionarios o evolutivos.

Por otro lado, el programa permite también optar por resolver un problema nuevo o retomar la resolución desde los resultados de un análisis previo.

La determinación de estas opciones se hace desde

Main Menu: Solution > -Analysis Type

Determinación de condiciones iniciales

En el caso de problemas evolutivos será preciso fijar las condiciones iniciales y determinar la evolución temporal de las cargas aplicadas. Aunque la descripción de las condiciones iniciales y la evolución de las cargas correspondería a la fase de preproceso, la posibilidad de resolver el problema evolutivo en varias etapas hace que en ANSYS ésta se haga generalmente en el momento de fijar las opciones del proceso.

La imposición de condiciones iniciales se hace mediante

Main Menu: Solution > -Loads-Apply > Initial Condit'n

Determinación de la evolución temporal de las cargas

La determinación de la evolución temporal de las cargas se puede hacer incluyendo simplemente la dependencia con respecto al tiempo en las condiciones de contorno y términos fuente, tal y como se ha descrito en la fase de preproceso. Sin embargo existe una alternativa para tratar problemas evolutivos complejos de una manera más cómoda a través de la descomposición del intervalo de resolución en varios subintervalos fijando por separado las condiciones de carga en cada uno de ellos (en el programa ANSYS se denominan *Load Steps*). Así, para cada subintervalo se almacenan las condiciones de carga y se graban mediante la opción

Main Menu: Solution > Write LS File

que creará un archivo donde se registra la evolución de las cargas a lo largo de todo el intervalo.

Opciones de resolución numérica

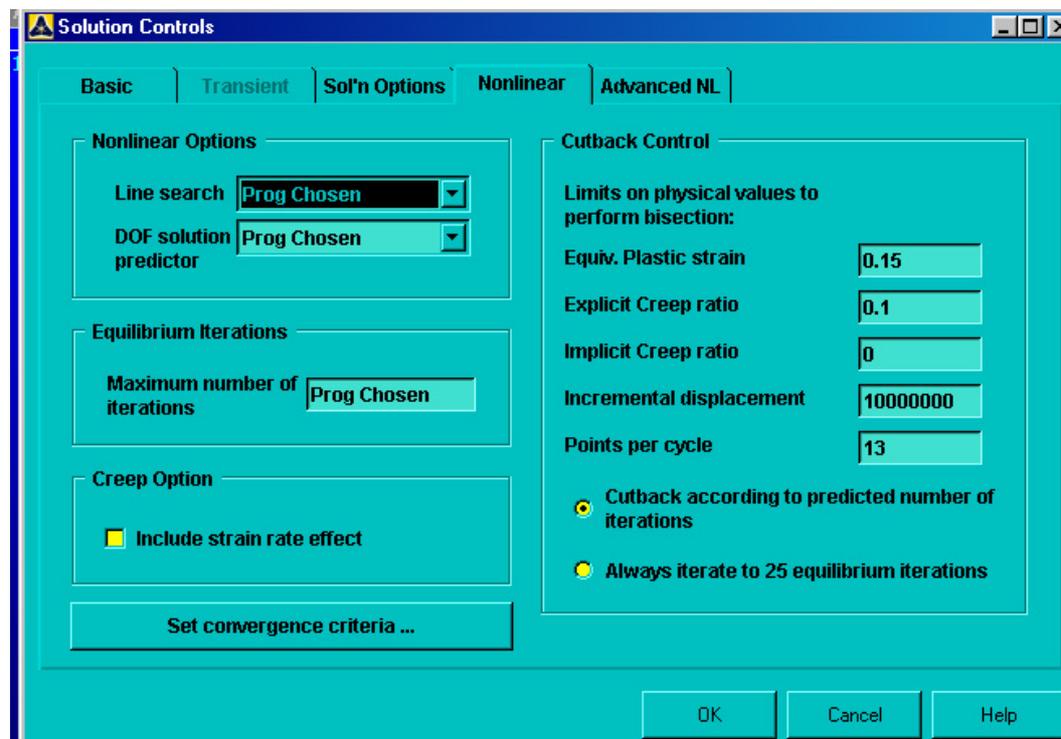
Entre estas opciones se encuentran

- resolución del sistema de ecuaciones lineales
- esquemas de integración temporal de las ecuaciones de evolución
- opciones de resolución de los problemas no lineales

Estas opciones pueden verse de forma rápida en la opción

Main Menu: Solution > Sol'n options

que muestra la ventana siguiente.



Si ya se han establecido algunas opciones y en algunos módulos la elección del método de resolución del sistema de ecuaciones lineales (entre varios métodos que incluyen el método frontal, distintas versiones de gradiente conjugado y un método multimalla) se hará mediante

Main Menu: Solution > -Analysis Options .

La elección del esquema de integración temporal de las ecuaciones (a partir de un θ -método para los problemas de primer orden y un esquema de Newmark para los problemas de segundo orden) se hace mediante

Main Menu: Solution > -Load Step Opts -Time/Frequenc > Time Integration ,

en tanto que la determinación del intervalo de tiempo sobre el que habrá de resolverse el problema y el ajuste del paso de tiempo se harán con

Main Menu: Solution > -Load Step Opts -Time/Frequenc > Time - Time Step .

Finalmente, la determinación de diversas opciones relativas a la resolución de problemas no lineales (como los criterios de convergencia) se hace a través de

Main Menu: Solution > -Load Step Opts -Nonlinear

Opciones acerca de las estrategias de resolución

En el caso de problemas estacionarios, existen dos modos de ejecución del proceso:

- resolución sin adaptación de malla
- resolución con adaptación de malla.

El primero de éstos se lleva a cabo mediante

Main Menu: Solution > -Solve -Current LS

y el segundo con

Main Menu: Solution > -Solve -Adaptive Mesh .

En los problemas evolutivos, a su vez, se puede elegir entre resolver un único paso de carga (*Load Step*) o resolver todos los pasos de carga almacenados en un archivo.

Para la resolución de un único paso de carga (el último definido) se hará

Main Menu: Solution > -Solve -Current LS

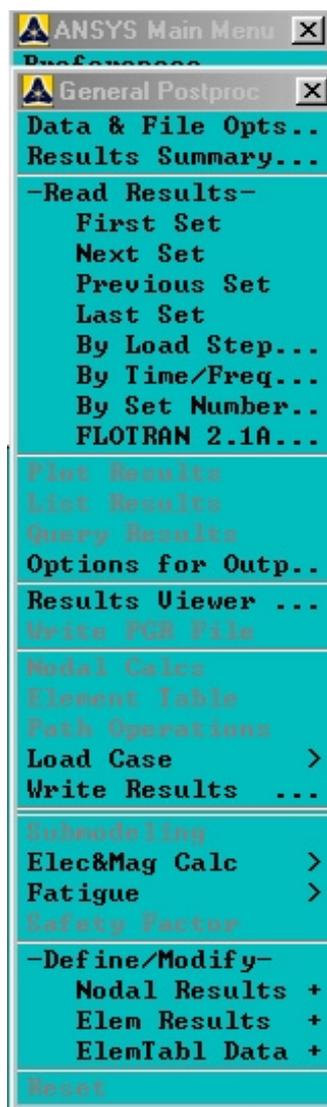
y para resolver todos los pasos grabados en un archivo

Main Menu: Solution > -Solve -From LS Files .

4.7 Fase de postproceso

La última fase del análisis mediante elementos finitos está constituida por la fase de postproceso de los resultados. En ANSYS esta fase se lleva a cabo a través de dos módulos:

- módulo de postproceso general
- módulo de postproceso específico para problemas evolutivos



Dentro del primero es preciso, en primer lugar, seleccionar y leer el paso que se desea post-procesar (en el caso estacionario el único que hay es *last*).

La lectura de las soluciones asociadas a este paso se hace mediante

Main Menu: General Postproc > -Read Results .

Las principales operaciones que se llevan a cabo durante esta fase son:

- representación gráfica de las soluciones
- listado de soluciones
- operaciones sobre las soluciones.

Representación gráfica de las soluciones

ANSYS permite el siguiente tipo de gráficas:

- gráficas de isolíneas (para componentes escalares)
- gráficas de vectores (para componentes vectoriales)
- gráficas de perfiles (para componentes escalares).

Las primeras se obtienen mediante

Main Menu: General Postproc > Plot Results > -Contour Plot

y permiten representar tanto las soluciones nodales como las elementales.

Las gráficas de vectores se obtienen a través de

Main Menu: General Postproc > Plot Results > -Vector Plot

Finalmente, las gráficas de perfiles se representan mediante

Main Menu: General Postproc > Plot Results > -Plot Path Item

pero requieren antes haber definido la línea a la que se asocia el perfil con

Main Menu: General Postproc > Path Operations -Define Path

y haber interpolado la solución sobre ella a través de

Main Menu: General Postproc > Path Operations -Map onto Path .

Listado de soluciones

Permite obtener información sobre los resultados de la resolución del problema y listados con las soluciones nodales y elementales (en este caso, sobre los nodos de cuadratura). Se obtienen a través de

Main Menu: General Postproc > List Results .

Operaciones sobre las soluciones

Del mismo modo que ocurre con el preproceso, ANSYS no desarrolla un módulo amplio de postproceso sino que esta operación se hará habitualmente a través de otros programas o mediante módulos programados por el usuario. El programa solamente incorpora algunas utilidades para

- cálculo de factores de seguridad en el módulo LS-DYNA (para problemas dinámicos en grandes deformaciones)
- cálculos de fatiga
- cálculos de factores de intensificación de tensiones

a las cuales se accede mediante

Main Menu: General Postproc > Safety Factor

Main Menu: General Postproc > Fatigue

Main Menu: General Postproc > Nodal Calcs > Stress Int Factr .

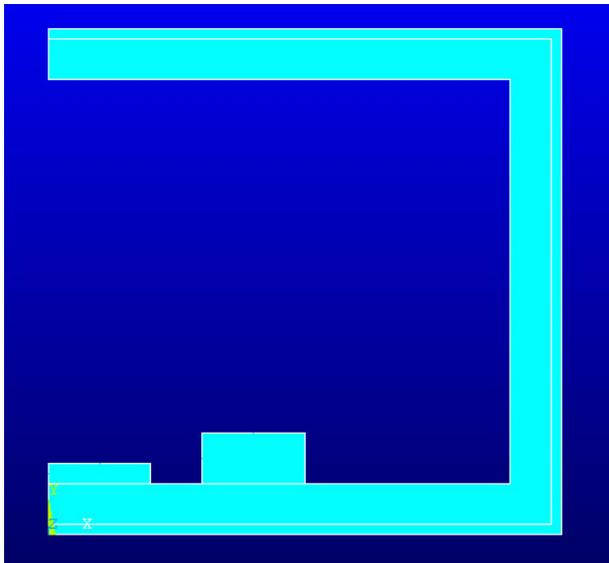
5. Práctica 3. ANSYS. Problema evolutivo de transmisión de calor.

5.1 Práctica resuelta: tratamiento térmico de piezas

En la presente práctica se resuelve un problema evolutivo en transmisión de calor mediante el programa ANSYS, para lo que se plantea un problema parecido al que se resolvió en la Práctica 1 con el programa FEMLAB. La descripción del modelo y las condiciones de contorno ya han sido vistas por lo que sólo se reescriben aquí los datos que caracterizan el problema.

Descripción del problema

Se considera la sección vertical rectangular de un horno de 10 m. de ancho por 5 m. de alto, cuya pared interna mide 40 cm. de espesor y el aislante exterior mide 10 cm. de espesor. En su interior están colocadas tres piezas largas sobre la solera, una de ellas de 2 m. de ancho por 20 cm. de alto situada en el centro y a ambos lados de ésta, a una distancia de 50 cm, dos piezas de 1 m. de largo por 50 cm. de alto. El dominio se muestra en la siguiente figura.



Los parámetros de los materiales se resumen en la siguiente tabla:

material	conductividad W/mK	densidad Kg/m ³	calor específico J/KgK
aislante	0.5	1900	875.7
refractario	3	1900	875.7
piezas	30	1900	875.7

La temperatura de los gases en el interior del horno es de 1350°C y la temperatura ambiente es de 25°C . Los coeficientes de convección (en $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$) considerados son:

- 20 entre el refractario, las piezas y el interior
- 6 entre la pared inferior del aislante y el medio exterior
- 13 entre la pared superior del aislante y el medio exterior
- 10 entre la pared vertical del aislante y el medio exterior.

