



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO

---

---

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
CUAUTITLAN

"INTRODUCCION AL ANALISIS ESTRUCTURAL MEDIANTE  
EL METODO DEL ELEMENTO FINITO (FEM) CON AYUDA DEL  
SOFTWARE ANSYS V. 5.5"

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

**INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA**

P R E S E N T A :

**LUIS ADRIAN LICONA ROJAS**

ASESOR: M. I. FELIPE DIAZ DEL CASTILLO RODRIGUEZ

CUAUTITLAN IZCALLI, EDO. DE MEX.

2006



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



*DEDICADO A*

*Mi padre eterno: Abba.*

*Mi hermano espiritual: Micael.*

*Mis padres: Natalia y José Luis.*

*Mis hermanas: Ana y Nallely.*

*Mi sobrina: Alison.*

*La familia: Licona Vergara y Rojas Flores.*

*GRACIAS:*

*La Universidad Nacional Autónoma de México.*

*La Facultad de Estudios Superiores – Cuautitlán.*

*Los profesores de Ingeniería Mecánica Eléctrica.*

*Mi jurado asignado para examen profesional.*

*Mi asesor, M.I. Felipe Díaz del Castillo Rodríguez.*

*Mis amigos y compañeros de la Generación 2000.*

*Luis Adrian Licona Rojas*



*NO VOLVERÉ A PER JOVEN*

*Que la vida iba en serio  
uno lo empieza a comprender más tarde  
-como todos los jóvenes, yo vine  
a llevarme la vida por delante.*

*Dejar huella quería a  
y marcharme entre aplausos  
-envejecer, morir, eran tan sólo  
las dimensiones del teatro.*

*Pero ha pasado el tiempo  
y la verdad desagradable asoma:  
envejecer, morir,  
es el único argumento de la obra.*

*Jaime Gil de Biedma*

*(1929-1990)*

## ÍNDICE

INTRODUCCIÓN .....	1
OBJETIVOS .....	2

### CAPÍTULO 1

#### CONCEPTOS FUNDAMENTALES DEL MÉTODO DEL ELEMENTO FINITO (FEM)

1.1. ASPECTOS HISTÓRICOS .....	3
1.2. ¿QUÉ ES EL MÉTODO DEL ELEMENTO FINITO? .....	4
1.3. PRINCIPIO DEL MÉTODO DEL ELEMENTO FINITO .....	4
1.3.1. ANÁLISIS DE BARRAS UNIAXIALES .....	6
1.3.2. ENSAMBLE DE ELEMENTOS BARRA .....	7
1.3.3. EJEMPLO .....	9
1.4. FUNDAMENTOS DE ELASTICIDAD LINEAL APLICADOS AL “FEM” .....	13
1.4.1. DESPLAZAMIENTOS Y DEFORMACIONES .....	13
1.4.2. ESFUERZOS .....	14
1.4.3. RELACIÓN ESFUERZO-DEFORMACIÓN .....	15
1.4.4. ESFUERZO DE VON MISES .....	17
1.5. NOCIÓN DE ELEMENTO FINITO .....	19
1.5.1. DISCRETIZACIÓN DE UN CUERPO .....	19
1.5.2. TIPOS DE ELEMENTOS .....	19

### CAPÍTULO 2

#### CONOCIENDO A ANSYS V. 5.5

2.1. ¿QUÉ ES ANSYS? .....	23
2.2. ACCESO AL PROGRAMA .....	24
2.3. INTERFASE DE ANSYS .....	24
2.4. VENTANA DE SALIDA (ANSYS 5.5 OUTPUT WINDOW) .....	26
2.5. BARRA DE MENÚ (UTILITY MENU) .....	27
2.6. VENTANA DE APORTE (ANSYS INPUT) .....	29
2.7. VENTANA BARRA DE HERRAMIENTAS (ANSYS TOOLBAR) .....	30

2.7.1. AGREGAR BOTONES .....	31
2.7.2. CREAR ABREVIATURAS .....	31
2.8. VENTANA DE GRÁFICOS (ANSYS GRAPHICS) .....	32
2.9. VENTANA MENÚ PRINCIPAL (ANSYS MAIN MENU) .....	32

### **CAPÍTULO 3**

#### **PASOS PARA EL ANÁLISIS DE ESFUERZOS**

3.1. MODELADO SÓLIDO .....	35
3.1.1. DEFINICIONES .....	35
3.1.2. MODELADO TOP-DOWN .....	36
3.1.2.1. FORMAS GEOMÉTRICAS PRIMITIVAS .....	37
3.1.2.2. PLANO DE TRABAJO (WP) .....	39
3.1.2.3. OPERACIONES BOLEANAS .....	41
3.1.3. MODELADO BOTTOM-UP .....	44
3.1.3.1. KEYPOINTS .....	45
3.1.3.2. SISTEMAS DE COORDENADAS .....	45
3.1.3.3. LÍNEAS .....	46
3.1.3.4. ÁREAS .....	47
3.1.3.5. VOLÚMENES .....	48
3.1.3.6. OPERACIONES BOLEANAS .....	48
3.2. MALLADO .....	52
3.2.1. MÚLTIPLES ATRIBUTOS DE ELEMENTO .....	52
3.2.2. DETERMINANDO LA DENSIDAD DE MALLADO .....	53
3.2.3. CAMBIANDO LA MALLA .....	56
3.2.4. MÉTODOS DE MALLADO .....	57
3.3. APLICAR CARGA .....	62
3.4. RESOLVER .....	66
3.5. REVISIÓN DE RESULTADOS .....	68
3.6. VERIFICANDO LA VALIDEZ DE SOLUCIÓN .....	70

**CAPÍTULO 4**  
**EJEMPLOS DE APLICACIÓN**

4.1. VIGA EN VOLADIZO .....	71
4.1.1. ESPECIFICACIÓN DEL PROBLEMA .....	71
4.1.2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA .....	71
4.1.3. PREPROCESO .....	72
4.1.4. SOLUCIÓN .....	87
4.1.5. POSTPROCESO .....	95
4.1.6. SALIR DE ANSYS .....	99
4.2. MÉNSULA .....	100
4.2.1. ESPECIFICACIÓN DEL PROBLEMA .....	100
4.2.2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA .....	100
4.2.3. PREPROCESO .....	101
4.2.4. SOLUCIÓN .....	142
4.2.5. POSTPROCESO .....	151
4.2.6. SALIR DE ANSYS .....	156
CONCLUSIONES .....	157
BIBLIOGRAFÍA .....	158

## INTRODUCCIÓN

El método del elemento finito (FEM, por sus siglas en inglés), elogiado por muchos ingenieros como lo mejor que puedo suceder desde las computadoras; es esencialmente una técnica que discretiza un problema físico o matemático dado, en piezas fundamentales más pequeñas llamadas elementos. El análisis de un elemento se puede conducir usando las herramientas matemáticas existentes. Finalmente, la solución al problema en su totalidad se obtiene con un procedimiento en el cual se ensamblan todas las soluciones individuales de los elementos. Sin embargo, los problemas complejos pueden ser abordados dividiendo el problema en problemas más pequeños y más simples. Las técnicas del elemento finito se están utilizando en muchos campos de la ingeniería y de la ciencia.

El método del elemento finito para analizar piezas estructurales ha estado utilizándose desde los años sesenta. El método, primero fue desarrollado para el uso en las industrias de energía atómica y aeroespacial. En estas industrias, la seguridad de las estructuras es crítica: implican la inversión de grandes capitales, por lo tanto, las consecuencias económicas de una falla son severas, así que el costo del análisis se justifica. El crecimiento en el uso de los métodos de elemento finito es directamente atribuible a los rápidos avances en la tecnología de computo en años recientes. Existe un gran número de compañías de software que desarrollan y venden programas de elemento finito y software asociado (CAD). Consecuentemente, existen paquetes de elemento finito comerciales capaces de solucionar los problemas más sofisticados, no solamente de análisis estructural o de esfuerzos, sino también para una amplia gama de fenómenos tales como distribuciones constantes y dinámicas de temperatura, flujo de fluidos y procesos de fabricación tales como forja, fundición e inyección de plástico.

El presente trabajo tiene como propósito principal brindar el conocimiento básico de la forma en que es posible utilizar uno de los programas usados para el análisis estructural por el método del elemento finito: ANSYS V. 5.5. De esta manera, el capítulo 1, contiene los conceptos fundamentales del método del elemento finito; el capítulo 2, contiene los principales componentes de ANSYS V. 5.5.; el capítulo 3, contiene los pasos para el análisis de esfuerzos; por último, el capítulo 4, contiene ejemplos de aplicación.



## **OBJETIVOS**

- ✓ Proporcionar los principios básicos de la técnica del método del elemento finito (FEM).
- ✓ Mostrar las características principales de los componentes del programa ANSYS V. 5.5.
- ✓ Brindar las herramientas indispensables para hacer uso del programa ANSYS V. 5.5.
- ✓ Demostrar con algunos ejemplos simples la aplicación del programa ANSYS V. 5.5.

## CAPÍTULO 1

### CONCEPTOS FUNDAMENTALES DEL MÉTODO DEL ELEMENTO FINITO (FEM)

El método del elemento finito ha llegado a ser una herramienta poderosa en la solución numérica de un amplio rango de problemas de ingeniería. Las aplicaciones van desde el análisis de esfuerzos y deformaciones de automóviles, aeronaves, edificios y estructuras de puentes; también para una amplia gama de fenómenos tales como distribuciones de temperatura, flujo de fluidos y procesos de fabricación. Con los avances en la tecnología de las computadoras y de los sistemas CAD, pueden modelarse problemas complejos con relativa facilidad. En una computadora pueden probarse varias configuraciones alternas antes de construir el primer prototipo. Todo esto sugiere que debemos modernizarnos empleando estos desarrollos para entender la teoría básica, las técnicas de modelado y los aspectos computacionales del FEM. En este método de análisis, una región compleja que define un continuo se discretiza en formas geométricas simples llamadas elementos finitos. Las propiedades del material y las relaciones gobernantes, son consideradas sobre esos elementos y expresadas en términos de valores desconocidos en los bordes del elemento. Un proceso de ensamble, cuando se consideran debidamente las cargas y restricciones, da lugar a un conjunto de ecuaciones. La solución de esas ecuaciones nos da el comportamiento aproximado del continuo.

#### 1.1. ASPECTOS HISTÓRICOS

Las ideas básicas del método del elemento finito se originaron gracias a los avances en el análisis estructural de las aeronaves. En 1941, Hrenikoff presentó una solución de problemas de la elasticidad usando el “método de trabajo del marco”. En un artículo publicado en 1943, Courant usó interpolación polinomial por partes sobre subregiones triangulares para modelar problemas de torsión. Turney y otros investigadores obtuvieron matrices de rigidez para armaduras, vigas y otros elementos y presentaron sus hallazgos en 1956. Clough fue el primero en acuñar y emplear el término *elemento finito* en 1960.

En los primeros años de la década de 1960, los ingenieros usaron el método para obtener soluciones aproximadas en problemas de análisis de esfuerzos, flujo de fluidos, transferencia de calor y otras áreas. Un libro de Argyris, publicado en 1955, sobre teoremas de energía y métodos matriciales, cimentó métodos adicionales en los estudios del elemento finito. El primer libro sobre elementos finitos por Zienkiewicz y Chung fue publicado en 1967. A finales de la década

de 1960 y principios de la siguiente, el análisis por elemento finito se aplicó a problemas no lineales, y de grandes deformaciones. El libro de Oden sobre continuos no lineales apareció en 1972.

Las bases matemáticas se fijaron en la década de 1970. Nuevo desarrollo de elementos, estudios de convergencia y otras áreas afines pertenecen a esta categoría.

Actualmente, los avances en computadoras mainframe (las supercomputadoras) y la disponibilidad de poderosas microcomputadoras han puesto este método al alcance de estudiantes e ingenieros que trabajan en industrias pequeñas.

## **1.2. ¿QUÉ ES EL MÉTODO DEL ELEMENTO FINITO?**

El método del elemento finito (FEM, por sus siglas en inglés), *es esencialmente una técnica que discretiza un problema físico o matemático dado, en piezas fundamentales más pequeñas llamadas elementos*. El análisis de un elemento se puede conducir usando las herramientas matemáticas existentes. Finalmente, la solución al problema en su totalidad se obtiene con un procedimiento en el cual se ensamblan todas las soluciones individuales de los elementos. Por lo tanto, *los problemas complejos pueden ser abordados dividiendo el problema en problemas más pequeños y más simples*, los cuales pueden ser solucionados empleando las herramientas matemáticas existentes. Las técnicas del elemento finito se han utilizado en muchos campos de la ingeniería y de la ciencia.

## **1.3. PRINCIPIO DEL MÉTODO DEL ELEMENTO FINITO**

Si se requiere analizar una estructura del tipo mostrado en la figura 1.1 (a), dicho análisis es una tarea sencilla debido a que la estructura está formada por miembros discretos. Las trayectorias de la transmisión de la fuerza a través de la viga son fácilmente identificables, y las fuerzas se pueden determinar usando las ecuaciones de equilibrio.

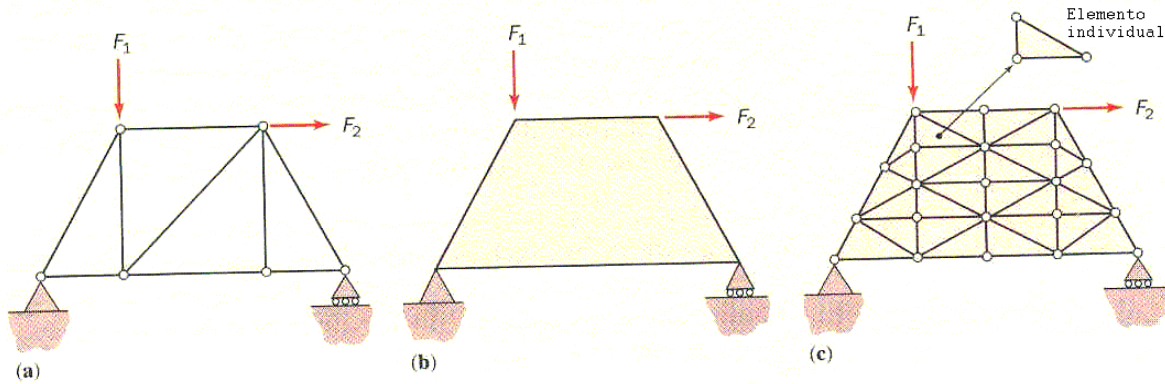


Figura 1.1 Armaduras.

Sin embargo, si se requiere analizar una placa, figura 1.1 (b), con la misma geometría que la estructura, la tarea de análisis no resulta tan sencilla. La razón es que la placa es un medio continuo elástico, y que las trayectorias de transmisión de la fuerza no es tan sencillo determinarlas. Por lo tanto, el problema no puede ser resuelto por un análisis estructural simple. Aunque, con el fin de realizar el análisis, se pudiera considerar que la placa es equivalente a la estructura; el análisis no dará resultados físicamente correctos debido a que no se toma en cuenta el efecto restrictivo de movimiento que presentan todos los puntos en un medio continuo.

Si se considera que el medio continuo está dividido en una gran cantidad de elementos triangulares, figura 1.1 (c), es posible determinar la distribución de esfuerzos en toda la placa mediante un análisis por separado de cada uno de los elementos. Para poder realizar dicho análisis es necesario: [a] determinar el equilibrio de cada uno de los elementos triangulares respecto a los elementos circundantes y [b] contar con ecuaciones para la geometría de deformación y de esfuerzo-deformación para elementos triangulares. Esta subdivisión de un medio continuo en elementos discretos es la base del método del elemento finito aplicado al análisis de esfuerzos.

Existen muchas clases de elementos utilizados en el método del elemento finito, entre ellos el elemento resorte (unidimensional), el elemento rectangular plano (bidimensional) y los elementos sólidos (tridimensionales), figura 1.2.

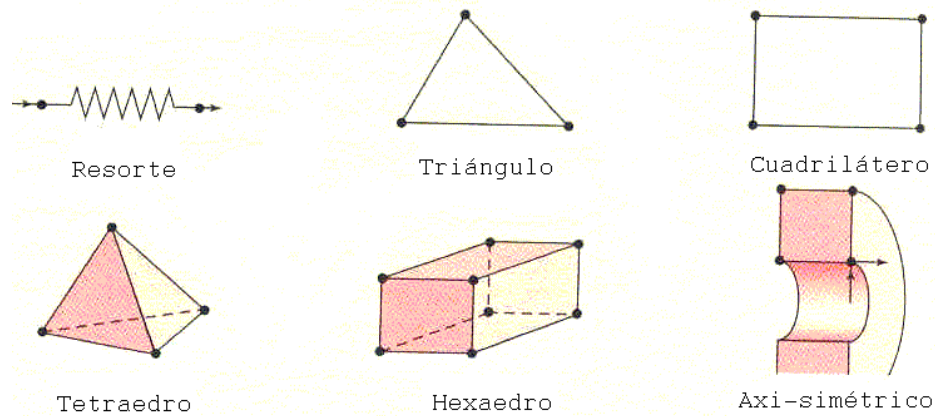


Figura 1.2 Elementos utilizados en el FEM.

La exactitud de la solución depende del número de las subdivisiones (elementos); a mayor cantidad de elementos, mayor es la exactitud. Sin embargo, aunque el análisis de cada elemento individual es muy sencillo, el análisis de una gran cantidad de elementos llega a ser extremadamente tardado y por lo tanto costoso.

### 1.3.1. ANÁLISIS DE BARRAS UNIAXIALES

Cuando una barra uniaxial (viga articulada) es parte de una estructura, sus extremos se pueden mover debido al desplazamiento de la estructura y a la deformación del miembro estructural. Esto se puede modelar por medio de un elemento resorte, bajo el rango elástico de la respuesta del material.

Los puntos de conexión del elemento con otros elementos de la estructura se conocen como *nodos* y son indicados por los puntos 1 y 2 en la figura 1.3.

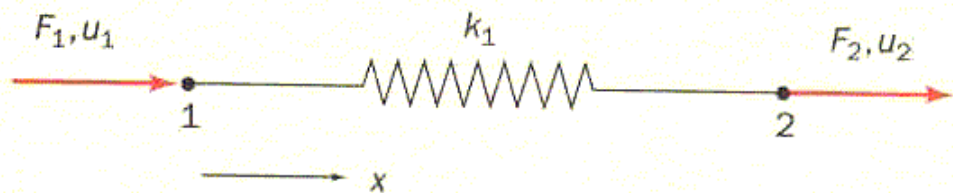


Figura 1.3 Elemento resorte.

$F$  es la fuerza y  $u$  es el desplazamiento, el sufijo indica el nodo al cual se aplican. Si utilizamos el elemento resorte para modelar una viga de longitud  $L$  y de área  $A$ , la rigidez del resorte  $K$  será:

$$K = \frac{AE}{L} \quad (1.1)$$

donde  $E$  es el módulo de elasticidad o de Young.

Para el sistema ilustrado en la figura (usando la convención de que las fuerzas y los desplazamientos son positivas en la dirección X), las fuerzas se relacionan con los desplazamientos de la siguiente forma:

$$F_1 = K_1(u_1 - u_2) = K_1u_1 - K_1u_2 \quad (1.2)$$

$$F_2 = K_1(u_2 - u_1) = -K_1u_1 + K_1u_2 \quad (1.3)$$

Las ecuaciones anteriores se pueden escribir en forma matricial:

$$\begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} K_1 & -K_1 \\ -K_1 & K_1 \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} \quad (1.4)$$

Lo cual se puede escribir de la siguiente forma:

$$\{F\} = (K^e)\{u\} \quad (1.5)$$

donde  $(K^e)$  se conoce como la *matriz de rigidez* para el elemento resorte. Una característica importante de la matriz de rigidez para un elemento es que es simétrica.

### 1.3.2. ENSAMBLE DE ELEMENTOS BARRA

Ahora considérese un sistema que consiste de dos elementos barra tal como lo muestra la figura 1.4.

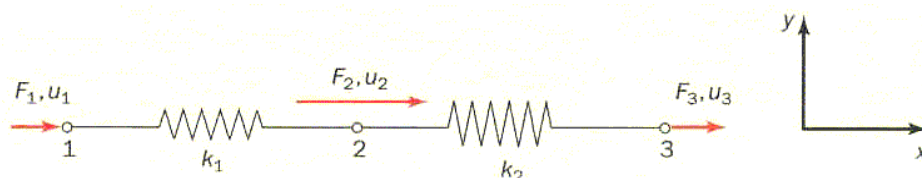


Figura 1.4 Dos elementos barra.

Usando la notación matricial, la ecuación de fuerza-desplazamiento para cada elemento se puede escribir como:

$$\begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} K_1 & -K_1 \\ -K_1 & K_1 \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} \quad (1.6)$$

$$\begin{Bmatrix} F_2 \\ F_3 \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} K_2 & -K_2 \\ -K_2 & K_2 \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} u_2 \\ u_3 \end{Bmatrix} \quad (1.7)$$

Y estas ecuaciones se pueden escribir como:

$$\begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} K_1 & -K_1 & 0 \\ -K_1 & K_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{Bmatrix} \quad (1.8)$$

$$\begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & K_2 & -K_2 \\ 0 & -K_2 & K_2 \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{Bmatrix} \quad (1.9)$$

Las fuerzas en todo el sistema son obtenidas mediante la sumatoria de fuerzas en cada nodo. Al sumar las matrices se obtiene:

$$\begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} K_1 & -K_1 & 0 \\ -K_1 & K_1 + K_2 & -K_2 \\ 0 & -K_2 & K_2 \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{Bmatrix} \Rightarrow \{F\} = (K)\{u\} \quad (1.10)$$

La influencia de cada término en la matriz estructural de rigidez se puede visualizar como sigue: “Todos los nodos de la estructura excepto el nodo  $i$  están restringidos de modo que todos los términos  $U_j$  ( $j \neq i$ ) sean igual a cero. Entonces, si  $U_j$  tiene el valor de una unidad, es decir,  $U_j = 1$ , la fuerza necesaria en el resto de nodos para llevar los desplazamientos en el nodo  $j$  es  $K_{ij}$ ”

Por lo tanto, en nuestro ejemplo, si  $u_1 = u_3 = 0$  y  $u_2 = 1$ , las fuerzas son:

$$\begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} K_{12} \\ K_{22} \\ K_{32} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -K_1 \\ K_1 + K_2 \\ -K_2 \end{Bmatrix} \quad (1.11)$$

Si los nodos  $i$  y  $j$  no están conectados por un elemento,  $K_{ij} = 0$ .

Este procedimiento de solución es la base del método de elemento finito.

### 1.3.3. EJEMPLO

Tres materiales disimilares se soldaron por fricción y se colocaron entre dos extremos rígidos. Si se aplican fuerzas de -50 kN y 100 kN como se indica en la figura 1.5, calcular el movimiento de las interfaces entre los materiales y las fuerzas ejercidas en los extremos.

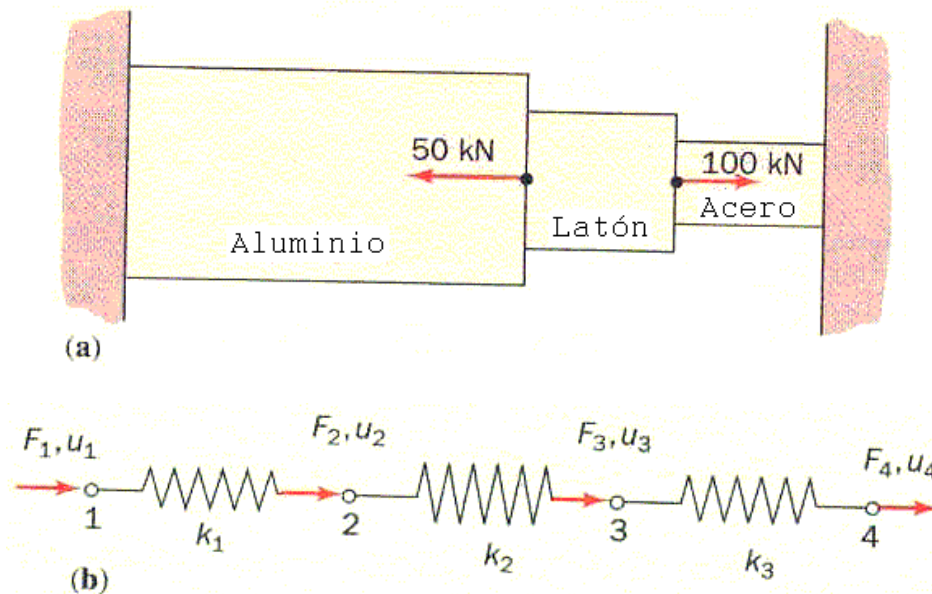


Figura 1.5 Materiales disimilares soldados por fricción.

Tabla 1.1 Propiedades de los materiales soldados por fricción.

Aluminio ( $K_1$ )	Latón ( $K_2$ )	Acero ( $K_3$ )
$A = 400 \text{ mm}^2$	$A = 200 \text{ mm}^2$	$A = 70 \text{ mm}^2$
$L = 280 \text{ mm}$	$L = 100 \text{ mm}$	$L = 100 \text{ mm}$
$E = 70 \text{ GN/m}^2$	$E = 100 \text{ GN/m}^2$	$E = 200 \text{ GN/m}^2$



Calculando la rigidez del resorte para cada material, se tiene:

$$K_1 = \frac{A_1 E_1}{L_1} = \frac{(400)(70 \times 10^3)}{280} = 100 \text{ kN/mm}$$

$$K_2 = \frac{A_2 E_2}{L_2} = \frac{(200)(100 \times 10^3)}{100} = 200 \text{ kN/mm}$$

$$K_3 = \frac{A_3 E_3}{L_3} = \frac{(70)(200 \times 10^3)}{100} = 140 \text{ kN/mm}$$

Las ecuaciones de fuerza-deformación (kN/mm) para cada elemento se pueden escribir como:

$$\begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} 100 & -100 \\ -100 & 100 \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix}$$

$$\begin{Bmatrix} F_2 \\ F_3 \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} 200 & -200 \\ -200 & 200 \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} u_2 \\ u_3 \end{Bmatrix}$$

$$\begin{Bmatrix} F_3 \\ F_4 \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} 140 & -140 \\ -140 & 140 \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} u_3 \\ u_4 \end{Bmatrix}$$

Expandiendo las matrices y sumando, se obtiene:

$$\begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ F_4 \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} 100 & -100 & 0 & 0 \\ -100 & (100 + 200) & -200 & 0 \\ 0 & -200 & (200 + 140) & -140 \\ 0 & 0 & -140 & 140 \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{Bmatrix}$$

O lo que es lo mismo:

$$\begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ F_4 \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} 100 & -100 & 0 & 0 \\ -100 & 300 & -200 & 0 \\ 0 & -200 & 340 & -140 \\ 0 & 0 & -140 & 140 \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{Bmatrix}$$

Y esto da como resultado las ecuaciones:

$$F_1 = 100u_1 - 100u_2 \quad (1)$$

$$F_2 = -100u_1 + 300u_2 - 200u_3 \quad (2)$$

$$F_3 = -200u_2 + 340u_3 - 140u_4 \quad (3)$$

$$F_4 = -140u_3 + 140u_4 \quad (4)$$

Recordando las condiciones de frontera:

$$u_1 = u_4 = 0, \text{ y que } F_2 = -50 \text{ kN}, F_3 = 100 \text{ kN}$$

Sustituyendo valores de las condiciones de frontera en las ecuaciones (2) y (3) obtenemos:

$$\begin{array}{ll} F_2 = -100u_1 + 300u_2 - 200u_3 & F_3 = -200u_2 + 340u_3 - 140u_4 \\ -50 = -100(0) + 300u_2 - 200u_3 & 100 = -200u_2 + 340u_3 - 140(0) \\ -50 = 0 + 300u_2 - 200u_3 & 100 = -200u_2 + 340u_3 - 0 \\ -50 = 300u_2 - 200u_3 & 100 = -200u_2 + 340u_3 \end{array}$$

Despejando  $u_2$  en ambas ecuaciones, se obtiene:

$$u_2 = \frac{-50 + 200u_3}{300} \quad (5) \quad u_2 = \frac{100 - 340u_3}{-200} \quad (6)$$

Igualando entre si los dos valores de  $u_2$ , tenemos:

$$\frac{-50 + 200u_3}{300} = \frac{100 - 340u_3}{-200}$$

Resolviendo la ecuación:

$$\begin{aligned}
-200(-50 + 200u_3) &= 300(100 - 340u_3) \\
10000 - 40000u_3 &= 30000 - 102000u_3 \\
-40000u_3 + 102000u_3 &= 30000 - 10000 \\
62000u_3 &= 20000 \\
u_3 &= \frac{20000}{62000} \\
u_3 &= 0.3225mm
\end{aligned}$$

Sustituyendo este valor de  $u_3$  en la ecuación (5), se tiene:

$$u_2 = \frac{-50 + 200u_3}{300} = \frac{-50 + 200(0.3225)}{300} = 0.0483mm$$

Obtenidos los valores de  $u_2$  y  $u_3$ , se sustituyen en las ecuaciones (1) y (4) para conocer las fuerzas en los extremos:

$$\begin{array}{ll}
F_1 = 100u_1 - 100u_2 & F_4 = -140u_3 + 140u_4 \\
F_1 = 100(0) - 100(0.0483) & F_4 = -140(0.3225) + 140(0) \\
F_1 = 0 - 4.83 & F_4 = -45.15 + 0 \\
F_1 = -4.83kN & F_4 = -45.15kN
\end{array}$$

Se debe observar que en cualquier análisis de elemento finito o de rigidez, se deben aplicar un *número suficiente de restricciones* para prevenir el movimiento del cuerpo rígido. De lo contrario el sistema no se puede solucionar. La razón física de esto, se debe a que si un extremo de la barra no se restringe, la estructura se moverá hacia delante y hacia atrás en el eje X (análisis unidimensional).