Nos planteamos arrancar con temperatura uniforme de 298°K y obtener la distribución de temperaturas al cabo de 20 horas usando como paso de tiempo 1 hora.

Resolución del problema

La resolución de este problema mediante elementos finitos con ANSYS pasa por las etapas que se enumeran a continuación, siendo muy importante respetar el orden.

Configuración de preferencias:

Fase de preproceso

- 1 definir el tipo de elementos finitos que se emplearán
- 2 definir, si es preciso, las constantes asociadas a los elementos elegidos
- 3 definir las propiedades de los materiales (escoger el sistema de unidades y las unidades para la temperatura)
- 4 definir la geometría (lo haremos restando dos rectángulos para construir la capa exterior, repitiendo el proceso para la capa interior y añadiendo dos más para las piezas)
- 5 Asignar los materiales a cada parte
- 6 Pegar todas las partes para crear un sólo dominio
- 7 definir un mallado del dominio.

Fase de proceso

- 8 elegir el problema evolutivo
- 9 imponer las condiciones de convección en las fronteras interiores y exteriores
- 10 imponer la condición de flujo nulo en la zona de simetría
- 11 imponer la condición inicial
- 12 fijar el intervalo y el paso de tiempo y elegir en qué tiempos se desea visualizar la solución.

Fase de postproceso

- 13 representar las variables de interés
- 14 obtener listados de valores buscados

A continuación se describe cada uno de los pasos del análisis.

Configuración de preferencias

Recuérdese que al iniciar el programa ANSYS en modo interactivo pueden configurarse el directorio donde el programa guardará los distintos archivos generados y el nombre que inicialmente se le asignará a estos archivos; este nombre aparecerá también en las gráficas que se generen. Para ello, como se ha visto en el capítulo anterior, es preciso seleccionar

Programas > ANSYS 6 > Interactive

e introducir las opciones deseadas, antes de pulsar **Run** para iniciar el programa.

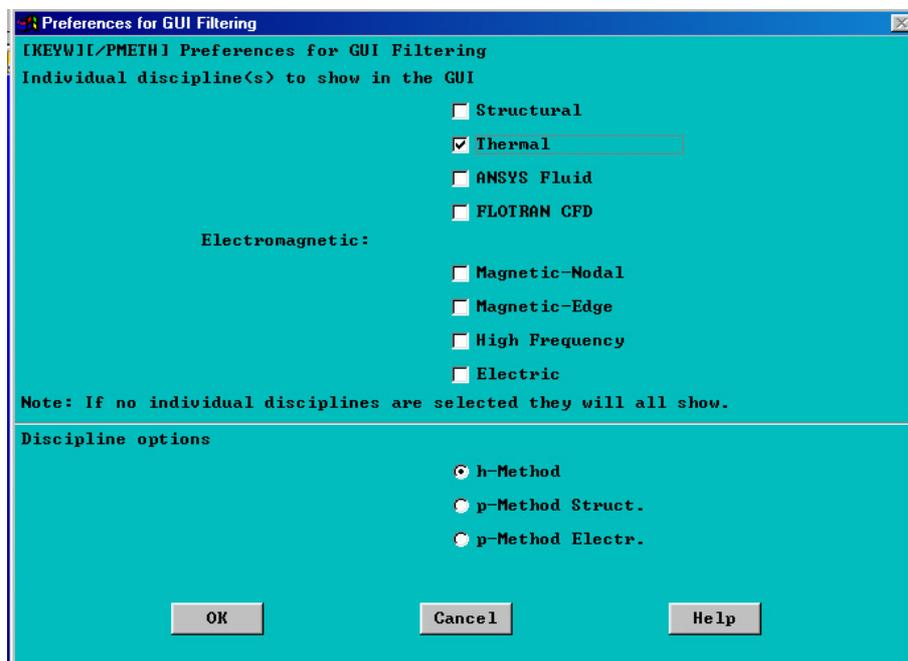
A continuación será conveniente seleccionar **Thermal** en el menú

Main Menu: Preferences

a fin de que durante la sesión solamente se muestren las opciones activas en este tipo de problemas.

Por otro lado, elegiremos la opción **h-Method** en la que la estimación de error está relacionada con la disminución del parámetro h , lo que se obtiene refinando la malla (recuérdese que

la segunda opción, denominada **p-Method** en ANSYS, emplea una adaptación que aumenta el grado de los polinomios).



Definición del tipo de elementos finitos

Una vez seleccionado el estudio de un problema de transmisión de calor ANSYS nos ofrece los elementos que permite para este caso. Los elementos aparecen en ANSYS agrupados bajo distintas categorías según sean puntuales, para cálculos en 1D, 2D o 3D, atendiendo al tipo de problema (termo-eléctrico), etc. Seleccionamos aquí como ejemplo **Solid** y mencionaremos algunas características.

Elementos bidimensionales (tridimensional axisimétrico):

- PLANE 55 (Q_1): cuadrangular con 4 nodos (permite incluir transporte de masa) y lleva implícito el correspondiente triangular (P_1) con 3 nodos.
- PLANE 77 (Q_2): cuadrangular con 8 nodos que lleva implícito el correspondiente triangular (P_2) con 6 nodos. Este último es el mismo que si elegimos directamente **PLANE 35**, que es lo que se recomienda, pues al hacer la malla se haría directamente en triángulos.
- PLANE 75 (Q_1): cuadrangular (triangular) con 4 nodos con capacidad de tener en cuenta en el caso de usarlo para un problema tridimensional axisimétrico con condición de contorno no simétrica.
- PLANE 78 (Q_2): análogo al anterior con 8 nodos.

Elementos tridimensionales:

- SOLID 70 (Q_1): cuadrangular con 8 nodos (permite incluir transporte de masa) y lleva implícitos el caso del prisma con 6 nodos y del tetraedro (P_1) con 4 nodos.
- SOLID 90 (): cuadrangular con 20 nodos y lleva implícitos versiones con forma de prisma, de tetraedro y de pirámide.
- SOLID 87 (P_2): tetraedro con 10 nodos.

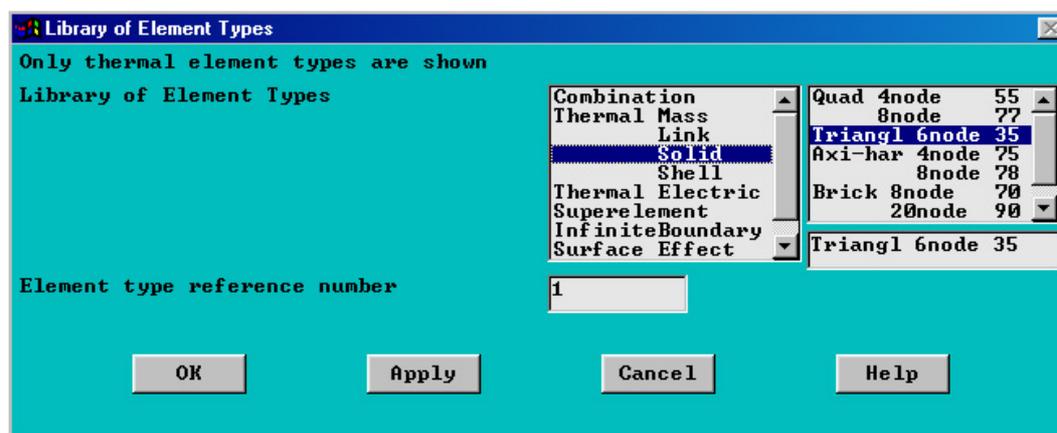
La elección del tipo particular de elementos finitos a emplear requiere un conocimiento del tipo de problema, de las soluciones que cabe esperar y depende además de los objetivos del análisis. Así, por ejemplo, un problema como el propuesto donde no hay términos de arrastre ni de radiación y la solución es bastante sencilla puede ser resuelto con elementos de un grado bajo. Además, en este ejemplo, en el que nos planteamos resolver 20 pasos de tiempo debemos tener en cuenta que en cada paso resolvemos un problema bidimensional y si bien la geometría es sencilla tiene una zona con poco espesor y debemos cuidar que el número de elementos de la malla no se dispare.

De acuerdo con estas observaciones vamos a elegir elementos triangulares de 6 nodos (esto es, elementos P_2). Esto se hará mediante

Main Menu: Preprocessor > Element Type > Add/Edit/Delete > Add

eligiendo

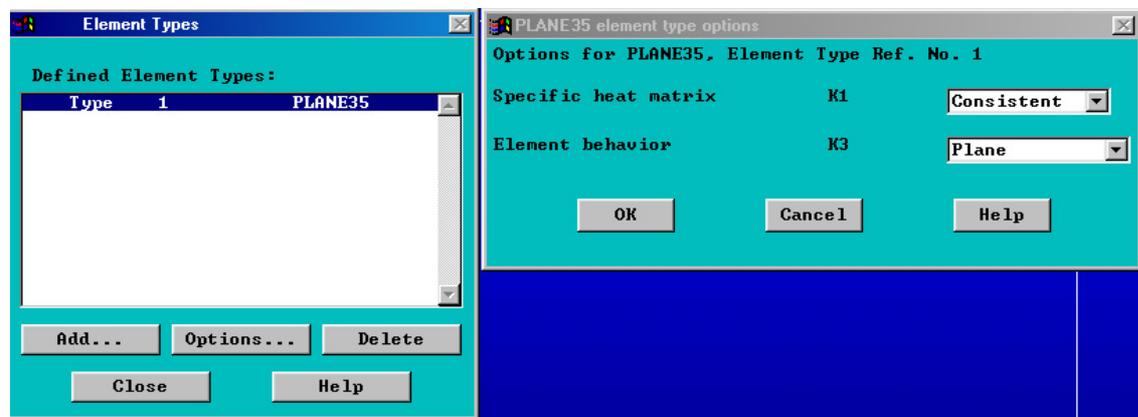
Thermal Mass / Solid / Triangl 6node 35



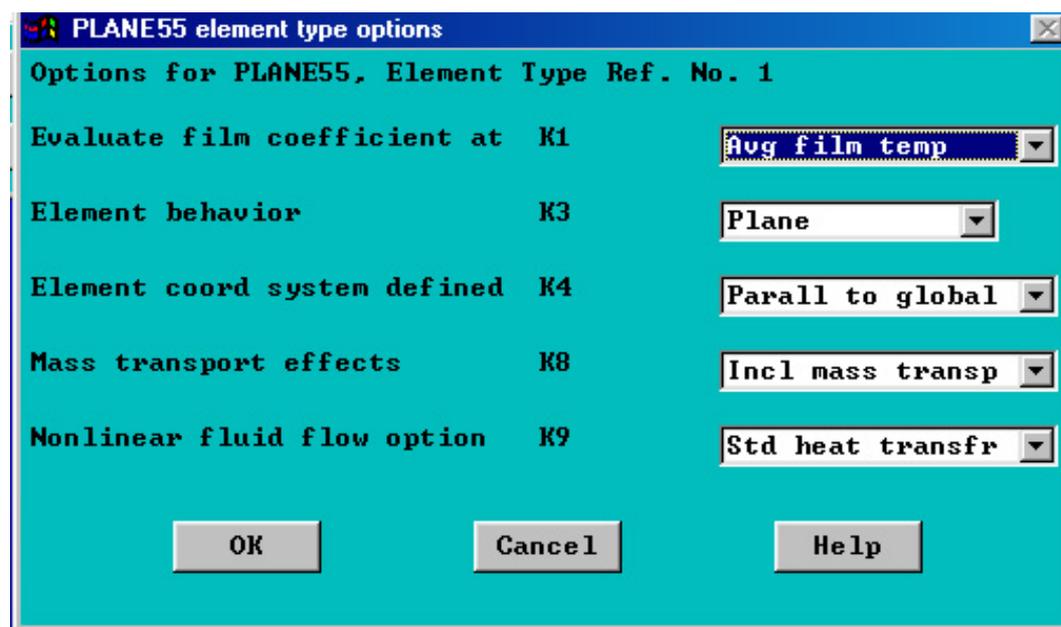
Este elemento, que en nuestro caso usaremos con las opciones por defecto, permite además considerar que se trata de un problema axisimétrico. Para ver las propiedades de un elemento ya preseleccionado se accede con

Main Menu: Preprocessor > Element Type > Add/Edit/Delete > Options

observándose la siguiente ventana.



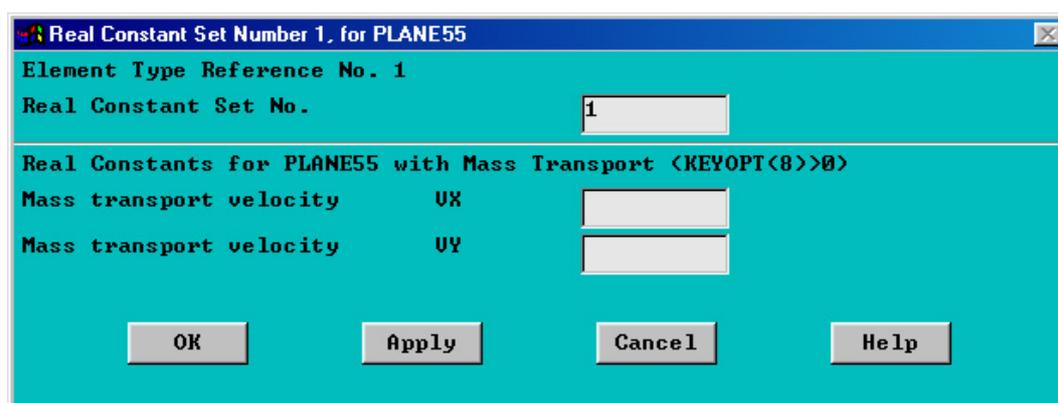
Este elemento no tiene asociadas constantes reales. Para mostrar cómo se añadirían, vamos a suponer que se ha elegido el elemento **PLANE 55**, el cual nos permitiría considerar un término debido al arrastre de masa y asignarle como constantes reales las velocidades en cada dirección. En ese caso, aparecería la siguiente ventana de opciones



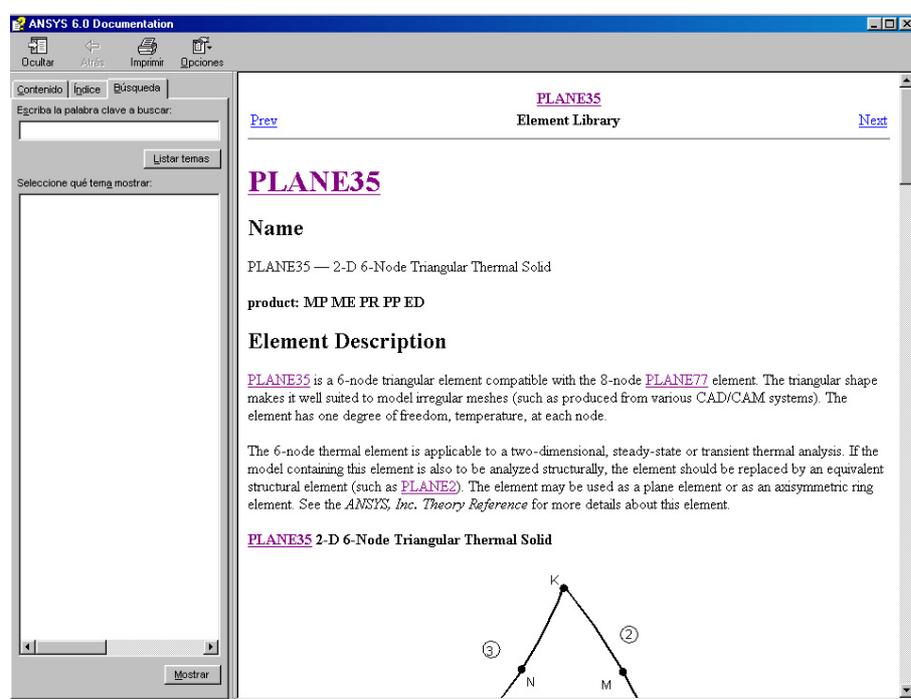
en la que se ha seleccionado incluir masa.

Después utilizaríamos las constantes asociadas para incorporar la velocidad accediendo a

Main Menu: Preprocessor > Real Constants > Add/Edit/Delete > Add > Type 1 / PLANE55



En caso de duda acerca de los parámetros asociados a un cierto tipo de elemento (así como para consultar la descripción en sí del elemento) puede invocarse la ayuda a través de **Help**, lo que conducirá a la correspondiente página del manual de ANSYS.



Obsérvese que, al terminar la definición de las constantes asociadas al elemento, se habrá creado un *conjunto* de constantes reales que podrá ser asociado a aquellos elementos con dichas propiedades. En caso de una pieza en la que deseemos usar distintos tipos de elementos o elementos con distintas propiedades, habría que generar un conjunto de este tipo para cada elemento.

Cabe ahora hacer una observación sobre los sistemas de unidades. En ANSYS, al igual que en cualquier otro código de elementos finitos, es posible trabajar con cualquier sistema de unidades sin necesidad de especificarlo: las ecuaciones que se resuelven son ciertas independientemente de las unidades que empleemos para medir cada una de las variables. No

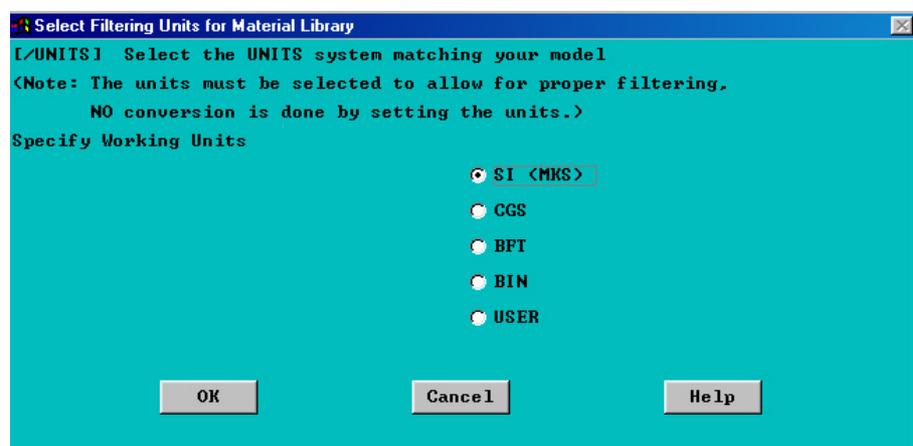
obstante, sí resulta imprescindible adoptar un sistema consistente de unidades para describir todos los datos del problema (incluyendo datos geométricos, propiedades de los materiales y cargas que actúan sobre ellos).

Así, en el ejemplo que nos ocupa podemos usar el sistema internacional de unidades con lo que consideraremos las longitudes en metros, la temperatura en grados Kelvin y el resto de valores tal cual se han dado. La elección de unidades se encuentra en el siguiente apartado.

Definición de las propiedades del material

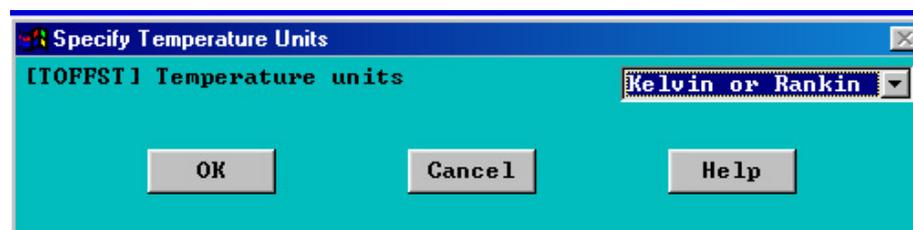
Es preciso ahora almacenar las constantes que definen las propiedades de cada uno de los materiales. Comenzamos por la selección del sistema de unidades que se encuentra en

Main Menu: Preprocessor > Material Props > Material Library > Select Units



La elección de las unidades de Temperatura se lleva a cabo en

Main Menu: Preprocessor > Material Props > Temperature Units



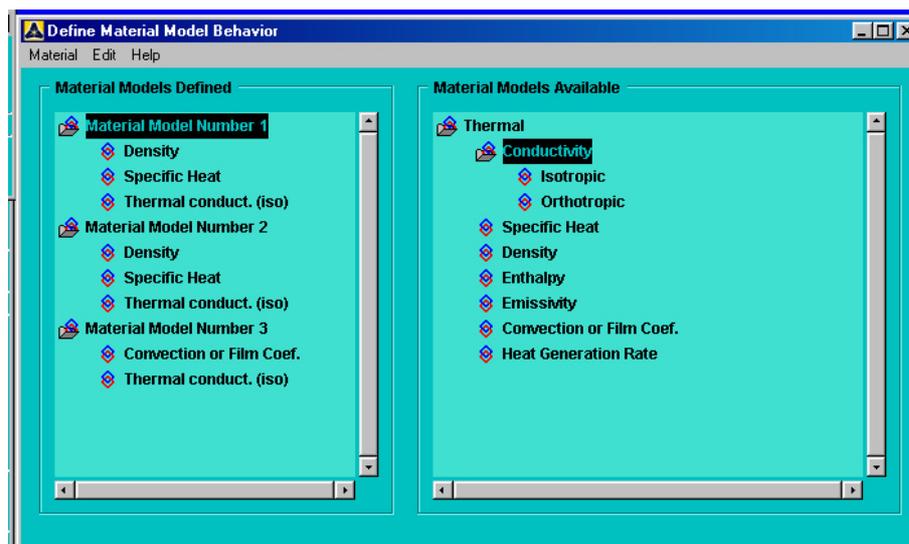
La elección de los materiales y asignación de propiedades se efectúa en

Main Menu: Preprocessor > Material Props > Material Models .

Asignaremos al material número 1 las condiciones del aislante (material isótropo con conductividad 0.5, densidad 1900 y calor específico 875.7) para su empleo posterior. Para ello haremos doble click en cada una de las propiedades que queremos fijar: **Conductivity >**

Isotropic, **Density** y **Specific Heat**, introduciendo los valores correspondientes. A continuación definiremos el material número 2 seleccionando **Material / New Model** en la ventana **Define Material Model Behavior** e incorporando las propiedades correspondientes para el material refractario y repetiremos el proceso creando el material número 3 para las piezas.

Para finalizar la definición de materiales se seleccionará, en esta misma ventana, la opción **Material / Exit**. El resultado puede verse en la siguiente ventana.



Al final de cada paso es conveniente guardar los datos almacenados de modo que, si en algún momento se comete algún error, pueda retomarse de nuevo el análisis desde el último paso. Recuérdese que para guardar los datos en el archivo con nombre por defecto se debe pulsar **SAVE_DB** en la barra de utilidades y para retomar el análisis en el momento en que se guardaron los cambios por última vez, se selecciona **RESUM_DB** en este mismo menú.