En un análisis unidimensional, una restricción es suficiente para prevenir el movimiento de cuerpo rígido. En un análisis de dos dimensiones, se requieren tres restricciones: dos para prevenir movimiento sobre en el eje X y Y, una para prevenir la rotación sobre el eje Z. En un análisis tridimensional, se requieren seis restricciones para prevenir el movimiento lineal y la rotación del cuerpo rígido sobre cada uno de los tres ejes de coordenadas.

La falta de restricciones en un cuerpo rígido es una causa muy común de errores en usuarios inexpertos de los paquetes comerciales del método del elemento finito (FEM).

#### 1.4. FUNDAMENTOS DE ELASTICIDAD LINEAL APLICADOS AL “FEM”

A continuación se presenta el procedimiento para determinar algunas ecuaciones que serán de utilidad en la aplicación del método del elemento finito.

##### 1.4.1. DESPLAZAMIENTOS Y DEFORMACIONES

Cuando los cuerpos deformables son sometidos a la acción de fuerzas externas al cuerpo, cada punto genera un desplazamiento  $s$ :

$$s = ui + vj + wk \quad (1.12)$$

que a su vez generan interacciones entre las partículas que forman al cuerpo.

La distribución de esas interacciones se pueden obtener si se conocen los desplazamientos de cualquier punto, mediante la definición de tres funciones continuas:

$$\begin{aligned} u &= u(x, y, z, t) \\ v &= v(x, y, z, t) \\ w &= w(x, y, z, t) \end{aligned} \quad (1.13)$$

donde  $x, y, z$  son las coordenadas espaciales y  $t$  la coordenada temporal en cada punto antes de aplicársele cargas al cuerpo deformable.

En función de los desplazamientos, se definen las deformaciones lineales como:

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \varepsilon_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y}, \quad \varepsilon_{zz} = \frac{\partial w}{\partial z} \quad (1.14)$$

y las deformaciones angulares como:

$$\begin{aligned}\gamma_{xy} &= \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \\ \gamma_{yz} &= \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \\ \gamma_{zx} &= \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}\end{aligned}\quad (1.15)$$

Las primeras, definen el cambio de longitud paralela a cada eje, en segmentos unitarios. Las deformaciones angulares miden el cambio angular entre segmentos ortogonales paralelos a dos ejes.

### 1.4.2. ESFUERZOS

Los esfuerzos asociados a las caras anteriores y posteriores de un cubo infinitesimal extraído de un continuo, se indican como:

Esfuerzos Normales:  $\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}$

Esfuerzos Cortantes:  $\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}, \tau_{yx}, \tau_{zy}, \tau_{xz}$

El primer subíndice corresponde a la cara en la que actúa el esfuerzo y el segundo a la dirección paralela en que lo hace dentro de aquella cara, ver figura 1.6.

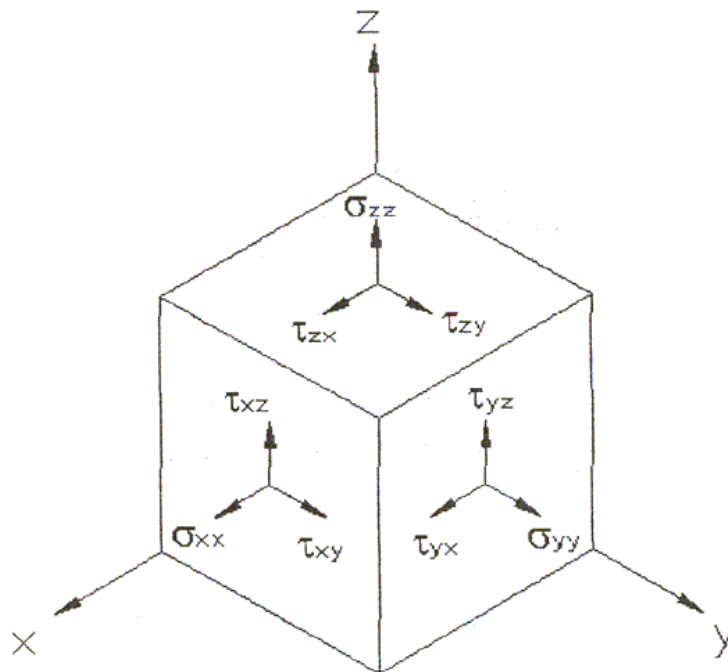


Figura 1.6 Componentes de esfuerzos referidas a coordenadas cartesianas.

Para mantener el equilibrio rotacional, los esfuerzos cortantes deben ser complementarios, esto es:

$$\tau_{xy} = \tau_{yx}, \tau_{yz} = \tau_{zy}, \tau_{zx} = \tau_{xz} \quad (1.16)$$

Aplicando las ecuaciones de equilibrio estático,  $\sum F_x = 0$ ,  $\sum F_y = 0$ ,  $\sum F_z = 0$ , se llega a las expresiones:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + f_x &= 0 \\ \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + f_y &= 0 \\ \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + f_z &= 0 \end{aligned} \quad (1.17)$$

donde  $f_x$ ,  $f_y$  y  $f_z$  son las componentes locales de las fuerzas del cuerpo asociadas a un marco general cartesiano de referencia.

### 1.4.3. RELACIÓN ESFUERZO-DEFORMACIÓN

Asumiendo condiciones mediante las cuales el material del cuerpo es elástico, isótropico y homogéneo, las deformaciones normales se relacionan con los esfuerzos mediante la Ley de Hooke como:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{xx} &= \frac{1}{E} (\sigma_{xx} - \nu(\sigma_{yy} + \sigma_{zz})) \\ \varepsilon_{yy} &= \frac{1}{E} (\sigma_{yy} - \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{zz})) \\ \varepsilon_{zz} &= \frac{1}{E} (\sigma_{zz} - \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy})) \end{aligned} \quad (1.18)$$

donde  $E$  es el módulo de elasticidad o de Young y  $\nu$  es el módulo o relación de Poisson.

Asimismo, las deformaciones angulares se relacionan con los esfuerzos cortantes de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}
\gamma_{xy} &= \frac{\tau_{xy}}{G} \\
\gamma_{yz} &= \frac{\tau_{yz}}{G} \\
\gamma_{zx} &= \frac{\tau_{zx}}{G}
\end{aligned}
\tag{1.19}$$

donde  $G$  es el modulo de elasticidad al corte y se puede calcular por medio de:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \tag{1.20}$$

Es conveniente escribir las seis componentes de la deformación en forma matricial, como sigue:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{bmatrix} = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} 1 & -\nu & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & 1 & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & -\nu & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{bmatrix} \tag{1.21}$$

Al invertir la matriz anterior se obtiene:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda + 2G & \lambda & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda + 2G & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda & \lambda + 2G & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{bmatrix} \tag{1.22}$$

en la cual  $\lambda$  es el coeficiente de Lamé, y está dado por:

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \quad (1.23)$$

Con las ecuaciones mostradas hasta este momento es posible obtener los desplazamientos, las deformaciones y finalmente los esfuerzos.

Salvo en casos especiales donde la geometría del problema no es simple, estas ecuaciones no pueden resolverse en forma analítica, por lo que se recurre a otros métodos de solución cuando se tienen geometrías complejas. Por un lado, tenemos métodos experimentales y, por otro, métodos numéricos de solución.

Los métodos experimentales se basan en mediciones directas sobre modelos de las piezas o sobre las mismas piezas en proceso de análisis, obteniéndose resultados gráficos, visuales o medidas directas de los desplazamientos en la pieza o en el modelo. Estos resultados se traducen en los valores reales de esfuerzo o de deformación. A diferencia de los métodos experimentales, los métodos numéricos resuelven en forma aproximada las ecuaciones diferenciales.

#### 1.4.4. ESFUERZO DE VON MISES

El esfuerzo de von Mises se usa como un criterio para determinar bajo que condiciones puede fallar un material dúctil. El criterio de falla establece que el esfuerzo de von Mises  $\sigma_{VM}$  debe ser menor que el esfuerzo de fluencia  $\sigma_f$  del material. En forma de desigualdad, el criterio puede escribirse como:

$$\sigma_{VM} \leq \sigma_f \quad (1.24)$$

El esfuerzo de von Mises  $\sigma_{VM}$  esta dado por:

$$\sigma_{VM} = \sqrt{I_1^2 - 3I_2} \quad (1.25)$$

donde  $I_1$  e  $I_2$  son las primeras dos invariantes del tensor de esfuerzo. Para el estado general de esfuerzo, expresado por la ecuación,



$$\sigma = [\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{yz}, \tau_{xz}, \tau_{xy}]^T \quad (1.26)$$

$I_1$  e  $I_2$  están dados por:

$$\begin{aligned} I_1 &= \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z \\ I_2 &= \sigma_x \sigma_y + \sigma_y \sigma_z + \sigma_z \sigma_x - \tau_{yz}^2 - \tau_{xz}^2 - \tau_{xy}^2 \end{aligned} \quad (1.27)$$

En términos de los esfuerzos principales  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  y  $\sigma_3$ , las dos invariantes pueden escribirse como:

$$\begin{aligned} I_1 &= \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \\ I_2 &= \sigma_1 \sigma_2 + \sigma_2 \sigma_3 + \sigma_3 \sigma_1 \end{aligned} \quad (1.28)$$

Es fácil verificar que el esfuerzo de von Mises dado en la ecuación (1.25) puede expresarse en la forma:

$$\sigma_{VM} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (1.29)$$

Para el estado de esfuerzo plano, tenemos:

$$\begin{aligned} I_1 &= \sigma_x + \sigma_y \\ I_2 &= \sigma_x \sigma_y - \tau_{xy}^2 \end{aligned} \quad (1.30)$$

y para la deformación unitaria plana:

$$\begin{aligned} I_1 &= \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z \\ I_2 &= \sigma_x \sigma_y + \sigma_y \sigma_z + \sigma_z \sigma_x - \tau_{xy}^2 \end{aligned} \quad (1.31)$$

donde  $\sigma_z = \nu(\sigma_x + \sigma_y)$ .

## **1.5. NOCIÓN DE ELEMENTO FINITO**

A continuación se presentan algunos lineamientos para la correcta aplicación del método del elemento finito.

### **1.5.1. DISCRETIZACIÓN DE UN CUERPO**

La discretización de un cuerpo en subregiones es el primero de una serie de pasos que deben realizarse cuando se resuelve un problema de ingeniería por el método del elemento finito. Este paso no tiene una base teórica establecida y depende del uso del criterio de la persona que este realizando la discretización. La aplicación de un juicio pobre o inadecuado producirá resultados erróneos en los siguientes pasos que están interrelacionados a el.

El discretizar un cuerpo comprende la decisión tanto del número, tamaño y forma de los elementos usados en el modelo del cuerpo. El objetivo general de tal discretización es la de dividir el cuerpo en elementos lo suficientemente pequeños para que funciones simples de desplazamiento puedan aproximar de manera adecuada la solución. Es necesario recordar que una gran cantidad de elementos ocasiona mayor tiempo de computo para su solución y por ende mayor costo.

### **1.5.2. TIPOS DE ELEMENTOS**

*Elementos unidimensionales.* Cuando la geometría, propiedades del material y variables dependientes tales como la temperatura, desplazamiento o esfuerzo pueden describirse en términos de una coordenada espacial; puede utilizarse un elemento unidimensional. El elemento unidimensional más simple tiene dos nodos, uno en cada extremo. Este elemento tiene una sección transversal constante y se muestra esquemáticamente como una línea, como se muestra en la figura 1.7 (a). Los elementos unidimensionales de mayor orden son los que tienen tres nodos (cúbico) y cuatro nodos (cuadrático) como se muestra en la figura 1.7 (b) y (c). Este tipo de elementos son comúnmente empleados en problemas estructurales y de transferencia.

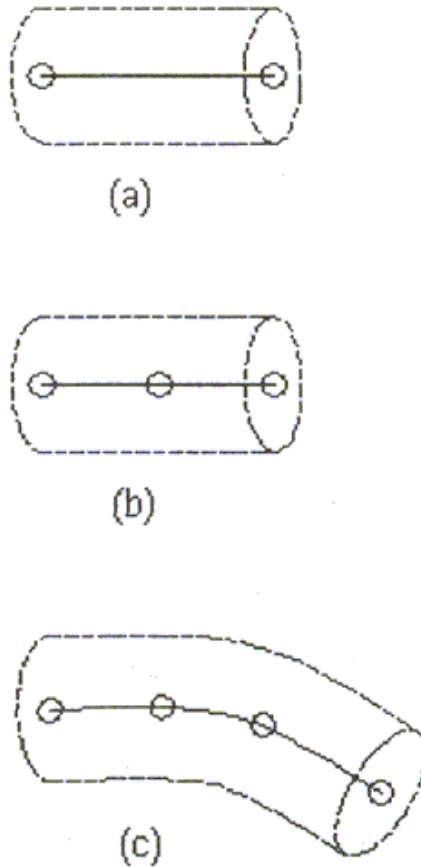
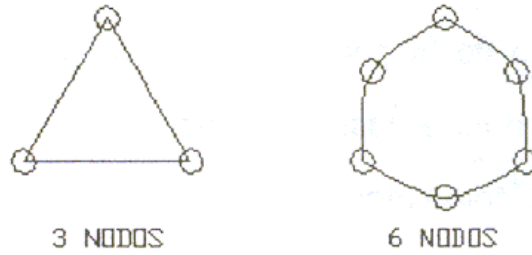
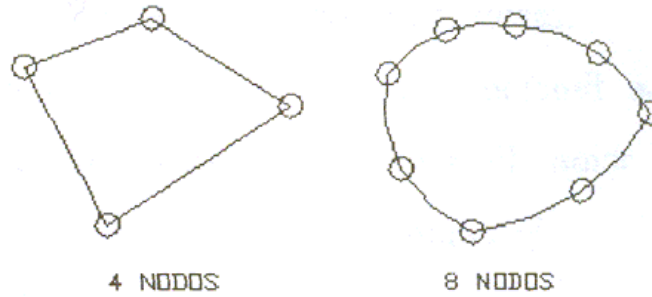


Figura 1.7 Elementos unidimensionales.

*Elementos bidimensionales.* Existen dos tipos de elementos usados para el modelado en el dominio bidimensional, el triángulo y el cuadrilátero de la figura 1.8 (a) y (b). En este caso, el elemento lineal en cada familia tiene lados rectos, pero los elementos de mayor orden, cuadráticos y cúbicos, pueden tener lados rectos, curvos o ambos. La capacidad de tener fronteras curvas es posible por la existencia de nodos intermedios en cada borde de los elementos. El elemento bidimensional se emplea en problemas de esfuerzo plano, deformación plana; por mencionar algunas aplicaciones.



(a) Triángulo



(b) Cuadrilátero

Figura 1.8 Elementos bidimensionales.

*Elementos tridimensionales.* Los elementos tridimensionales más comunes son variaciones de los elementos bidimensionales, tetraedros y hexaedros. Un tetraedro tiene cuatro nodos, mientras que un hexaedro general y un prisma rectangular tienen ocho nodos como se observa en la figura 1.9. En este caso, los elementos lineales están restringidos a superficies planas, mientras que los elementos de mayor orden pueden tener superficies curvadas en cada cara.

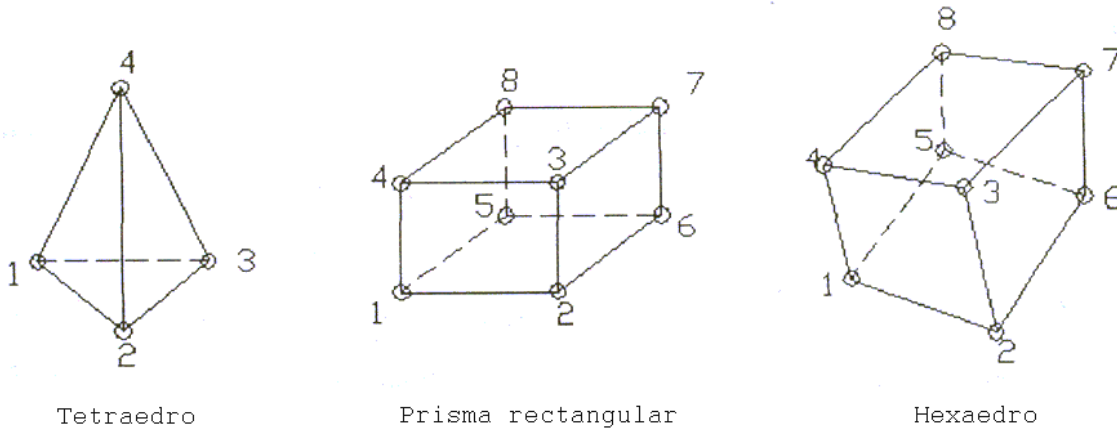


Figura 1.9 Elementos tridimensionales.

Algunos problemas tridimensionales pueden aproximarse por dos coordenadas independientes. Tales problemas pueden resolverse utilizando un elemento axisimétrico como se muestra en la figura 1.10. Los problemas que poseen simetría axial como pistones, recipientes a presión, discos giratorios, caen dentro de esta categoría. Es conveniente expresar estos problemas en términos de un sistema coordenado cilíndrico, ya que por la simetría, las componentes de esfuerzo son independientes de la dirección tangencial ( $\theta$ ).

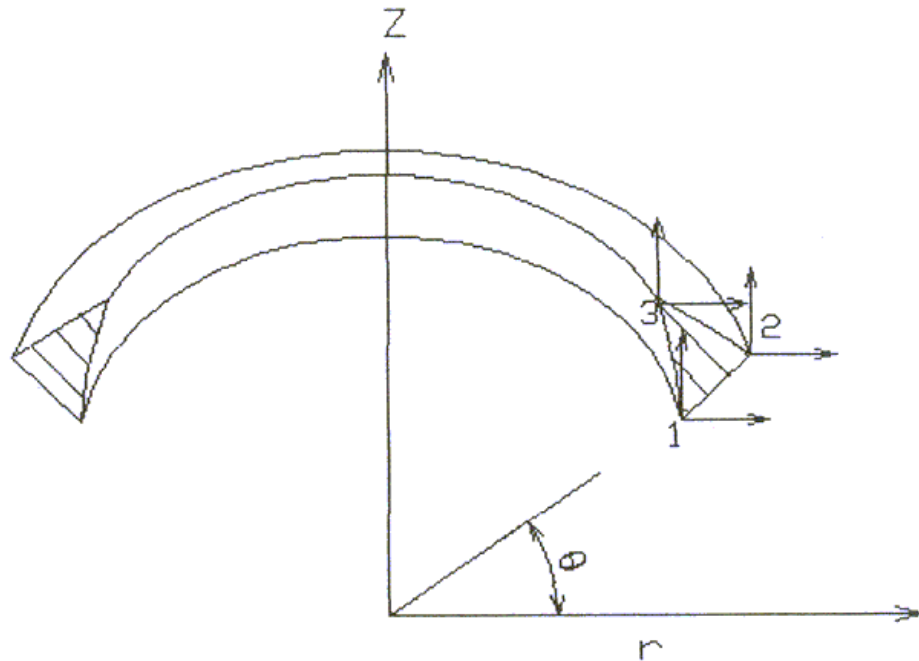


Figura 1.10 Elemento axisimétrico.

## CAPÍTULO 2

### CONOCIENDO A ANSYS V. 5.5

Es importante conocer lo que es capaz de hacer un programa de computadora (software), pero también es de gran importancia conocer la forma en que se puede hacer uso del mismo, así como también de todas y cada una de las aplicaciones que tiene integradas para la realización de documentos, presentaciones o en este caso análisis de diseños.

Este capítulo tiene como propósito principal dar a conocer la forma en que se puede hacer uso del software “*ANSYS V. 5.5*”, así como también algunos de los componentes que lo integran.

#### 2.1. ¿QUÉ ES ANSYS?

ANSYS es un software de análisis mediante elemento finito que le permite a los ingenieros realizar las siguientes tareas:

- ✓ Construir modelos computarizados o transferir archivos CAD de estructuras, productos, componentes o sistemas.
- ✓ Aplicar operaciones de cargas u otras condiciones al diseño.
- ✓ Estudiar respuestas físicas, como los niveles de esfuerzo, las distribuciones de temperatura o los campos electromagnéticos.
- ✓ Optimizar un diseño en desarrollo para reducir costos de producción.
- ✓ Hacer prototipos experimentando en ambientes donde de otra manera sería indeseable o imposible, por ejemplo, las aplicaciones biomédicas.

El programa ANSYS tiene una interfase gráfica de fácil acceso para el usuario; esto le permite a los usuarios un acceso interactivo a las funciones del programa, comandos, documentos y material de referencia. Un sistema intuitivo del menú ayuda a los usuarios a navegar directamente el programa ANSYS. Los usuarios pueden introducir en la computadora datos usando el ratón, el teclado o una combinación de ambos.




## 2.2. ACCESO AL PROGRAMA

A continuación, se hará mención de algunas de las formas posibles de ingresar al programa ANSYS:

- a) Siguiendo la trayectoria que se muestra en la figura 2.1 y haciendo clic en



Figura 2.1 Trayectoria que hay que seguir para iniciar el programa ANSYS desde el botón Inicio.

- b) Utilizando la opción  del menú , escribiendo en el cuadro de diálogo `C:\ansys55\BIN\Intel\ansysir.exe` y haciendo clic en ; como se muestra en la figura 2.2.

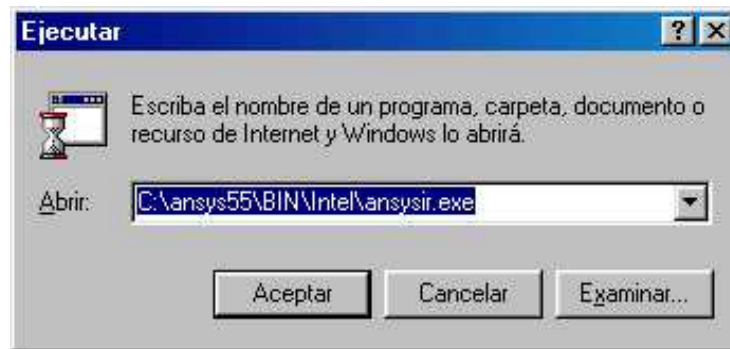


Figura 2.2 Acceso a ANSYS por medio de la opción Ejecutar.

## 2.3. INTERFASE DE ANSYS

La interfase del programa ANSYS es la forma en que el programa interactúa con el usuario para el análisis de diversos diseños. El conocimiento preciso de esta interfase ayudará al usuario a minimizar el tiempo en el desarrollo de la solución a un problema de diseño.

En la figura 2.3, se presentan todos los componentes de la pantalla del programa ANSYS.

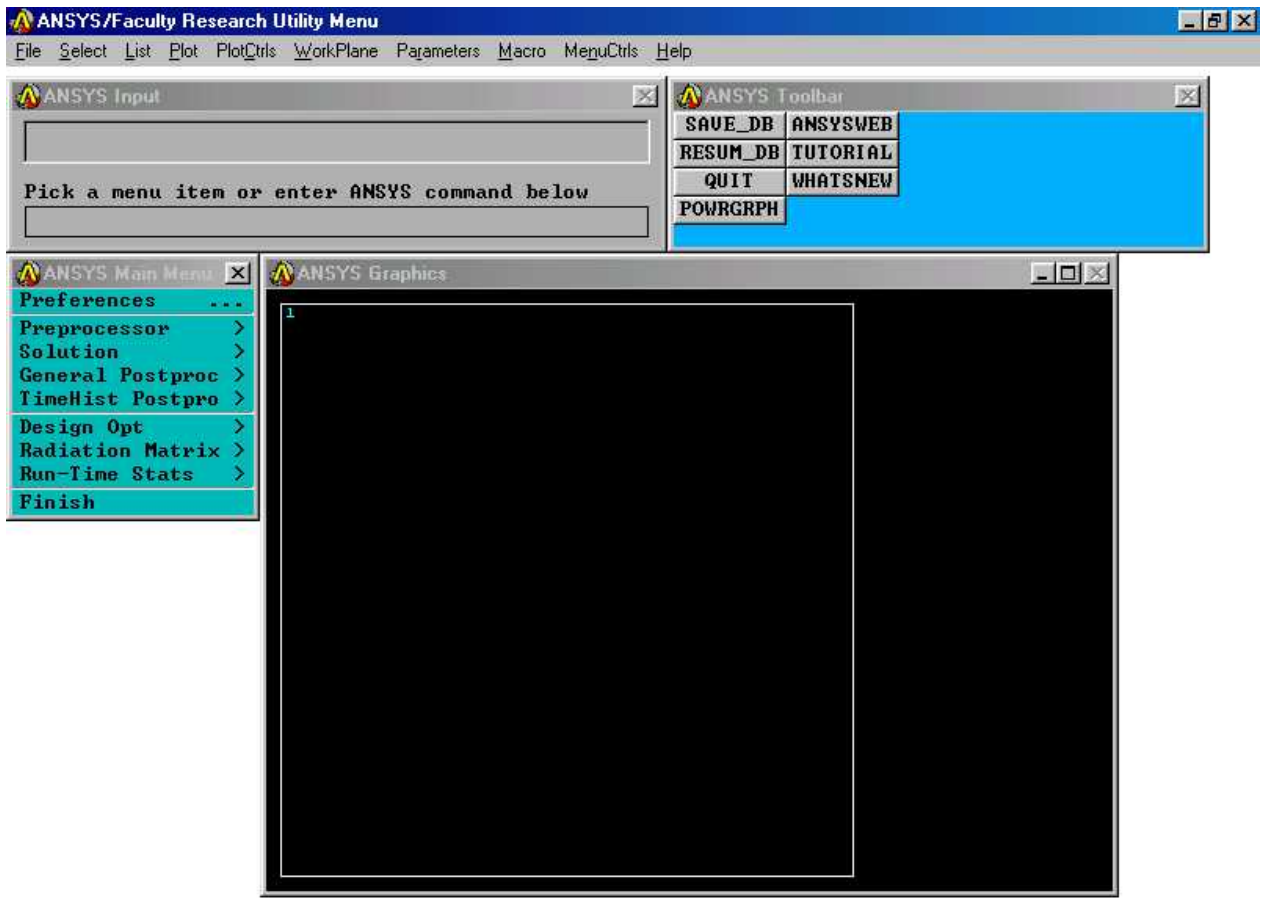


Figura 2.3 Ventana general de ANSYS.

La Interfaz Gráfica de Usuario (*GUI, por sus siglas en inglés*) tiene seis ventanas principales, las cuales son:

- ✓ **Utility Menu** - Contiene funciones de utilidad que están disponibles a todo lo largo de la sesión ANSYS, como control de archivos, selección de los controles de gráficos y parámetros. También egresa el programa ANSYS a través de este menú.
- ✓ **Input** - Muestra los mensajes instantáneos del programa y permite introducir ordenes directamente por medio del teclado. Todas las ordenes previamente introducidas son almacenadas para un fácil acceso y referencia.
- ✓ **Toolbar** - Contiene interruptores de botón (iconos) que ejecutan comúnmente las ordenes y funciones de ANSYS. Es posible agregar interruptores de botón por medio de abreviaciones.

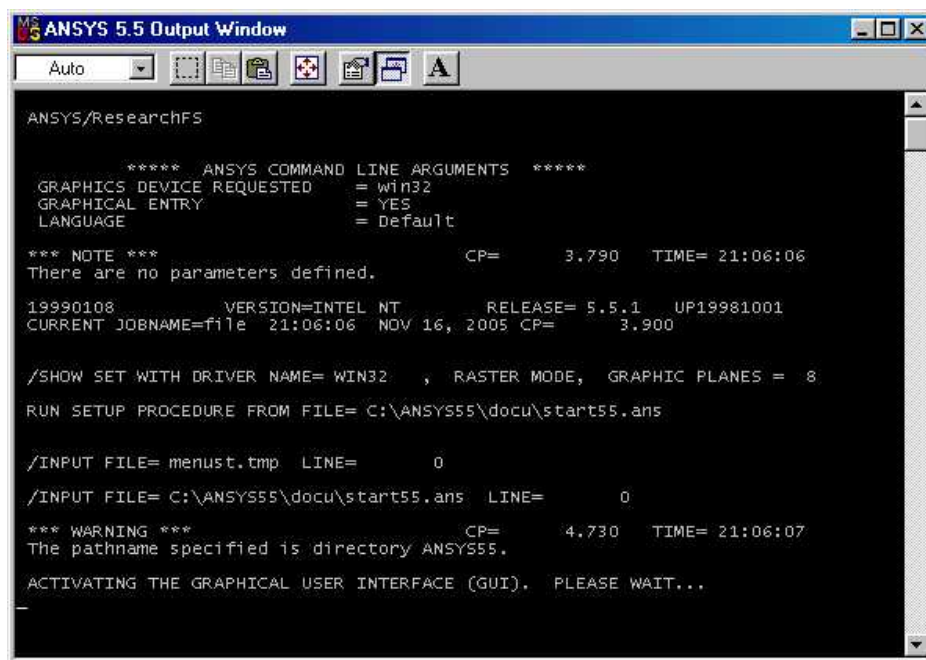


- ✓ **Main Menu** - Muestra las funciones primarias de ANSYS, organizadas por procesadores (*Preferences, Preprocessor, Design Opt, Finish, etc.*).
- ✓ **Graphics** - Es una ventana donde los despliegues de gráficos son trazados.
- ✓ **Output Window** - Recibe salida en texto del programa. Usualmente es situada detrás de otras ventanas, pero se puede traer para el frente cuándo sea necesario.