Definición de la geometría

La geometría de este dominio se definirá utilizando rectángulos. Así, para definir la capa de aislante restaremos dos rectángulos: el exterior, que se hará con

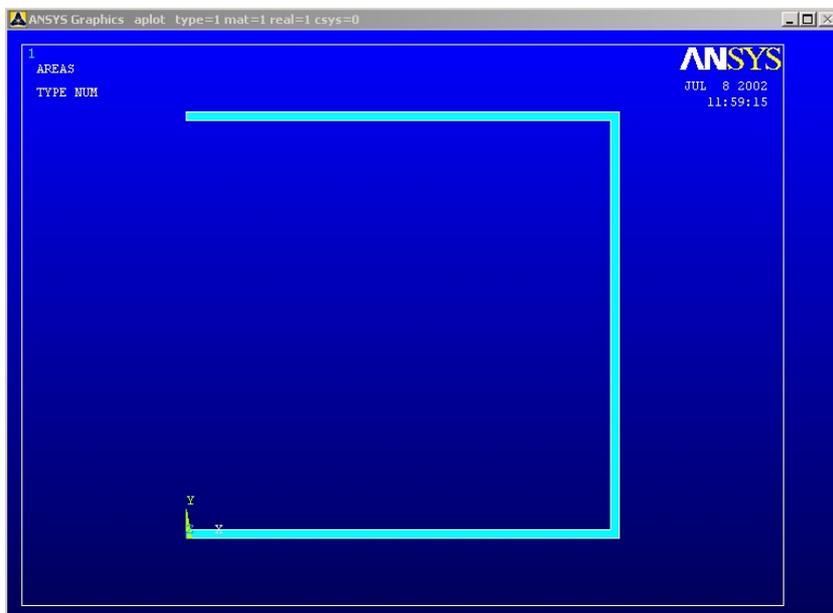
Main Menu: Preprocessor > -Modeling-Create > -Areas-Rectangle > By Dimensions

definiendo el rectángulo producto cartesiano de los intervalos $[0, 5]$ (en el eje X) y $[0, 5]$ (en el eje Y), y el interior, que se hará de modo análogo con dimensiones $[0, 4.9]$ (en el eje X) y $[0.1, 4.9]$ (en el eje Y). A continuación, es preciso operar lógicamente ambas áreas para definir la geometría de la pieza. Así, para retirar el segundo rectángulo del primero, se hará

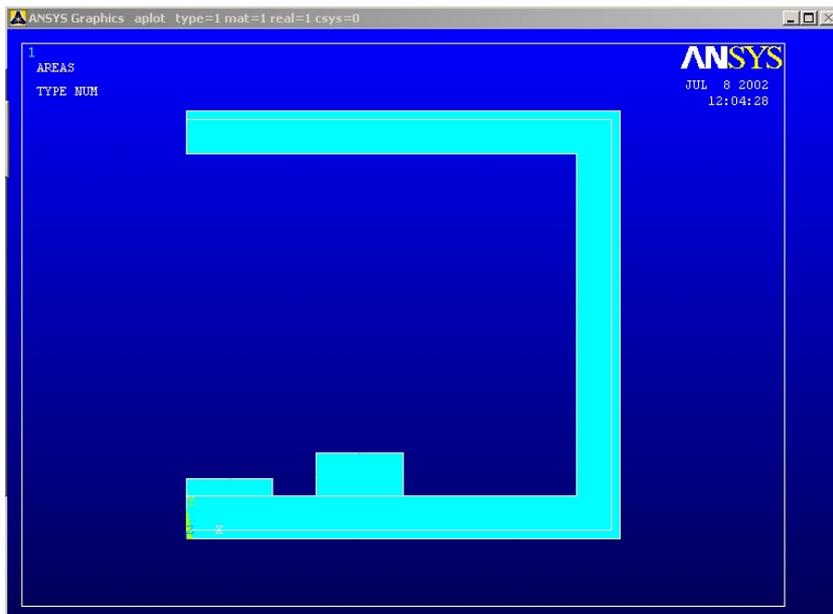
Main Menu: Preprocessor > -Modeling-Operate > -Booleans-Subtract > Areas

seleccionando en primer lugar el rectángulo exterior (obsérvese el mensaje en la ventana de entrada rotulada con **ANSYS Input** y situada en la parte superior) y, posteriormente, el

interior. Para seleccionar cada área bastará con colocar el ratón sobre ella y presionar el botón izquierdo (si el programa identifica varias áreas en ese punto se abrirá una ventana que permitirá moverse entre éstas hasta llegar al área que se desea seleccionar) y, una vez que ha sido seleccionada, se pulsa **Apply** si se quiere seguir haciendo esta operación o **OK** para cambiar de operación.



Se repetirá el proceso anterior creando y restando dos rectángulos con datos $[0, 4.9]$ (en X) y $[0.1, 4.9]$ (en Y) y $[0, 4.5]$ (en X) y $[0.5, 4.5]$ (en Y). Finalmente, se crearán los rectángulos de las piezas con datos $[0, 1]$ (en X), $[0.5, 0.7]$ (en Y) y $[1.5, 2.5]$ (en X), $[0.5, 1]$ (en Y) de donde resultará la geometría completa que se muestra en la siguiente figura.

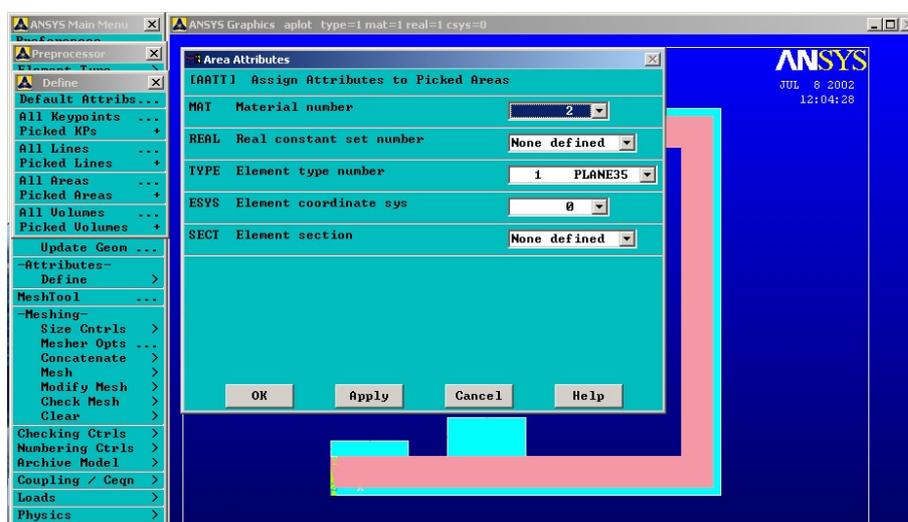


Asignación de materiales

A continuación es preciso asignar a cada subdominio el material del que está constituido, el tipo de elementos con los que se mallará y las constantes, si las hubiera, asociadas a esos elementos. Esta operación se hace mediante

Main Menu: Preprocessor > -Attributes-Define > Picked Areas

y seleccionando cada área, con el ratón, para ir especificando los datos de todas ellas. En nuestro problema, se hará para cada uno de los 3 subdominios definidos; así, por ejemplo, para el material refractario se tendría la siguiente pantalla.



Pegado de subdominios

A continuación volveremos a la fase de operaciones con áreas para pegar todos los subdominios. Debe recordarse que esta opción mantiene los elementos geométricos originales (véase la introducción a ANSYS de este manual). Esta operación se lleva a cabo con la opción

Main Menu: Preprocessor > -Modeling-Operate > -Booleans- > Glue > Areas .

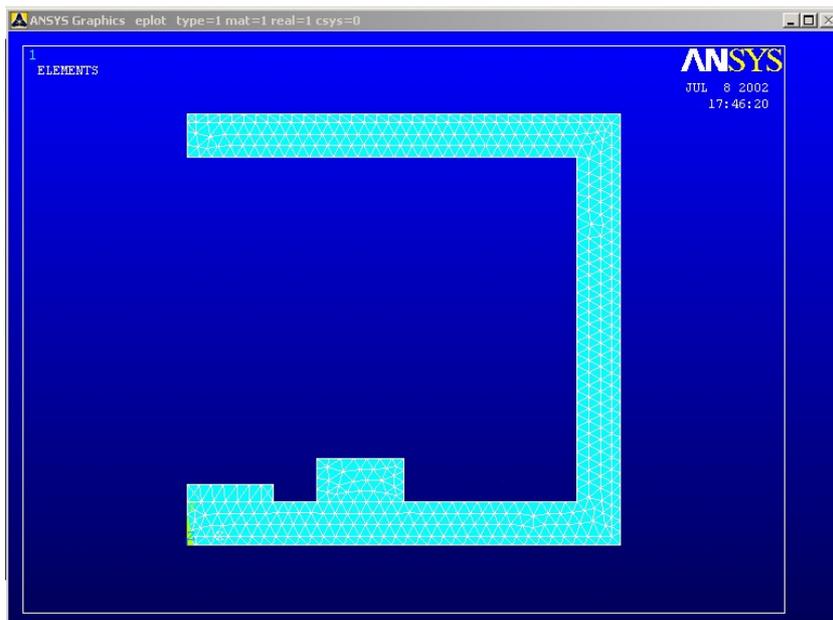
Generación de un mallado

Una vez definida la geometría se procede a generar una malla de elementos finitos asociada a esta geometría empleando los elementos definidos previamente. Es conveniente, antes de empezar esta operación, haber guardado todos los datos anteriores mediante **SAVE_DB**.

Para generar ahora un mallado no estructurado asociado a este dominio se puede utilizar el *meshtool* que se encuentra en **Main Menu: Preprocessor > MeshTool**, a partir de

cuya ventana (ver introducción a ANSYS de este manual) se puede mallar y refinar de forma sencilla, controlando los parámetros.

En nuestro caso, si utilizamos el meshtool como sigue: seleccionamos **smart size 2**, los parámetros de control del tamaño por defecto, **mesh Areas** y pulsamos **Mesh**, se abre la ventana habitual de selección de áreas en la que podemos seleccionarlas todas juntas presionando **Pick All** y obtenemos un mallado como el de la siguiente figura.



Si se prefiere mallar directamente se haría, en primer lugar,

Main Menu: Preprocessor > -Meshing-Size Cntrls > -Global-Size

para asignar una referencia para el tamaño característico de los elementos. Para el problema que nos ocupa (y de acuerdo con el tipo de análisis descrito) podríamos tomar para el parámetro **Size / Element Edge Length** un valor de 0.25, por ejemplo.

Para generar un mallado de triángulos, con estas indicaciones, se elegiría

Main Menu: Preprocessor > -Meshing-Mesh > -Areas-Free

y se seleccionará el dominio que se desea mallar.

Si la malla resultante no fuese aceptable, en opinión del usuario y de acuerdo con los objetivos del análisis, se puede modificar eligiendo

Main Menu: Preprocessor > Meshing > Modify mesh > Areas

seleccionando las áreas a refinar y fijando los parámetros correspondientes; es posible también eliminar la malla creada con

Main Menu: Preprocessor > Meshing > Clear > Areas

retomando, posteriormente, la operación de generación de la malla. Si durante esta operación surgiese alguna dificultad podrá también retomarse el análisis tal y como se encontraba al iniciar este paso con **RESUM_DB**, siempre y cuando se hubiesen guardado los datos con **SAVE_DB** al final del paso anterior.

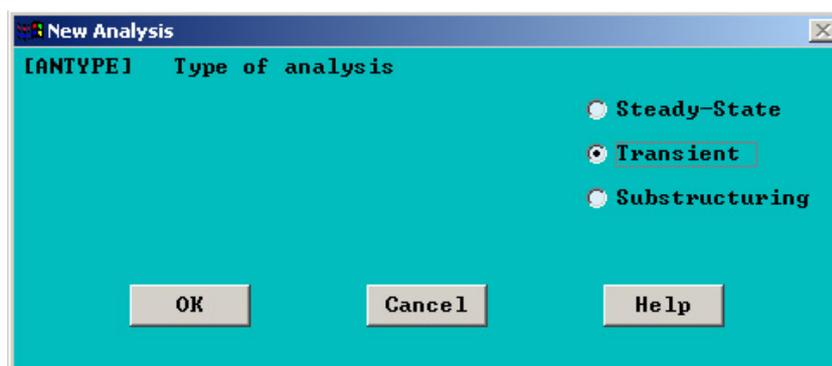
A continuación, desde el menú del preproceso se puede acceder a la opción **Loads** que da acceso a la imposición de las condiciones de contorno. Como en este momento todavía no hemos elegido el tipo de análisis, evolutivo o estacionario, y por defecto es estacionario, la opción **Loads** no nos daría la posibilidad de fijar la condición de arranque. Las restricciones también pueden fijarse desde el módulo de proceso por lo que, como queremos resolver un problema evolutivo, vamos a incluir todas las condiciones en el módulo de resolución.