Es posible reacomodar las seis ventanas principales de la interfaz gráfica del usuario moviéndolas o dimensionándolas como se desee. También es posible cerrar una o más de las seis ventanas (*excepto Output Window*) usando los botones de apoyo **Utility Menu > MenuCtrls**.

## 2.4. VENTANA DE SALIDA (ANSYS 5.5 OUTPUT WINDOW)

Cabe mencionar que cada vez que se inicie el programa ANSYS, simultáneamente se ejecutará una ventana en ambiente MS-DOS, como se ilustra en la figura 2.4. Dicha ventana recibe toda salida en texto de las respuestas de orden del programa, notas, advertencias, errores y algunos otros mensajes. Es usualmente situada detrás de otras ventanas ANSYS, pero es posible traerla para el frente cuando sea necesario.



```

ANSYS/ResearchFS

***** ANSYS COMMAND LINE ARGUMENTS *****
GRAPHICS_DEVICE_REQUESTED = win32
GRAPHICAL_ENTRY           = YES
LANGUAGE                  = Default

*** NOTE ***                               CP=      3.790   TIME= 21:06:06
There are no parameters defined.

19990108      VERSION=INTEL NT      RELEASE= 5.5.1   UP19981001
CURRENT JOBNAME=file 21:06:06 NOV 16, 2005 CP=      3.900

/SHOW SET WITH DRIVER NAME= WIN32 , RASTER MODE, GRAPHIC PLANES = 8
RUN SETUP PROCEDURE FROM FILE= C:\ANSYS55\docu\start55.ans

/INPUT FILE= menust.tmp LINE=      0
/INPUT FILE= C:\ANSYS55\docu\start55.ans LINE=      0

*** WARNING ***                               CP=      4.730   TIME= 21:06:07
The pathname specified is directory ANSYS55.

ACTIVATING THE GRAPHICAL USER INTERFACE (GUI). PLEASE WAIT...

```

Figura 2.4 Ventana ANSYS 5.5 Output Window.

## 2.5. BARRA DE MENÚ (UTILITY MENU)

La barra de menú es una de las herramientas más importantes de cualquier programa, desde ella se puede tener control de cualquier tipo de operación. En la figura 2.5 se muestra la barra de menú de ANSYS.



Figura 2.5 Barra ANSYS Utility Menu.

La barra de menú (*Utility Menu*) contiene funciones de selección de archivo, gráficos y parámetros. Se pueden ejecutar la mayor parte de estas funciones en cualquier momento durante la sesión ANSYS.

Cada apartado en dicha barra despliega un menú con subtemas, que a su vez despliega en cascada a un submenú (*indicado por >*) o realiza una acción. La acción puede ser cualquiera de las siguientes:

- ✓ Inmediatamente ejecutar una función.
- ✓ Mostrar una ventana de diálogo (indicado por ...).
- ✓ Mostrar un menú de selección (indicado por +).

La figura 2.6 muestra la lista desplegable de subtemas que aparecen cuando se elige el apartado **List > Status > Graphics > General**.

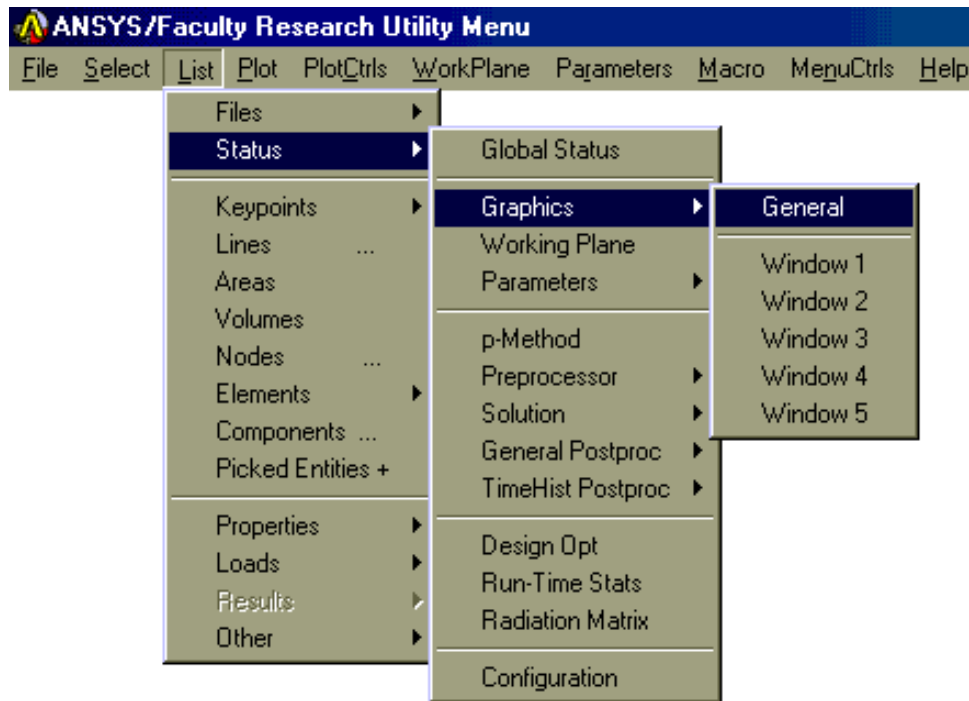


Figura 2.6 Lista desplegable de subtemas del apartado List.

A continuación, se proporciona una breve introducción de las operaciones que se pueden realizar en cada uno de los diez menús de esta barra:

- a) *Archivo (File)*.- Mediante este menú es posible comenzar un nuevo diseño y/o análisis, cambiar títulos, guardar diseños y/o análisis (diversas extensiones), importar y exportar diseños y/o análisis y salir del programa.
- b) *Seleccionar (Select)*.- Con este menú se puede seleccionar entidades (áreas, volúmenes, líneas, keypoints), ensamblar elementos así como también crear-editar-borrar componentes.
- c) *Lista (List)*.- Permite listar virtualmente cualquier artículo almacenado en la base de datos ANSYS. También puede obtener información de estado acerca de las diferentes áreas del programa y puede listar el contenido de archivos residiendo en el sistema.
- d) *Plano (Plot)*.- Con los comandos de este menú se pueden marcar y/o trazar entidades (áreas, volúmenes, líneas, keypoints), elegir materiales, obtener y/o agregar tablas de datos y corregir parámetros.

- e) *Control de Plano (PlotCtrls)*.- Incluye funciones que controlan las vistas, estilos y otras características de despliegues de gráficos. La función *Hard Copy* le permite obtener copias de la pantalla entera o simplemente la ventana de gráficos (ANSYS Graphics).
- f) *Plano de Trabajo (WorkPlane)*.- Con este menú es posible mover, girar, y de otra manera manipular el plano de trabajo. También se puede crear, suprimir y cambiar sistemas de coordenadas usando este menú.
- g) *Parámetros (Parameters)*.- Con los comandos contenidos en este menú se puede elegir entre parámetros escalares o vectoriales, unidades angulares, operaciones matriciales.
- h) *Macro (Macro)*.- Permite ejecutar macros y bloques de datos. También puede crear, editar, y suprimir abreviaciones, las cuáles aparecen como interruptores de botón (iconos) en la ventana ANSYS Toolbar.
- i) *Control de Menú (MenuCtrls)*.- Por medio de este menú es posible elegir entre mostrar u ocultar las ventanas ANSYS Input, ANSYS Toolbar, ANSYS Main Menu y ANSYS Graphics. También se puede crear, editar y suprimir abreviaciones en la ventana barra de herramientas (ANSYS Toolbar).
- j) *Ayuda (Help)*.- Con este menú se puede tener acceso a todos los tópicos de ANSYS, desde su instalación y requerimientos hasta algunos consejos para utilizar el programa.

## 2.6. VENTANA DE APORTE (ANSYS INPUT)

La ventana de aporte (figura 2.7), como su nombre lo dice, provee el aporte al programa directamente introduciendo órdenes. También muestra indicadores para funciones que involucran selección gráfica.

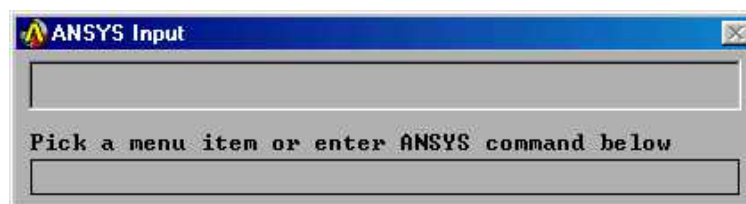


Figura 2.7 Ventana ANSYS Input.

La ventana de aporte consta de dos regiones principales:

1. En la *caja del texto de entrada*, se proporcionan las órdenes o respuestas para indicadores. Al presionar enter (↵) se ejecutará la orden. El texto ingresado posteriormente se muda al *buffer de memoria* (la caja no resaltada en lo alto de la ventana).
2. El *buffer de memoria* contiene todas las ordenes previamente introducidas y todas las respuestas generadas. Dar un clic sobre el botón izquierdo del ratón en cualquier línea en el *buffer de memoria*, baja esa línea a la *caja del texto de entrada* donde lo puede editar o lo puede ejecutar. Un doble clic en cualquier línea en el buffer de memoria automáticamente ejecuta esa línea.

## 2.7. VENTANA BARRA DE HERRAMIENTAS (ANSYS TOOLBAR)

La barra de herramientas (*ANSYS Toolbar*) contiene una serie de interruptores de botón (iconos) que comúnmente ejecutan funciones usadas en ANSYS. Algunos interruptores de botón (por ejemplo, SAVE\_DB y RESUM\_DB) son predefinidos, pero es posible definir otros. Es decir, cada usuario elige cuántos iconos contiene la barra de herramientas (*hasta un máximo de 100*) y que función ejecutan. Esta característica aumenta su productividad dándole vía de entrada por un botón a sus funciones favoritas y frecuentemente usadas.

Básicamente, la ventana ANSYS Toolbar contiene siete iconos, los cuales sirven para guardar un archivo creado (SAVE\_DB), reanudar un archivo (RESUM\_DB), salir del programa (QUIT), definir el tipo de grafico visual (POWRGRPH), obtener información de internet (ANSYSWEB), mostrar algunas aplicaciones (TUTORIAL) y enterarse de las ultimas novedades (WHATSNEW). En la figura 2.8 se muestra la ventana ANSYS Toolbar.

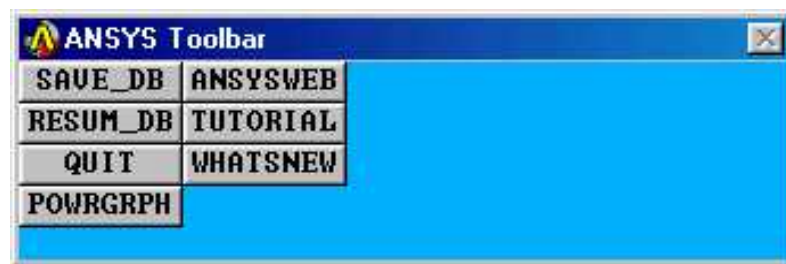


Figura 2.8 Ventana ANSYS Toolbar.

### 2.7.1. AGREGAR BOTONES

Para añadirle un interruptor de botón (icono) a la barra de herramientas, todo lo que se necesita hacer es crear una abreviatura. Una *abreviatura* es simplemente un alias (*hasta ocho caracteres de largo*) para una orden completa ANSYS. Por ejemplo, SAVE\_DB es un alias para la orden *Guardar*, RESUM\_DB es un alias para la orden *Reanudar* y QUIT es un alias para la función *Salir* (Fnc\_/EXIT), la cual exhibe la ventana de diálogo “Exit from ANSYS”. También es posible añadir *macros* a la barra de herramientas definiendo un abreviatura que ejecuta el macro.

### 2.7.2. CREAR ABREVIATURAS

Para crear una abreviatura, siga la trayectoria ***Utility Menu > MenuCtrls > Edit Toolbar...*** o ***Utility Menu > Macro > Edit Abbreviations...***. Ambas elecciones del menú muestran la ventana de diálogo “Edit Toolbar/Abbreviations” mostrada la figura 2.9. La barra de herramientas inmediatamente refleja cualquier cambio que se generó para las abreviaturas usando esta ventana de diálogo.

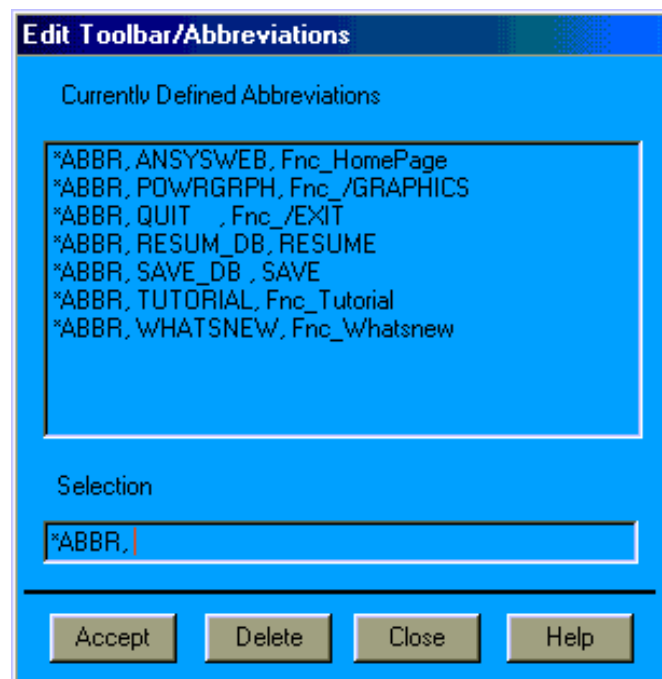


Figura 2.9 Ventana Edit Toolbar/Abbreviations.

Una vez que se han definido los botones, no es posible reacomodarlos gráficamente dentro de la Interfaz Gráfica de Usuario (GUI). Se puede guardar las abreviaturas en un archivo y luego editar el archivo si se quiere reordenar la forma en que los botones aparecen en la barra de herramientas.

Ya que se ha creado el set de abreviaturas en la barra de herramientas, se puede salvar en un archivo escogiendo ya sea **Utility Menu > MenuCtrls > Save Toolbar...** o **Utility Menu > Macro > Save Abbr...**, o también usando la orden ***ABBSAV***. Para restaurar un set de abreviaturas de un archivo, elija ya sea **Utility Menu > MenuCtrls > Restore Toolbar...** o **Utility Menu > Macro > Restore Abbr...**, o use la orden ***ABBRES***.

## 2.8. VENTANA DE GRÁFICOS (ANSYS GRAPHICS)

La ventana de gráficos (figura 2.10) es donde ANSYS muestra todos los dibujos realizados y las operaciones realizadas en ellos. Es usualmente la más grande de las ventanas de la Interfaz Gráfica de Usuario (GUI). Si se cambia el tamaño de la ventana de gráficos ANSYS, es recomendable mantener una proporción de anchura 4:3 con respecto a la altura.

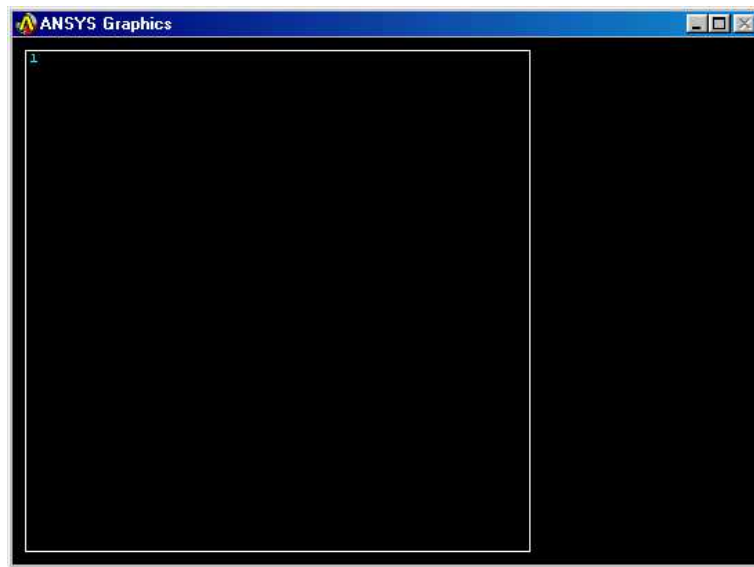


Figura 2.10 Ventana ANSYS Graphics.

## 2.9. VENTANA MENÚ PRINCIPAL (ANSYS MAIN MENU)

Finalmente, la ventana ANSYS Main Menu (figura 2.11), es quizá la más importante del programa debido a que ésta contiene todos los comandos necesarios para analizar un diseño mediante la técnica del método del elemento finito “FEM”.

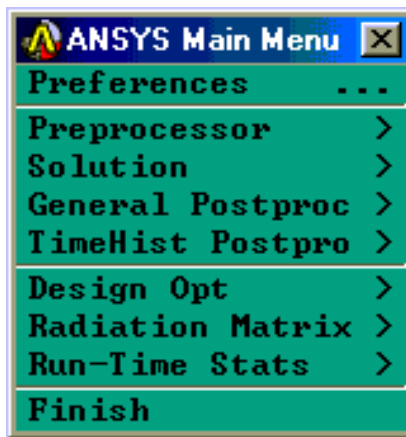


Figura 2.11 Ventana ANSYS Main Menu.

El Menú Principal (*Main Menu*) contiene las funciones principales de ANSYS como preprocesamiento, solución y postprocesamiento. Todo funciona en el menú principal de forma “*modal*”, es decir, se debe completar una función antes de iniciar la siguiente. Por ejemplo, si crea puntos de control (keypoints) en el plano de trabajo (work plane), simultáneamente no es posible crear líneas o volúmenes en la malla. Sin embargo, puede definir o revisar los parámetros escalares antes de crear dichos puntos de control.

Cada apartado en el Menú Principal muestra un submenú (*indicado por >*) o realiza una acción, parecido al Menú de Utilidad (*Utility Menu*). Los símbolos usados para indicar la acción son los mismos:

- ✓ Ningún símbolo para la ejecución inmediata de la función.
- ✓ El carácter “...” para mostrar una ventana de diálogo.
- ✓ El carácter “+” para mostrar un menú de selección.

El Menú Principal lista nueve temas. A continuación se describirá brevemente cada tema como sigue:

**Preferences ...**.- Permite elegir la disciplina en la cual deseamos realizar nuestro análisis.



**Preprocessor >**.- Muestra submenús conteniendo funciones **PREP7** como tipo de elemento, constantes reales, propiedades de materiales, modelado, definir atributos, herramientas de mallado, mallado; por mencionar algunos.

**Solution >**.- Muestra submenús conteniendo funciones **SOLUTION** como el tipo de análisis, el tipo de las opciones de carga y la ejecución de la solución.

**General Postproc >**.- Muestra submenús conteniendo funciones **POST1** como opciones de datos y archivos, resumen de resultados, lectura de resultados así como también el trazado y listado de resultados.

**TimeHist Postpro >**.- Muestra submenús conteniendo funciones **POST26** dichas funciones definen, enlistan y esquematizan el trazado de variables.

**Design Opt >**.- Muestra submenús conteniendo funciones **OPT** tan decisivas como las variables de optimización, el inicio del proceso de optimización y la revisión de los sets resultantes del diseño.

**Radiation Matrix >**.- Muestra submenús conteniendo funciones **AUX12** que permiten definir emisividades, otras variables y escriben la matriz de la radiación.

**Run-Time Stats >**.- Muestra submenús conteniendo funciones **RUNSTAT** como el listado de estadísticas proveídas de escenarios del sistema.

**Finish**.- Egresar el procesador actual ejecutando la orden **FINISH**.

## CAPÍTULO 3

### PASOS PARA EL ANÁLISIS DE ESFUERZOS

Todos los análisis de esfuerzos empleando el método del elemento finito (FEM) implican tres pasos fundamentales:

1. Preproceso.
  - ✓ Crear o importar la geometría modelo.
  - ✓ Mallar la geometría.
  
2. Solución.
  - ✓ Aplicar cargas.
  - ✓ Resolver.
  
3. Postproceso.
  - ✓ Revisar resultados.
  - ✓ Verificar la validez de la solución.

#### 3.1. MODELADO SÓLIDO

Importar la geometría generada mediante un programa de CAD (por ejemplo Unigraphics) es conveniente muchas veces, pero en ocasiones es necesario crearla con ayuda del programa ANSYS. Algunas posibles razones son:

- ✓ Puede necesitar construir un modelo paramétrico; uno definido en términos de variables para un uso posterior en la optimización del diseño o de los estudios de sensibilidad.
  
- ✓ La geometría puede no estar disponible en el formato de importación.
  
- ✓ El producto de conexión necesario puede no estar disponible en la plataforma del ordenador utilizado.

##### 3.1.1. DEFINICIONES

**Modelado Sólido.** Se puede definir como el proceso de crear modelos sólidos.

Revisemos algunas definiciones antiguas:

- ✓ Un modelo sólido se define mediante volúmenes, áreas, líneas y keypoints (puntos de control), figura 3.1.



Figura 3.1 Elementos empleados para definir un modelo sólido.

- ✓ Los volúmenes están delimitados por áreas, las áreas por líneas y las líneas por keypoints.
- ✓ La jerarquía de entidades de bajo a alto es: **keypoints** > **líneas** > **áreas** > **volúmenes**. No es posible suprimir una entidad si la entidad de orden mayor está sujeta a ella.

Hay dos maneras para crear un modelo sólido:

1. *Top-down* (de arriba-abajo).
2. *Bottom-up* (de abajo-arriba).

### 3.1.2. MODELADO TOP-DOWN

Comienza con una definición de áreas o volúmenes, las cuales se combinan después a manera de crear la forma final, figura 3.2.

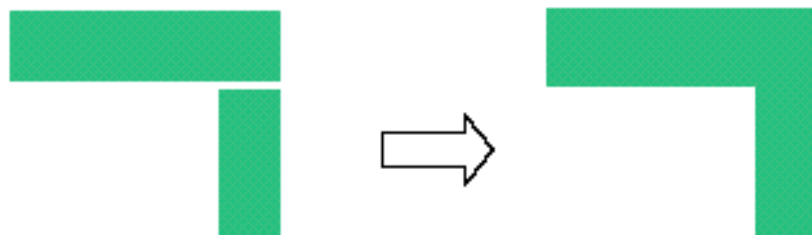


Figura 3.2 Modelado Top-Down.

### 3.1.2.1. FORMAS GEOMÉTRICAS PRIMITIVAS

Las formas geométricas primitivas son predefinidas; tales como círculos, polígonos y esferas. Los primitivos 2-D incluyen rectángulos, círculos, triángulos y otros polígonos; figura 3.3. Cuando se crea un primitivo 2-D, ANSYS define una *área* junto con sus líneas fundamentales y keypoints.



Figura 3.3 Geometrías primitivas 2-D.

Los primitivos 3-D incluyen bloques, cilindros, prismas, esferas y conos; figura 3.4. Al crear un primitivo 3-D, ANSYS define un *volumen* junto con sus áreas fundamentales, líneas y keypoints.

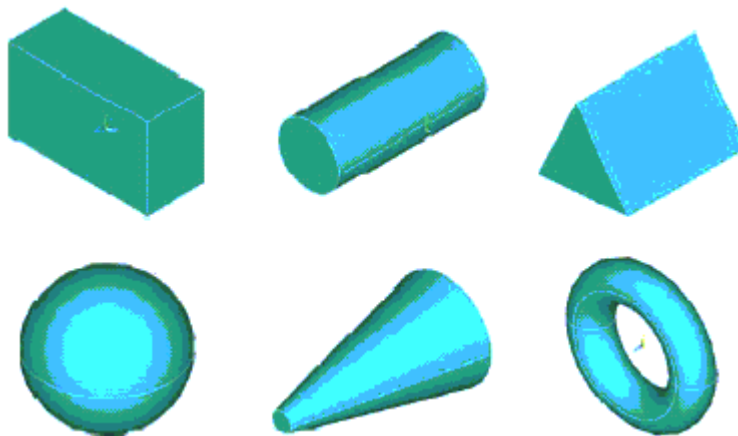


Figura 3.4 Geometrías primitivas 3-D.

Es posible crear un primitivo al especificar sus dimensiones o al elegir lugares en la ventana de gráficos.

Por ejemplo, para crear un círculo sólido (figura 3.5) utilice el menú **ANSYS Main Menu** **> Preprocessor > -Modeling- Create > -Areas- Circle >**.

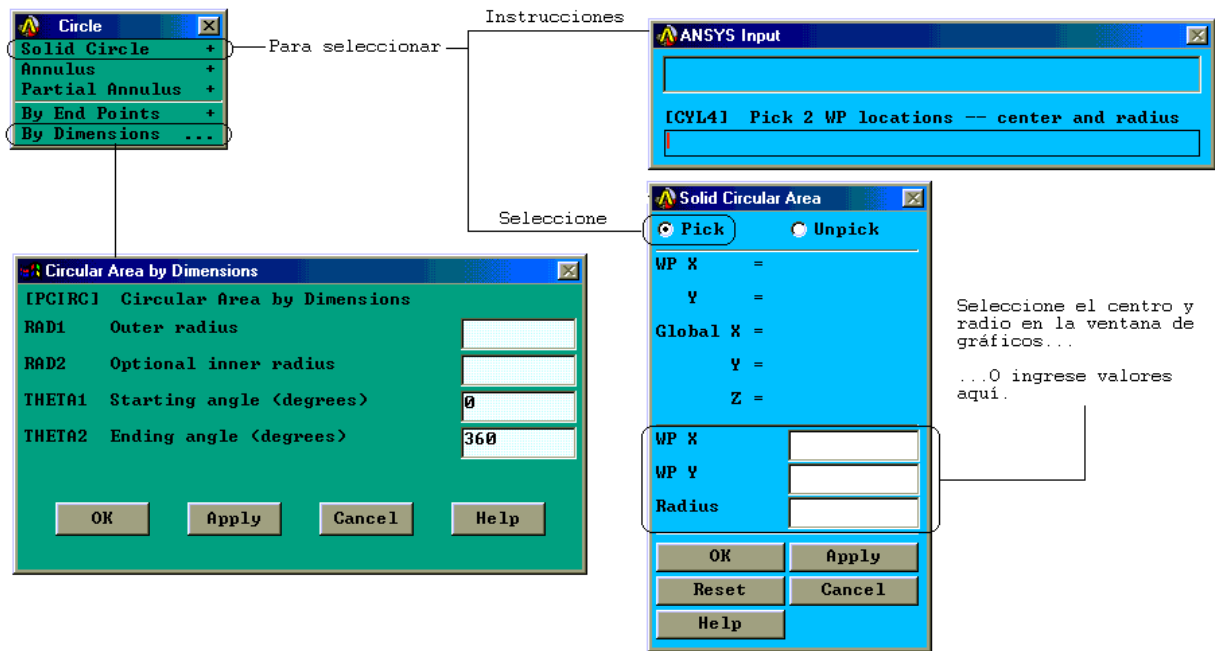


Figura 3.5 Método para crear un círculo sólido.