Resolución del problema

En primer lugar se habrá de indicar el tipo de análisis mediante

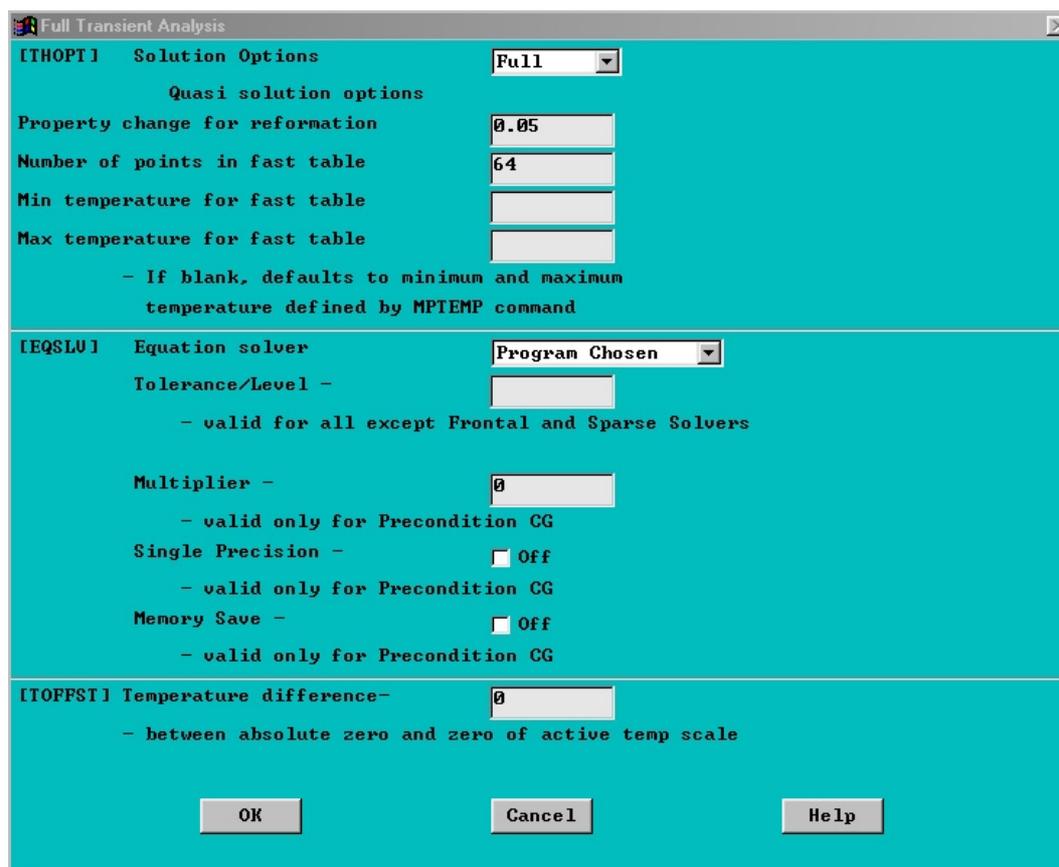
Main Menu: Solution > -Analysis Type -New Analysis

eligiendo evolutivo (*Transient*), como se ve en la figura.



Seguidamente podemos elegir diversas opciones para el cálculo de la solución; en nuestro caso elegimos las opciones por defecto. Esto se haría con

Main Menu: Solution > -Analysis Options .



A continuación añadiremos todas las condiciones que se agrupan bajo la opción **Loads**. Comenzamos modificando la temperatura uniforme preestablecida pues en un problema evolutivo la usa en el primer paso. Esto se hace en

Main Menu: Solution > -Loads-Settings > Uniform Temp

escribiendo el valor 298.

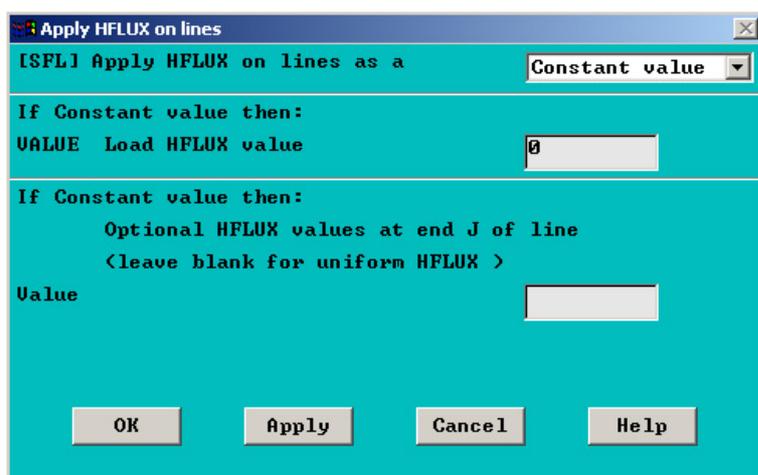
Imposición de la condición de contorno de simetría

Dado que vamos a fijar condiciones sobre líneas se recomienda elegir en el menú de utilidades la opción de pintar sólo líneas (**ANSYS/University High Utility Menu > plot > lines**)

Para imponer la condición de simetría (esto es, una condición de flujo nulo) sobre las aristas izquierdas se accederá a

Main Menu: Solution > -Loads-Apply > Heat Flux > On Lines

y se seleccionarán dichas aristas. En este caso, vamos a asignar el valor cero como se ve en la siguiente figura.

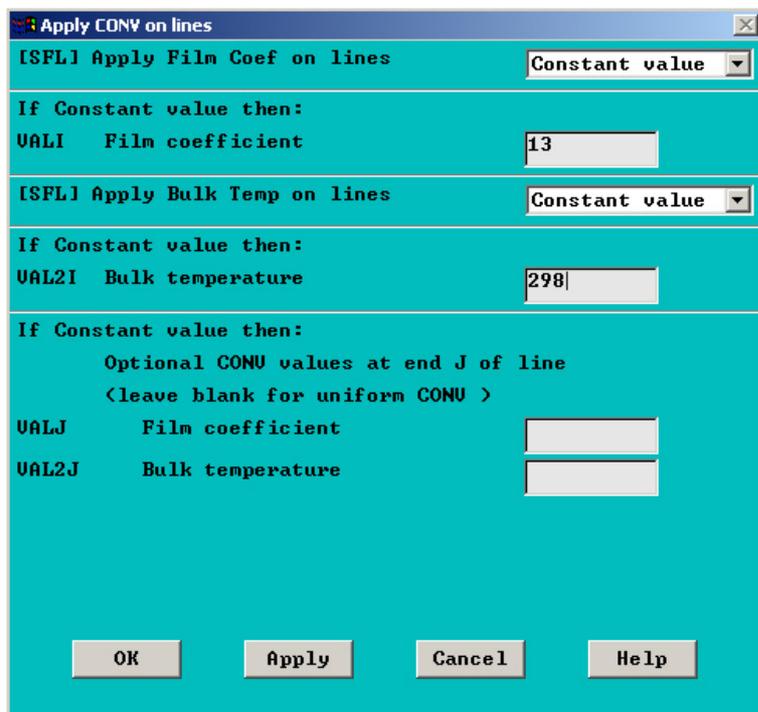


Imposición del flujo convectivo

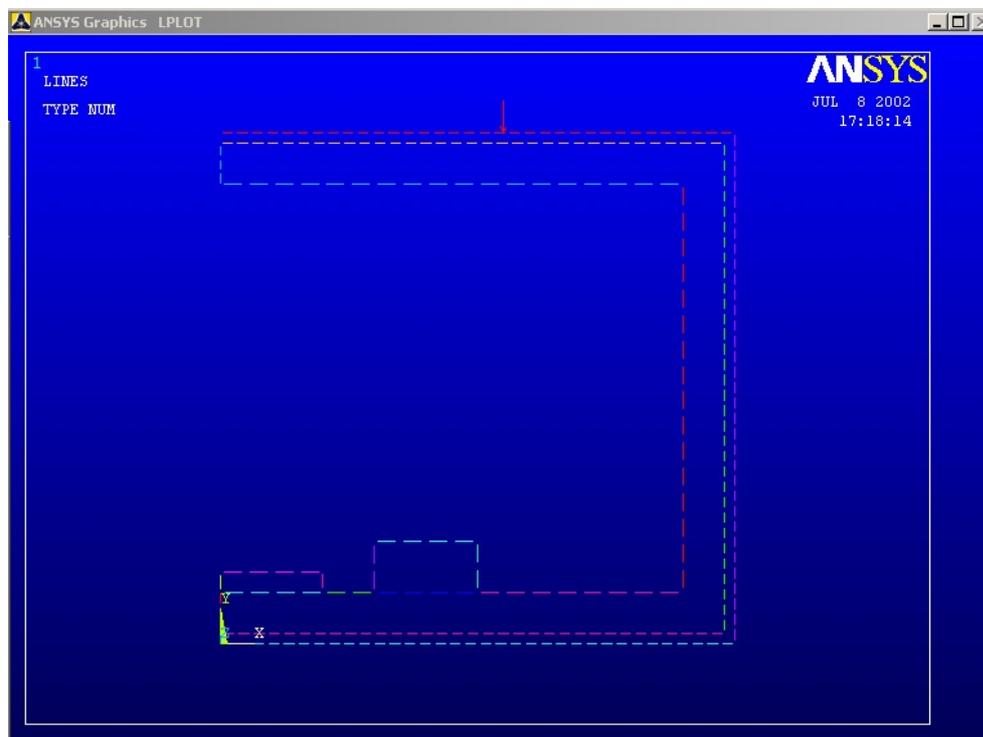
Para imponer la condición de transmisión de calor entre las superficies (aislante, refractario y piezas) y los gases de fuera y dentro del horno, debemos ir seleccionando las líneas con la misma condición después de elegir

Main Menu: Solution > -Loads-Apply > Convection > On Lines

e introducir los valores del coeficiente de convección y la temperatura del gas. Así, por ejemplo, para la pared superior externa se teclearían los valores que se muestran en la siguiente figura.



Una vez se ha introducido una condición, ANSYS la representa gráficamente en pantalla.



A continuación repetiríamos el proceso seleccionando la pared vertical exterior, la pared exterior inferior y, finalmente, las paredes interiores, fijando los valores correspondientes.

Por último, fijaremos la condición inicial usando

Main Menu: Solution > Loads-Applly > Initial Condit'n > Define

y fijando para la temperatura (**TEMP**) el valor de 298.

A continuación definiremos las opciones para los pasos de tiempo mediante el submenú

Main Menu: Solution > Load Step Opts .

Así, por ejemplo, se pueden elegir las variables que se quieren guardar, usando

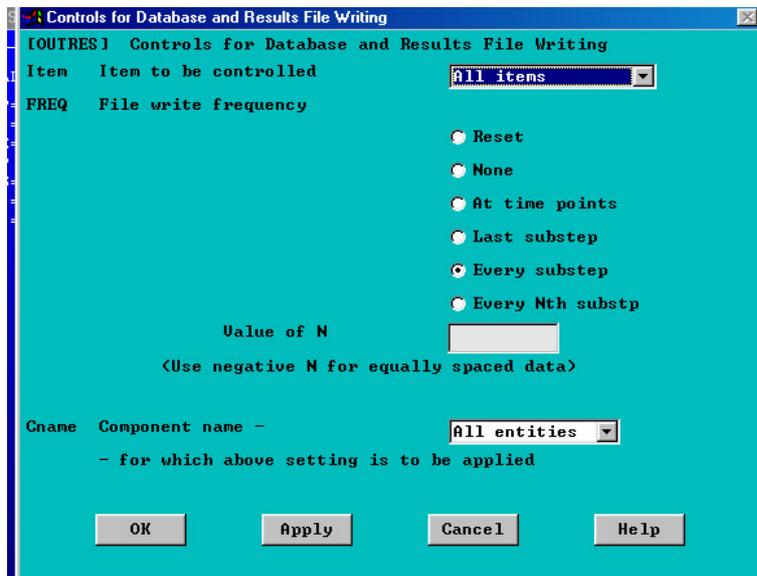
Main Menu: Solution > Load Step Opts > Output Ctrl's > Solu Printout ,

donde vamos a optar, en este caso, por las básicas.

También se debe elegir en qué pasos de tiempo se guardan los resultados utilizando

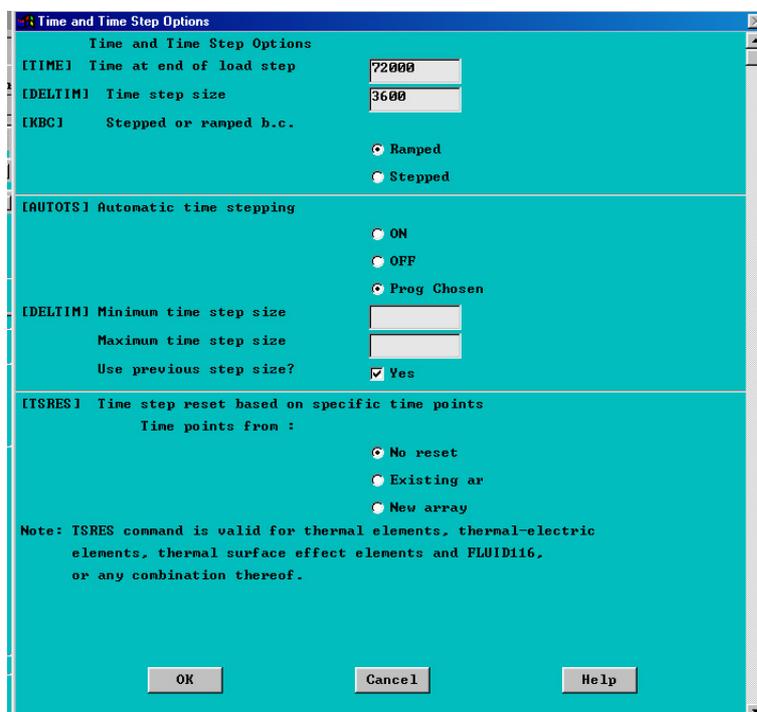
Main Menu: Solution > Load Step Opts > DB/Results File ,

donde, en este caso, vamos a elegir guardar todos los pasos.