Para crear un bloque (figura 3.6) utilice el menú *ANSYS Main Menu > Preprocessor > -Modeling- Create > -Volumes- Block >*

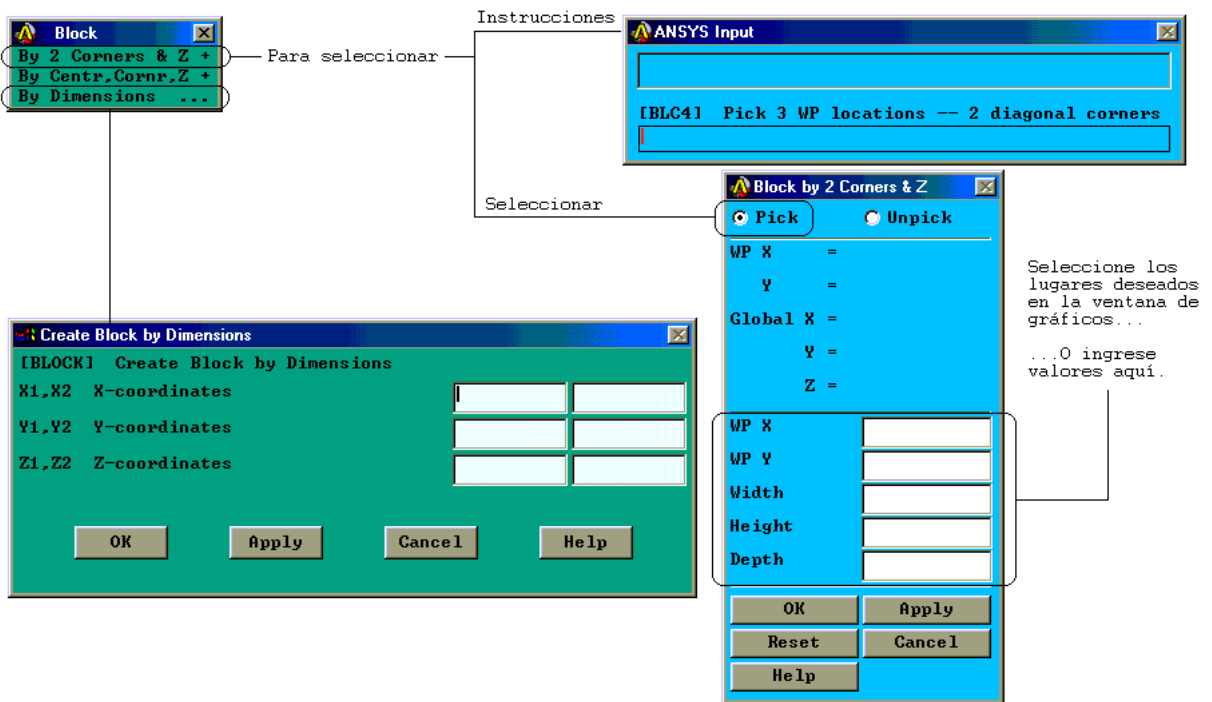


Figura 3.6 Método para crear un bloque.

### 3.1.2.2. PLANO DE TRABAJO (WP)

El plano de trabajo se puede definir como el plano de referencia 2-D movable usado para localizar y orientar a las geometrías primitivas.

Por defecto, el origen del WP coincide con el origen global, pero se puede mover y/o rotar a cualquier posición deseada. Para colocar una rejilla, se puede usar el WP como una “tableta de dibujo”, figura 3.7.

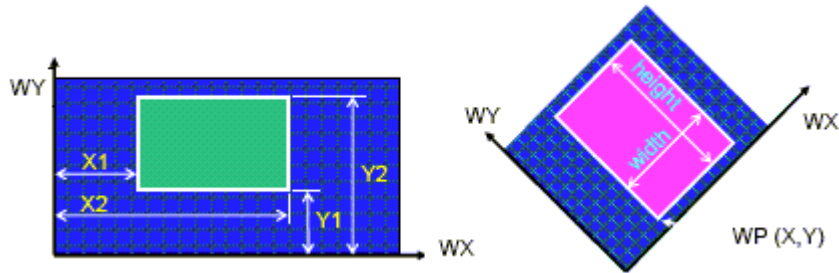


Figura 3.7 Tableta de dibujo.

Todos los controles del plano de trabajo están en el menú **Utility Menu > WorkPlane**.

La figura 3.8 muestra la ventana *WP Settings*, para acceder a él utilice el menú **Utility Menu > WorkPlane > WP Settings...**



Figura 3.8 Ventana WP Settings.

Para mover el plano de trabajo a cualquier posición deseada se usan los menús *Offset* y *Align*.

En la figura 3.9 se muestra la ventana *Offset WP by Increments*, se accede a él utilizando el menú **Utility Menu > WorkPlane > Offset WP by Increments...**

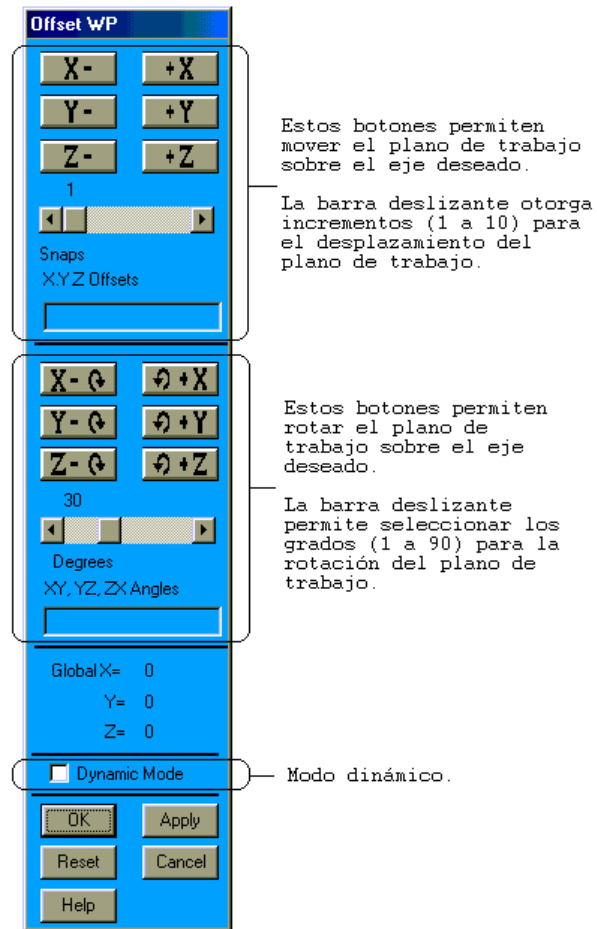


Figura 3.9 Ventana Offset WP.

La función principal del menú *Offset WP to >*, simplemente es trasladar el WP manteniendo su orientación común al destino deseado. Se accede a él utilizando el menú **Utility Menu > WorkPlane > Offset WP to >**.

Para reorientar el WP se utiliza el menú *Align WP with >*. Por ejemplo, *Align WP with > Keypoints* te ayuda a seleccionar tres keypoints (uno en el origen, uno para definir el eje X, y uno para definir el plano X-Y). Para retornar el WP a la posición por defecto (en el origen global, en

el plano global X-Y) se da un clic en *Align Wp with > Global Cartesian*. La ruta **Utility Menu > WorkPlane > Align WP with >**, accede a este menú.

### 3.1.2.3. OPERACIONES BOLEANAS

Las operaciones booleanas son operaciones que involucran combinaciones de entidades geométricas. Las operaciones booleanas que incluye ANSYS son: intersecar (intersect), agregar (add), sustraer (subtract), dividir (divide), pegar (glue), sobreponer (overlap) y partición (partition).

La entrada para operaciones booleanas puede ser cualquier entidad geométrica, que varía de primitivas simples a volúmenes complicados importados de un sistema CAD.

Todas las operaciones booleanas están disponibles mediante el menú **ANSYS Main Menu > Preprocessor > -Modeling- Operate > -Booleans-**, figura 3.10.

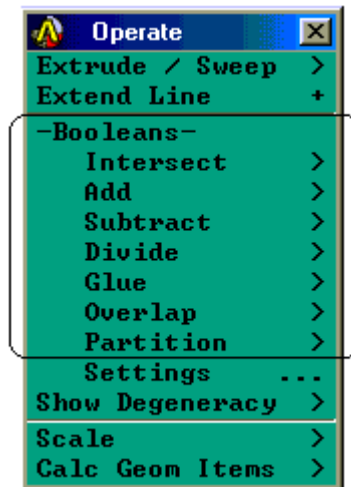


Figura 3.10 Ventana Operate.

Por defecto, las entidades de entrada de una operación booleana son borradas después de la operación. El número de entidades suprimidas llega a ser libre, es decir, son asignadas a una nueva entidad creada, empezando con el número disponible más bajo.

**Intersecar (Intersect)**, figura 3.11. Mantiene sólo la porción de traslape de dos o más entidades. Si hay más de dos entidades de entrada, se presentan dos elecciones: intersección common e intersección pairwise.



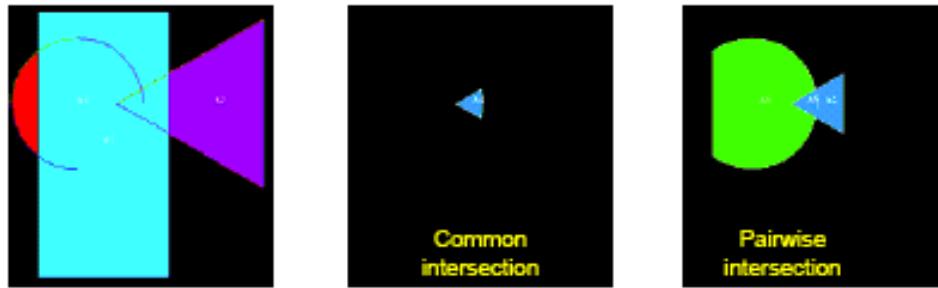


Figura 3.11 Operación booleana intersecar.

- ✓ La *intersección common* encuentra la región de traslape común entre todas las entidades de entrada.
- ✓ La *intersección pairwise* encuentra la región de traslape para cada par de entidades y puede producir mas de una entidad de salida.

**Agregar (Add)**, figura 3.12. Combina dos o más entidades en una.

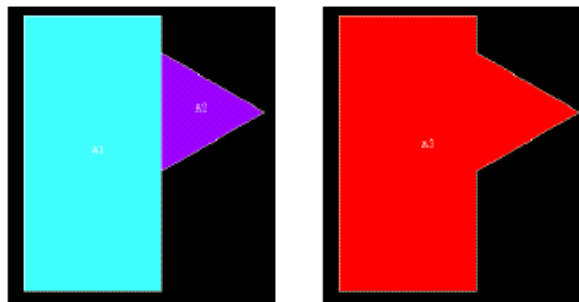


Figura 3.12 Operación booleana agregar.

**Sustraer (Subtract)**, figura 3.13. Quita la porción traslapada de una o más entidades de un juego de entidades base. Es útil para crear barrenos o recortar porciones de una entidad.

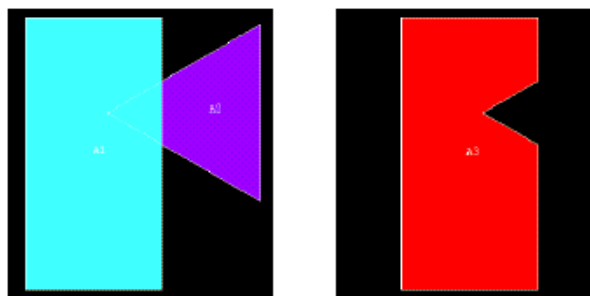


Figura 3.13 Operación booleana sustraer.

**Dividir (Divide)**, figura 3.14. Corta una entidad en dos o más piezas pero que aún están conectadas entre sí por límites comunes. La herramienta de corte puede ser el plano de trabajo, un área, una línea o hasta un volumen. Útil para “rebanar en pequeñas porciones y partir en cuadritos” un volumen complicado en volúmenes simples para mallado de ladrillo.

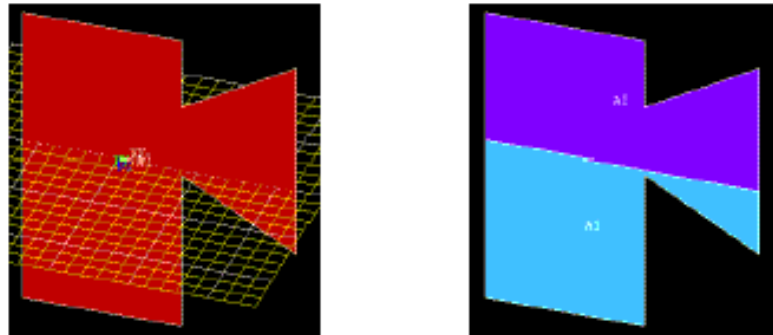


Figura 3.14 Operación booleana dividir.

**Pegar (Glue)**, figura 3.15. Une dos o más entidades al crear un límite común entre ellos. Útil para cuando se quiere mantener la distinción entre entidades, tales como materiales diferentes.

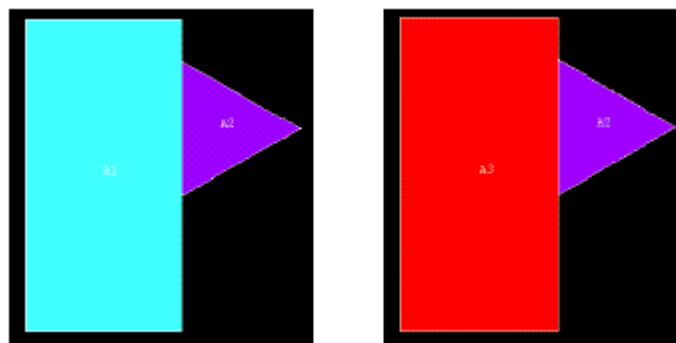


Figura 3.15 Operación booleana pegar.

**Sobreponer (Overlap)**, figura 3.16. Igual que pegar, excepto que las entidades de entrada se enciman una sobre otra.

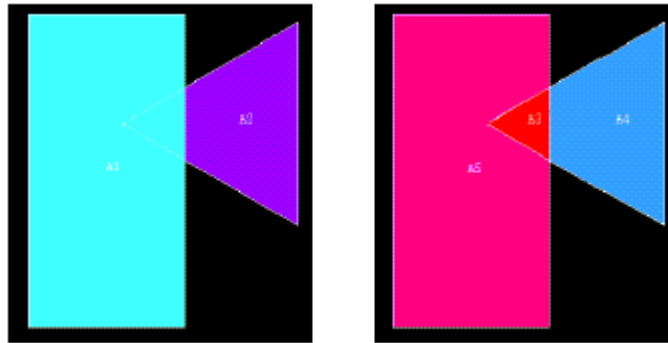


Figura 3.16 Operación booleana sobreponer.

**Partición (Partition)**, figura 3.17. Corta dos o más entidades intersecadas en múltiples piezas que están conectadas todavía a otras por límites comunes. Útil, por ejemplo, para encontrar el punto de intersección de dos líneas y aún retener los cuatro segmentos de línea. Una operación de intersección regresaría al keypoint común y eliminaría ambas líneas.



Figura 3.17 Operación booleana partición.

### 3.1.3. MODELADO BOTTOM-UP

Comienza con una definición de keypoints, con los cuales es posible construir líneas, áreas, etcétera. Para construir un objeto en forma de “L”, por ejemplo, se puede comenzar por definir las esquinas con keypoints como se ilustra en la figura 3.18. Después, se puede crear el área para simplemente conectar los puntos o primero definir las líneas y entonces el área por líneas.