Seleccionamos a continuación el tiempo final hasta el que deseamos llegar y el paso de tiempo (o el número de pasos sustituyendo Time - Time Step por Time and Substps). En nuestro caso introduciremos como tiempo final las 20 horas (72000 s) y como paso de tiempo cada hora (3600s), utilizando

Main Menu: Solution > Load Step Opts > Time Frecuenc > Time - Time Step .



Ahora, para resolver sobre la malla definida, empleando todas las opciones establecidas por

defecto (véase el capítulo anterior de estas notas para consultar las opciones de resolución), se seleccionará

Main Menu: Solution > -Solve -Current LS

y, tras consultar la información ofrecida en pantalla, se presionará **OK**. Una vez finalizada la resolución aparecerá en la pantalla el mensaje: **Solution is done!**

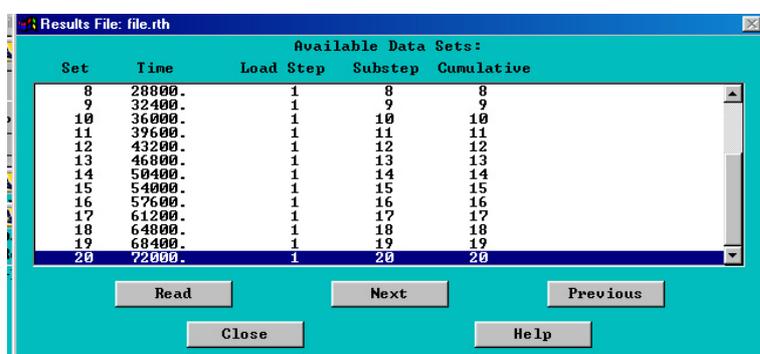
Postproceso: Representación de las variables de interés

Una vez finalizada la resolución del problema, se puede proceder a la etapa de postproceso. En primer lugar se pueden obtener representaciones gráficas de las variables de interés asociadas a la solución, como la temperatura en cada punto, el flujo de calor, etc.

Antes de obtener las representaciones es preciso indicar la solución que se desea representar, para ello se puede ver de qué resultados se dispone usando

Main Menu: General Postproc > Results Summary

que en nuestro caso serán los siguientes:

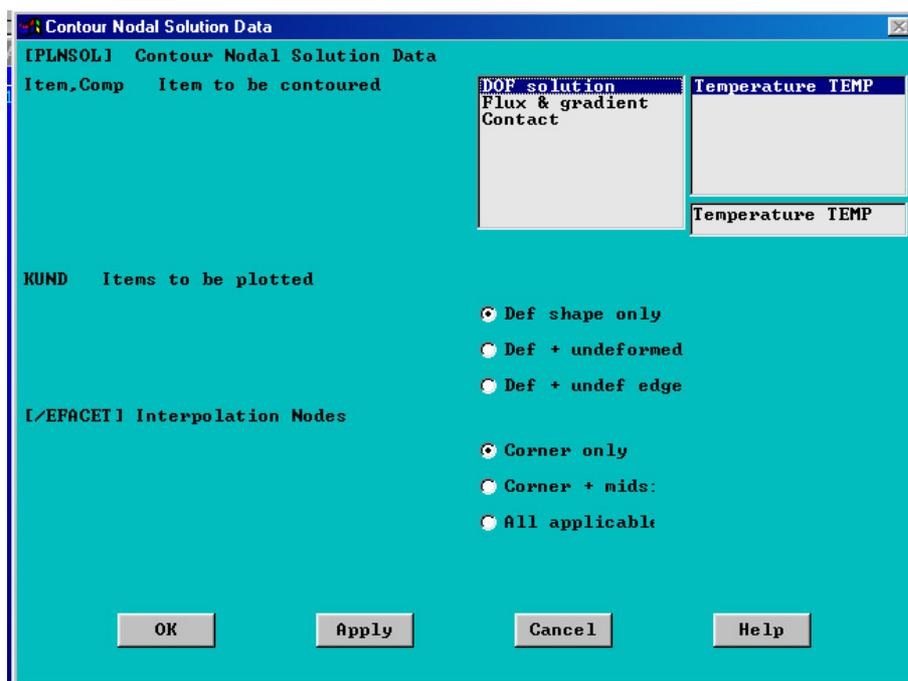


Set	Time	Load Step	Substep	Cumulative
8	28800.	1	8	8
9	32400.	1	9	9
10	36000.	1	10	10
11	39600.	1	11	11
12	43200.	1	12	12
13	46800.	1	13	13
14	50400.	1	14	14
15	54000.	1	15	15
16	57600.	1	16	16
17	61200.	1	17	17
18	64800.	1	18	18
19	68400.	1	19	19
20	72000.	1	20	20

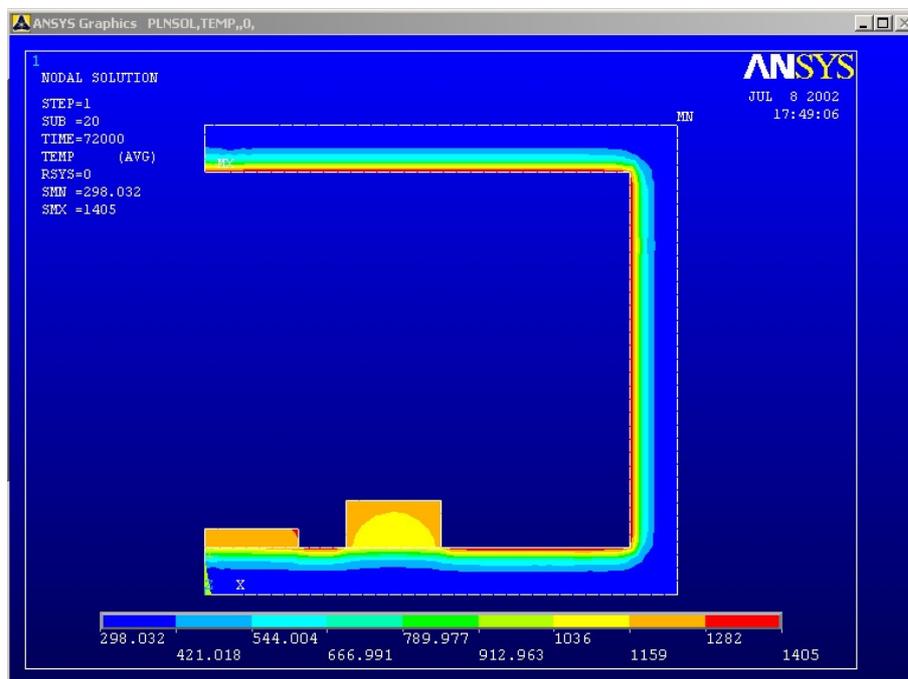
Una vez seleccionada la solución que se desea representar puede pasarse a la obtención de las gráficas que se deseen. Así, para obtener una representación de la distribución de la temperatura en cada punto en el último paso de tiempo, leeremos ese valor y usaremos

Main Menu: General Postproc > Plot Results > -Contour Plot -Nodal Solution

que llevará a una ventana donde se pueden elegir distintas opciones tal y como se muestra en la siguiente figura.



Una vez elegidas las opciones adecuadas, se nos presenta una ventana de resultados como la siguiente.



Si se desea ahora obtener una representación del flujo de calor a través de vectores se utilizará

Main Menu: General Postproc > Vector Plot > Predefined

seleccionando en la ventana **Flux TF**. Debe observarse que existe la posibilidad de representar también gráficas asociadas al flujo de calor por elementos mediante la opción

Main Menu: General Postproc > Plot Results > -Contour Plot -Element Solution .

Existe también la posibilidad de ver en animación la evolución de la temperatura con el tiempo, para ello se usa

Utility Menu: > PlotCtrls > animate .

Obtención de listados de las soluciones

Para obtener los valores numéricos de las soluciones calculadas se procederá a elegir

Utility Menu: List > Results

donde se tiene acceso a listados de soluciones tanto nodales como elementales, junto con otras opciones. Desde el menú **Utility Menu: List** se puede también obtener listados de cualquier otra variable generada durante la sesión.

5.2 Otras prácticas

Ejercicio 1

Visualizando los resultados obtenidos en el problema anterior en distintos pasos de tiempo, se pide estimar el tiempo necesario para que las piezas superen la temperatura de 1000°C.

Ejercicio 2

Empleando las ideas expuestas en la presente práctica se propone resolver el mismo problema modificando alguno de los parámetros:

1. cambiando la conductividad térmica del aislante por $0.05 \frac{W}{mK}$
2. sustituyendo la temperatura inicial por 400 °C
3. usando una malla más grosera
4. cambiando el paso de tiempo por 2 horas.

6. Práctica 4. ANSYS. Mecánica de Sólidos.

En esta sección se presenta una introducción al empleo del programa ANSYS en la resolución de problemas asociados a la mecánica de sólidos. El primer apartado se refiere a consideraciones generales acerca del empleo de ANSYS y el modo de incluir, en este programa, el modelo que se desea resolver. Un segundo apartado hace referencia al empleo de las estrategias de h-adaptación y p-adaptación disponibles en el programa ANSYS. El ejemplo desarrollado a continuación trata de mostrar el empleo de (algunos de) los diferentes tipos de elementos que aparecen habitualmente en el cálculo de estructuras. La sección termina con un ejercicio propuesto, relativo al modelado del comportamiento de una probeta compacta empleada en mecánica de la fractura.

6.1 Consideraciones generales

Aunque el programa ANSYS puede considerarse, en algunos aspectos, un programa de carácter general, se trata de un código especialmente desarrollado para el cálculo de estructuras. Este hecho se refleja en que de sus más de 150 tipos de elementos programados, cerca de un centenar corresponden a elementos de tipo estructural.

A continuación se exponen de forma breve algunos de los elementos habitualmente empleados en el cálculo de estructuras. En cualquier caso, para conocer los distintos elementos disponibles en ANSYS (al margen de los que el usuario puede, a su vez, programar dentro del código) y el modo de emplear éstos, se deberá acudir a la ayuda del programa en

Help: ANSYS 6.0 Online Doc. > ANSYS 6.0 Doc. > ANSYS Elem. Refer.

Bajo dicho epígrafe se encontrarán los apartados

About This Manual

General Element Features

Element Characteristics

Element Library

que describen con detalle los elementos programados en ANSYS.

Una característica que diferencia ANSYS de otros programas (como FEMLAB) es que parte de la definición del problema que se va a resolver aparece en la selección de los elementos y en las opciones elegidas para éstos. Así, por ejemplo, si se desea resolver un problema en deformaciones planas sobre un cierto dominio bidimensional deberá seleccionarse un elemento adecuado para resolver este tipo de problemas y especificarlo en las opciones de este elemento. Sobre este mismo dominio podría también resolverse un problema de deformaciones transversales de una placa, si se elige otro tipo de elementos con los que discretizar dicho dominio (y se fijan las cargas correspondientes). Igualmente se podría resolver un problema térmico mediante la elección de un tipo de elementos adecuado.

En resumen y de forma breve: si en códigos como FEMLAB se determina primero el tipo de problema a resolver, después se describe la geometría y finalmente se elige el tipo de elementos que se desea emplear, en el código ANSYS, por el contrario, primero se describe la geometría y después, a través de la elección de los elementos y la determinación de sus propiedades, se detalla el tipo de problema a resolver y los elementos con los que hacerlo. En cualquier caso, es posible *filtrar*, como se ha visto previamente, los elementos programados en ANSYS para retener solamente los elementos de uno (o varios) de los grupos siguientes:

- problemas de estructuras
- problemas térmicos
- problemas en dinámica de fluidos
- problemas en electromagnetismo.

Puede encontrarse una lista de los elementos disponibles en ANSYS para la resolución de problemas en mecánica de sólidos en el apartado

Help: ANSYS 6.0 Online Doc. > ANSYS 6.0 Doc. > Struct. Anal. Guide

de la ayuda, bajo el epígrafe

[...] > Overview of Struct. Analyses > Elements Used in Struct. Anal.

Estos elementos se agrupan en los siguientes tipos

- elementos barra (links)
- elementos viga (beams)
- elementos bidimensionales (2-D solids)

- elementos tridimensionales (3-D solids)
- elementos placa y lámina (shells)
- elementos de contacto (contact)
- otros elementos (coupled-field, specialities, explicit dynamics).

6.2 h-adaptación y p-adaptación en ANSYS

Como se ha descrito en el curso, existen dos estrategias de adaptación que permiten mejorar, de forma recursiva, la calidad de la aproximación y estimar el error cometido en la resolución aproximada de un problema continuo:

- h-adaptación (o refinamiento sucesivo de los mallados)
- p-adaptación (o aumento del orden de los elementos empleados).

El programa ANSYS incorpora estas dos estrategias para algunos de sus elementos.

En primer lugar, es posible emplear una estrategia de h-adaptación para algunos elementos bidimensionales, tridimensionales y lámina. Puede consultarse la lista de estos elementos y el modo de resolver un problema mediante h-adaptación en

Help: ANSYS 6.0 Online Doc. > ANSYS 6.0 Doc. > Advanced Anal. Tech.

de la ayuda, bajo el epígrafe **Adaptive Meshing**.

Asimismo, ANSYS dispone de elementos especiales que recogen una familia completa de elementos, con diferentes grados de sus polinomios, aptos para llevar a cabo una estrategia de p-adaptación. La descripción de estos elementos y el modo de resolver mediante p-adaptación puede encontrarse en

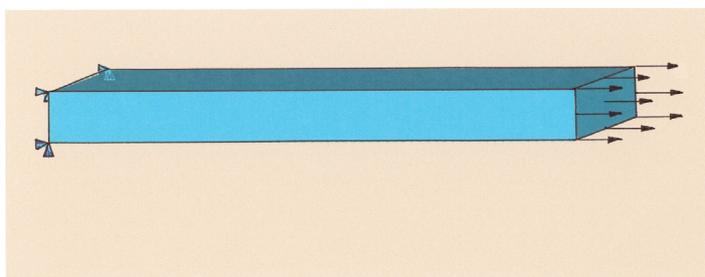
Help: ANSYS 6.0 Online Doc. > ANSYS 6.0 Doc. > Struct. Anal. Guide

bajo el título **p-Method Struct. Anal.**

6.3 Cálculo de un voladizo con diferentes hipótesis de carga

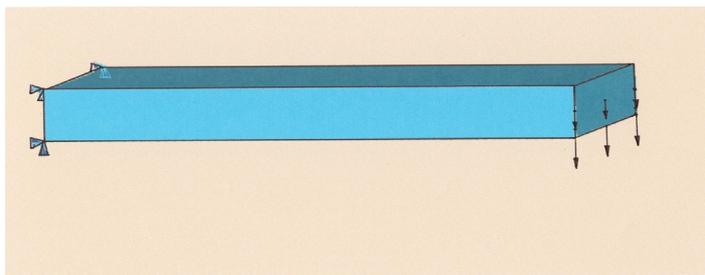
A continuación se desarrolla un ejemplo con el fin de ilustrar el empleo de algunos de los elementos disponibles en ANSYS. En particular se considera el cálculo de las deformaciones sufridas por un voladizo bajo tres hipótesis de cargas diferentes.

En un primer caso, el voladizo se somete a una tracción uniforme sobre la cara contraria al empotramiento, tal y como se muestra en la figura



Bajo esta hipótesis de carga, las deformaciones que sufre el sólido son exclusivamente axiales (salvo ciertos efectos locales ligados al empotramiento), por lo que estas deformaciones pueden encontrarse a partir del problema unidimensional asociado a las deformaciones axiales.

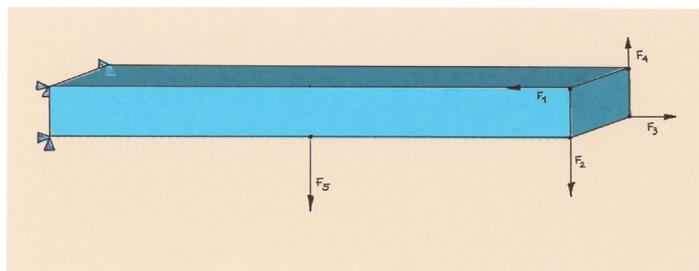
En la segunda hipótesis de carga, el voladizo es sometido en su extremo libre a un esfuerzo cortante que varía linealmente en la coordenada vertical desde un valor nulo en la parte superior



En este caso el voladizo sufre (fundamentalmente) deformaciones transversales. Estas deformaciones pueden calcularse mediante un modelo unidimensional a condición de hacer ciertas hipótesis sobre la variación transversal de los campos de desplazamientos. Así, por ejemplo, la teoría de vigas de Timoshenko supone que las deformaciones son tales que las secciones planas normales al eje de la viga permanecen planas tras la deformación, aunque no tiene por qué preservarse la ortogonalidad con el eje.

En el último caso se ha considerado una carga más compleja, representada por dos fuerzas

concentradas tal y como se muestra en la figura



Se tomarán los siguientes valores para las propiedades elásticas del material

$$E = 2.10 \times 10^5 \text{ MPa} \quad \nu = 0.28$$

en tanto que para las cargas correspondientes a cada hipótesis, se empleará

- primera hipótesis: fuerza, uniformemente repartida, de $10kN$
- segunda hipótesis: fuerza total de $10kN$ con la variación lineal descrita
- tercera hipótesis: cinco fuerzas concentradas con magnitudes

$$F_1 = 2kN \quad F_2 = 2kN \quad F_3 = 1.5kN \quad F_4 = 1kN \quad F_5 = 2.5kN$$

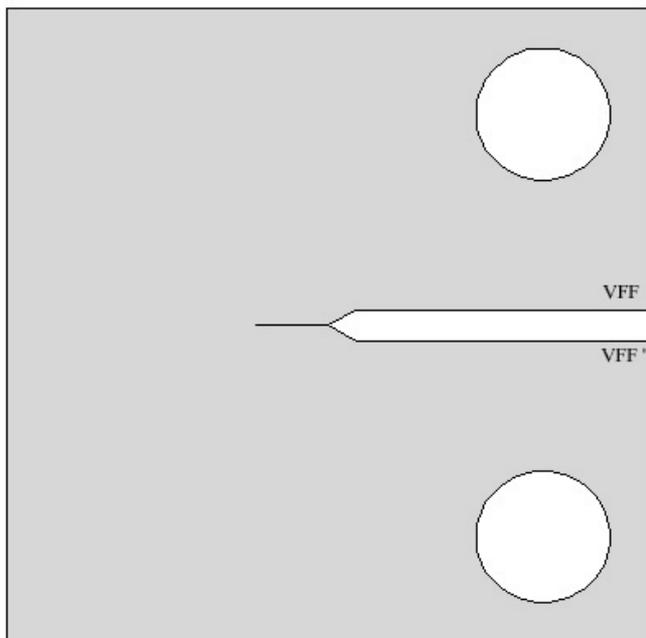
Las dimensiones del voladizo son $1cm \times 2cm \times 10cm$.

Se resolverá este problema mediante los siguientes modelos

- resolución del problema, para la primera hipótesis de carga, con elementos barra (elementos LINK1 de ANSYS, que consisten en elementos P_1 para la resolución del problema de deformaciones axiales de una barra)
- resolución del problema, para la segunda hipótesis de carga, con elementos viga (elementos BEAM3 de ANSYS, basados en la teoría de vigas de Timoshenko que emplean elementos P_1 para los desplazamientos axiales, desplazamientos transversales y giros de las secciones)
- resolución del problema, para la segunda hipótesis de carga, con elementos bidimensionales en deformaciones planas (elementos PLANE42 de ANSYS, o elementos Q_1 bidimensionales) a fin de verificar la validez de las hipótesis de la teoría de Timoshenko
- resolución del problema, para la tercera hipótesis de carga, con elementos tridimensionales (elementos SOLID45 de ANSYS, o elementos Q_1 tridimensionales)

6.4 Modelado de probetas de ensayos de mecánica de fractura

En la fase de calibrado de un ensayo de fractura se desea obtener la curva que relaciona la separación de dos puntos medida por el extensómetro durante los ensayos (VFF y VFF' en la figura) con la longitud de la fisura de la probeta. La siguiente figura muestra la sección de las probetas empleadas (cuyo espesor es de $50mm$).



A fin de obtener la curva buscada será preciso encontrar la configuración de equilibrio (ya que la variación de la carga durante los ensayos es suficientemente lenta) para la carga máxima durante el ciclo para cada longitud de fisura.

Obtégase, para una probeta (con la geometría descrita) de un acero con un módulo de Young de $2.10 \times 10^5 MPa$ y un coeficiente de Poisson de 0.3, la solución estacionaria para una carga de $225kN$ y una longitud de fisura (correspondiente a la longitud de prefisura en el ensayo) de $5mm$.

A continuación se mencionan algunas sugerencias para el cálculo

- es conveniente aprovechar la simetría de la pieza en el modelado del sólido, a fin de reducir el coste de cálculo
- el diseño de las probetas asegura que tanto la distribución de tensiones en el entorno de la fisura como el desplazamiento de los puntos VFF y VFF' es (relativamente) independiente del modo en que se aplica la carga de forma que, por sencillez, puede tomarse ésta como una carga concentrada en unos nodos apropiados

- es preciso asegurar que las condiciones de contorno impuestas impiden los desplazamientos rígidos de la pieza
- el espesor de la pieza permite reducir el cálculo de las deformaciones a un problema en deformaciones planas y evitar así la (costosa) resolución del problema tridimensional
- la solución del problema contiene, obviamente, una singularidad en la punta de avance de la fisura, lo que obliga a considerar mallados de elementos finitos adecuados para retener dicha singularidad (esto puede hacerse tanto *manualmente*, guiando el proceso de mallado mediante las opciones de éste, o de modo *automático* empleando el mallado adaptativo de ANSYS)
- en los problemas de mecánica de la fractura resulta interesante conocer ciertas variables asociadas a la soluciones (como los factores de intensificación de tensiones o el cálculo de algunas integrales); estas opciones de postproceso pueden consultarse en

Help: ANSYS 6.0 Online Doc. > ANSYS 6.0 Doc. > Struct. Anal. Guide

en el apartado **Fracture Mechanics**

7. Práctica 5. ANSYS. Problemas de vibración.

En esta sección se presenta una introducción al empleo del programa ANSYS en la resolución de problemas de vibración en mecánica de sólidos.

7.1 Consideraciones generales

Como se ha mencionado previamente, existen dos tipos fundamentales de problemas evolutivos asociados al cálculo de estructuras que son:

- análisis de transitorios, que requiere la integración temporal de las ecuaciones de evolución a partir de unas ciertas condiciones iniciales
- análisis modal, que permite un análisis simplificado de los problemas de evolución mediante la composición de un número limitado de modos propios de vibración

El segundo tipo de análisis requiere, desde luego, el cálculo previo de los modos propios de vibración. Estos modos de vibración tienen, además, un interés intrínseco relacionado con los fenómenos de resonancia.

Por otro lado, la frecuencia del primer modo de vibración determina el rango de validez del análisis cuasiestático de una estructura (que representa, de hecho, un tercer tipo de problemas evolutivos): cuando la frecuencia característica de las cargas es reducida en comparación con la frecuencia del primer modo de vibración, se puede suponer que la estructura se encuentra permanente en equilibrio con las cargas impuestas (aunque éstas varíen en el tiempo) y resolver una secuencia de problemas estacionarios.

El código ANSYS dispone de estos 3 modos de resolución de problemas en mecánica de sólidos bajo los títulos

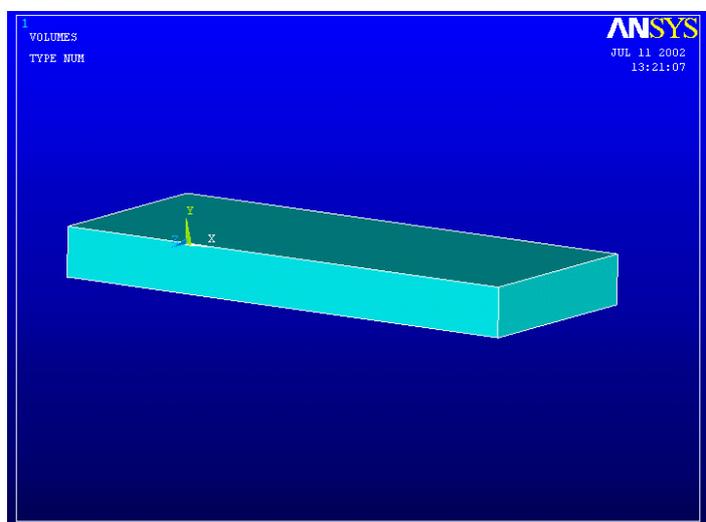
- **Static Analysis**, para el análisis estático o cuasiestático
- **Modal Analysis**, para la extracción de modos propios de vibración y la resolución de transitorios mediante la composición de un número limitado de modos
- **Transient Analysis**, para la integración en tiempo de las ecuaciones dinámicas

El programa dispone de algunos modos adicionales de análisis de estructuras

- **Harmonic Analysis**
- **Spectrum Analysis**
- **Eigen Buckling**
- **Substructuring**

7.2 Vibración de un voladizo

A continuación se describe el cálculo de los modos de vibración del voladizo de la figura



para un material con

$$E = 2.10 \times 10^5 \text{ MPa} \quad \nu = 0.28 \quad \rho = 7.5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$$

y con dimensiones $1\text{cm} \times 4\text{cm} \times 10\text{cm}$.

Los principales pasos en dicho análisis son:

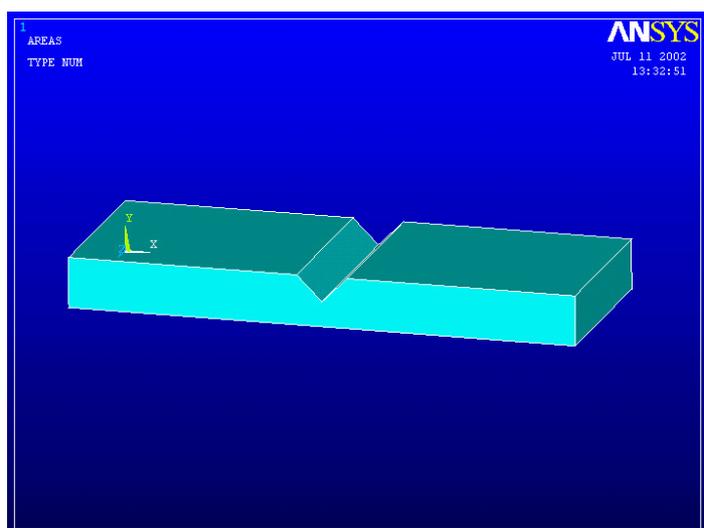
1. descripción de la geometría mediante un paralelepípedo (a través de la opción **-Volumes-Block** en ANSYS)
2. descripción de propiedades materiales (incluyendo la densidad en el modelo material **Structural > Density** de ANSYS)
3. descripción de los elementos que se emplearán en la resolución: pueden usarse, por ejemplo, elementos SOLID45 (Q_1), elementos SOLID92 (P_1) o elementos SOLID95 (Q_2 serendipity)
4. generación del mallado de la pieza

5. determinación de las condiciones de contorno: fijación de los desplazamientos en la cara empotrada del voladizo (ya sea a través de imposición de esta condición sobre el área correspondiente o directamente sobre los nodos)
6. selección del tipo de análisis (con **Modal Analysis** en el tipo de análisis y determinado el número de modos que se desean calcular en **Analysis Options...**)
7. obtención del listado de frecuencias de vibración y representación de los modos asociados

Obsérvese que se ha empleado la geometría tridimensional de la pieza y no se han utilizado ninguna de sus simetrías a fin de retener todos los posibles modos de vibración. El análisis modal de esta pieza mediante elementos barra, elementos viga o elementos bidimensionales serviría, en este caso, para seleccionar determinados modos de vibración de la pieza (por ejemplo, los modos axiales en el caso de los elementos barra).

La comparación de los resultados obtenidos para dos tipos de elementos distintos (por ejemplo, con elementos SOLID45 y SOLID95 sobre un mismo mallado) permite observar la mejora de los resultados con elementos de orden superior (a costa, lógicamente, de aumentar el tiempo de cálculo y la memoria requerida). Se puede observar que esta mejora es mayor en el caso de las frecuencias más elevadas (cuyos modos asociados corresponden a campos de desplazamientos más complejos).

A continuación se recalcularán los modos de vibración de este mismo voladizo cuando presenta una gran fisura transversal. Se empleará este ejemplo para describir el modo de generar mallados tridimensionales de piezas prismáticas a partir de mallados bidimensionales de su sección.



El análisis de los modos de vibración repite los pasos del ejemplo anterior, salvo en lo referente a la descripción de la geometría y la generación de la malla (junto con la selección de los elementos):

1. descripción de la geometría de la sección mediante puntos clave (a través de la opción **Keypoints > In Active CS**)
2. descripción de propiedades materiales (incluyendo la densidad en el modelo material **Structural > Density** de ANSYS)
3. descripción de los elementos (o más bien, la pareja de elementos) que se emplearán en la resolución: pueden usarse, por ejemplo, elementos PLANE82 (Q_2 serendipity bidimensionales) con elementos SOLID95 (Q_2 serendipity tridimensionales) o bien elementos PLANE42 (Q_1 bidimensionales) con elementos SOLID45 (Q_1 tridimensionales)
4. generación del mallado de la sección bidimensional
5. *extrusión* del mallado bidimensional de la sección a un mallado tridimensional
6. eliminación de los elementos bidimensionales empleados en el mallado de la sección
7. determinación de las condiciones de contorno: fijación de los desplazamientos en la cara empotrada del voladizo (ya sea a través de imposición de esta condición sobre el área correspondiente o directamente sobre los nodos)
8. selección del tipo de análisis (con **Modal Analysis** en el tipo de análisis y determinado el número de modos que se desean calcular en **Analysis Options...**)
9. obtención del listado de frecuencias de vibración y representación de los modos asociados

El paso 5 (*extrusión* del mallado bidimensional) se lleva a cabo a través de la opción

Main Menu: Preprocessor > -Modeling- Operate > Extrude

y requiere, a su vez, las siguientes operaciones:

- determinación del elemento bidimensional que se va a *extruir* y la longitud de los nuevos elementos (o el número de éstos) en la dirección de *extrusión* en

Main Menu: Preprocessor > -Modeling- Operate > Extrude > Element Ext Opts

fijando las opciones **Element Type Number** y **No. of Element Divisions**

- indicación de la dirección de *extrusión* y el espesor de la pieza tras ella, a través de

Main Menu: Preprocessor > -Modeling- Operate > Extrude > -Areas- By XYZ Offset

donde se indicaría, por ejemplo, $DX = 0$, $DY = 0$ y $DZ = 4$ si se desea *extruir* en la dirección del eje OZ (y en el sentido positivo) una distancia de 4 unidades de longitud.

A fin de observar el mallado tridimensional que se ha generado puede emplearse:

Utility Menu: PlotCtrls > Pan, Zoom, Rotate...

Por otro lado, el paso **6** (eliminación de los elementos bidimensionales) puede llevarse a cabo mediante la operación

Utility Menu: Select > Entities

eligiendo las opciones **Elements** y **By Attributes**, fijando después el número del tipo de elemento que se desea eliminar mediante **Element Type Num** (e indicando el número identificativo de los elementos) y seleccionado finalmente la opción **Unselect**

Para obtener, en el paso **9**, los listados de las frecuencias se puede acudir a

Main Menu: General PostProc > List Results > Results Summary

que sirve además para leer los datos de cada modo de vibración. Para obtener la representación de las deformaciones asociadas a un cierto modo de vibración (una vez seleccionado este mediante la operación anterior o mediante la opción **-Read Results-** en **Main Menu: General PostProc**, se podrá hacer mediante

Main Menu: General PostProc > Plot Results

o bien, si se desea una representación animada de los desplazamientos durante un cierto número de ciclos, con

Utility Menu: PlotCtrls > Animate > Mode Shape

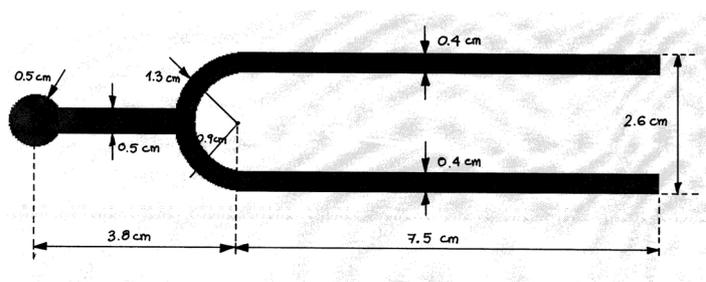
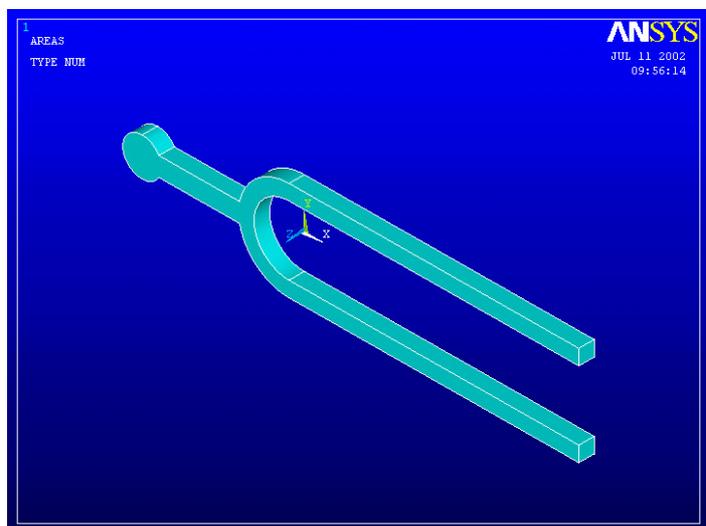
7.3 Vibración de un diapasón

Se propone ahora estudiar los modos de vibración de un diapasón, cuyo diseño debe procurar la aparición de un único modo dominante dentro del espectro audible.

Las gráficas siguientes muestran un posible diseño de éste cuyas propiedades se desean estudiar. Para ello, suponiendo que las propiedades del material son

$$E = 2.10 \times 10^5 \text{ MPa} \quad \nu = 0.28 \quad \rho = 7.5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$$

se deberán calcular los primeros modos de vibración de la pieza, cuando ésta es fijada en una parte de su puente.



La obtención de la malla puede emplear la operación de *extrusión* descrita en la sección anterior o bien generando previamente un sólido tridimensional y mallando directamente éste. A continuación se describen los principales pasos de la resolución empleando la primera estrategia

1. descripción de la geometría de la sección mediante círculos, rectángulos y dominios anulares
2. descripción de propiedades materiales
3. descripción de la pareja de elementos bidimensionales y tridimensionales que se empleará
4. generación del mallado de la sección bidimensional
5. *extrusión* del mallado bidimensional de la sección a un mallado tridimensional
6. eliminación de los elementos bidimensionales empleados en el mallado de la sección
7. determinación de las condiciones de contorno

8. selección del tipo de análisis
9. obtención del listado de frecuencias de vibración y representación de los modos asociados

En el paso **1**, aunque la geometría puede ser descrita de otros modos, se recomienda hacerlo del modo mencionado por sencillez. Para la descripción del dominio anular se empleará el comando

Main Menu: Preprocessor > -Modeling- Create > -Areas- Circle > Partial Annulus

donde es preciso fijar los ángulos (en grados) inicial y final que describen el sector anular.

Recuérdese que, tras la definición de las 5 áreas elementales, deberán combinarse éstas mediante

Main Menu: Preprocessor > -Modeling- Operate > -Booleans- Add > Areas