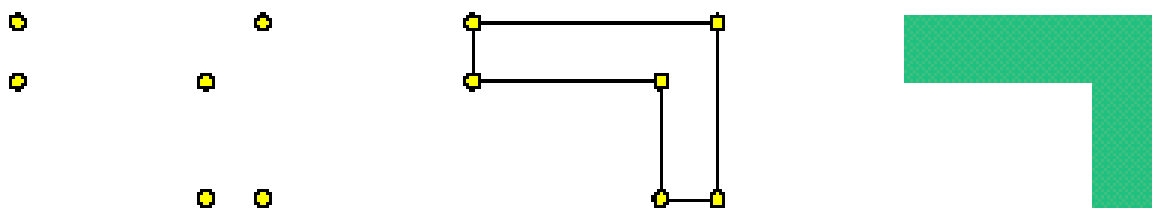


Figura 3.18 Modelado Bottom-Up.

### 3.1.3.1. KEYPOINTS

Para definir los keypoints, figura 3.19, elegimos el menú **ANSYS Main Menu > Preprocessor > -Modeling- Create > Keypoints >**, o use la familia *K* de comandos: *K*, *KFILL*, *KNODE*, etcétera.

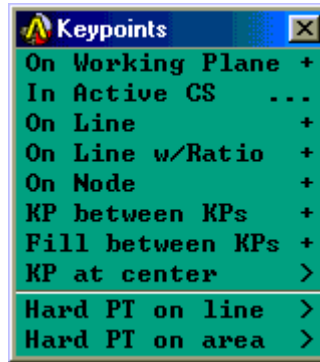


Figura 3.19 Ventana Keypoints.

Los únicos datos necesarios para crear un keypoint es el número del keypoint y la ubicación de la coordenada. Por defecto, el número de keypoint elige el siguiente número disponible. La ubicación de la coordenada se puede proporcionar simplemente seleccionando un lugar sobre el plano de trabajo o al ingresar los valores de X, Y, Z. ¿Cómo se interpretaran los valores X, Y, Z? Esto depende según el sistema de coordenada activo.

### 3.1.3.2. SISTEMAS DE COORDENADAS

**Sistema coordinado activo:** para elegir las opciones del sistema cartesiano global use el comando *CSYS* o el menú **Utility Menu > WorkPlane > Change Active CS to >**; para cambiarlo a: cartesiano global (*csys, 0*), cilíndrico global (*csys, 1*), esférico global (*csys, 2*), plano de trabajo (*csys, 4*) o un sistema de coordenada local definido por el usuario (*csys, n*); figura 3.20.

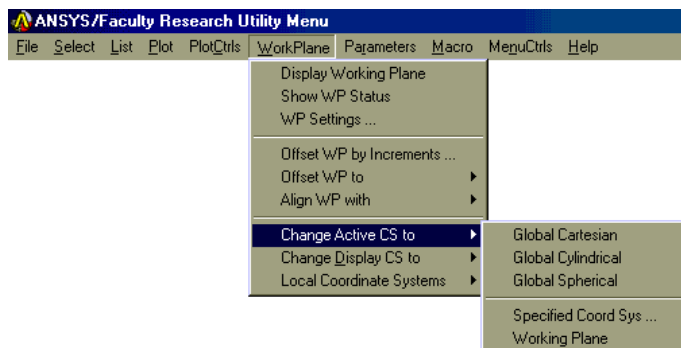


Figura 3.20 Ruta para elegir el menú Change Active CS to.

**Sistema coordenado global:** el sistema de referencia global para el modelo puede ser cartesiano (0), cilíndrico (1) y esférico (2). Por ejemplo, las coordenadas (0,10,0) en el cartesiano global es lo mismo que en (10,90,0) en el cilíndrico global; figura 3.21.

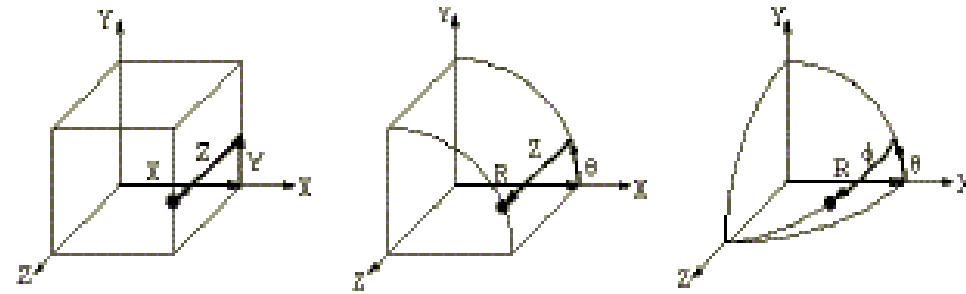


Figura 3.21 Diversos sistemas de coordenadas.

**Sistema coordenado local:** es un sistema definido por el usuario para una ubicación deseada con un número *ID* (identificación) 11 o mayor. La ubicación puede ser: en el origen del WP (*CSWP*), en coordenadas específicas (*LOCAL*), en keypoints existentes (*CSKP*) o en nodos (*CS*). Este sistema puede ser cartesiano, cilíndrico o esférico; además puede ser rotado sobre los ejes X, Y, Z. Para crear un sistema coordenado local utilice el menú Utility Menu > WorkPlane > Local Coordinate Systems > Create Local CS >, figura 3.22.

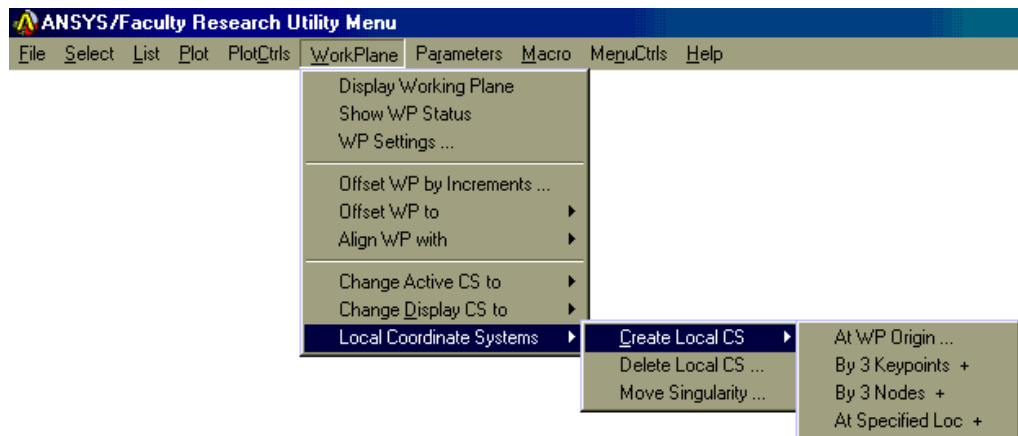


Figura 3.22 Ruta para elegir el menú Local Coordinate Systems.

### 3.1.3.3. LÍNEAS

Hay muchas maneras para crear líneas, siguiendo el menú ANSYS Main Menu > Preprocessor > -Modeling- Create > -Lines- o ANSYS Main Menu > Preprocessor > -Modeling- Operate > Extrude / Sweep > -Keypoints-, figura 3.23.

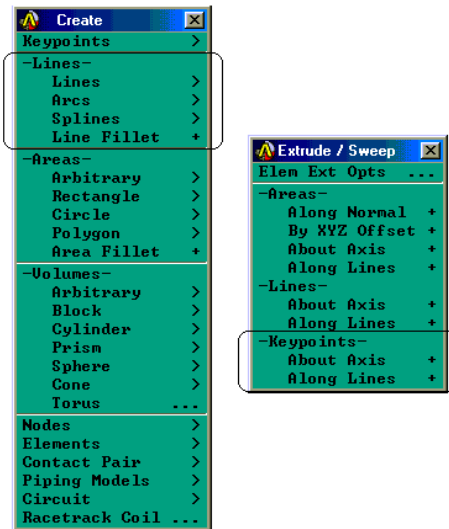


Figura 3.23 Ventanas que muestran los diversos menús para crear líneas.

Si se definen áreas o volúmenes, ANSYS genera automáticamente cualquier línea indefinida con la curvatura determinada por el sistema de coordenada activo.

### 3.1.3.4. ÁREAS

La creación de áreas usando el método bottom-up requiere keypoints o líneas que ya se definieron. Para crear una área se puede utilizar cualquiera de los siguientes menús *ANSYS Main Menu > Preprocessor > -Modeling- Create >* o *ANSYS Main Menu > Preprocessor > -Modeling- Operate > Extrude / Sweep > -Lines-*, figura 3.24.

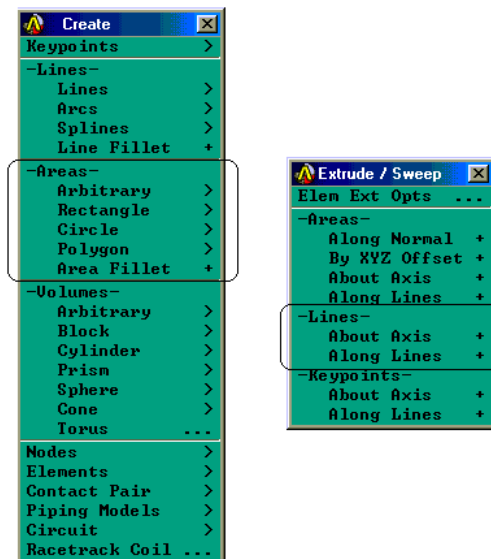


Figura 3.24 Ventanas que muestran los diversos menús para crear áreas.

### 3.1.3.5. VOLÚMENES

Para crear un volumen simplemente utilice la ruta *ANSYS Main Menu > Preprocessor > -Modeling- Create > -Volumes-* o *ANSYS Main Menu > Preprocessor > -Modeling- Operate > Extrude / Sweep > -Areas-*, figura 3.25.

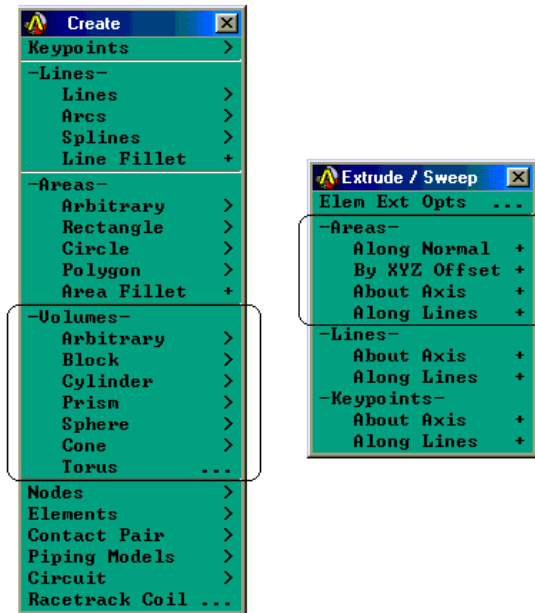


Figura 3.25 Ventanas que muestran los diversos menús para crear volúmenes.

### 3.1.3.6. OPERACIONES BOLEANAS

Además de las operaciones booleanas Top-Down, están disponibles otras operaciones tales como extruir (extrude), escalar (scale), mover (move), copiar (copy), reflejar (reflect), fusionar (merge) y filetear (fillet).

*Extruir (Extrude)*, figura 3.26. Esta operación booleana se usa para rápidamente crear volúmenes de áreas existentes, áreas de líneas, líneas de keypoints. Si el área es mallada, es posible extruir los elementos junto con las áreas.

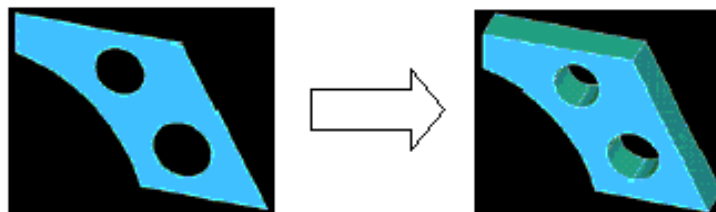


Figura 3.26 Operación booleana extruir.

Existen cuatro formas para extruir un área:

1. *Normal paralelo*.- Crea un volumen por desplazamiento normal de áreas. Se puede aplicar utilizando el comando **VOFFST**.
2. *Por desplazamiento XYZ*.- Crea un volumen por el desplazamiento general x-y-z. Aplicable con el comando **VEXT**. Permite la extrusión cónica.
3. *Alrededor de un eje*.- Crea volúmenes para revolver áreas alrededor de un eje (especificado por dos keypoints). Se aplica utilizando el comando **VROTAT**.
4. *A lo largo de líneas*.- Crea volúmenes para rastrear áreas a lo largo de una línea o de un juego de líneas contiguas. Aplicable con el comando **VDRAG**.

**Escala (Scale)**. Útil para la conversión de un sistema de unidades a otro.

**Mover (Move)**, figura 3.27. Se usa para trasladar o rotar una entidad especificando los desplazamientos DX, DY, DZ; los cuales se interpretan en el sistema coordenado activo.

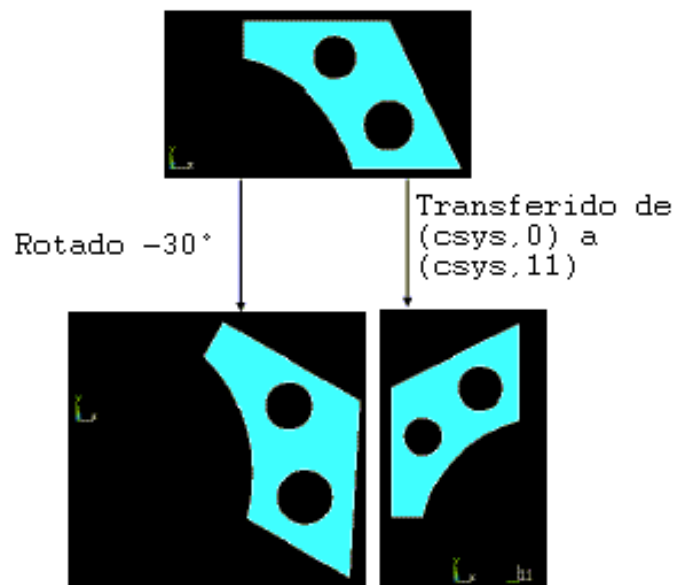


Figura 3.27 Operación booleana mover.

- ✓ Para trasladar una entidad haga el sistema coordenado activo a cartesiano.



- ✓ Para rotar una entidad haga el sistema coordenado activo a cilíndrico o esférico.

Otra opción es transferir las coordenadas a un sistema diferente. La transferencia ocurre de el sistema coordenado activo a el sistema coordenado especificado. Esta operación es útil cuando se necesita mover y rotar una entidad al mismo tiempo.

**Copiar (Copy)**, figura 3.28. Se utiliza para generar múltiples copias de una entidad. Especifique el número de copias y los desplazamientos DX, DY, DZ para cada copia. DX, DY, DZ se interpretan en el sistema coordenado activo. Útil para crear múltiples barrenos, aristas, proyecciones, etcétera.

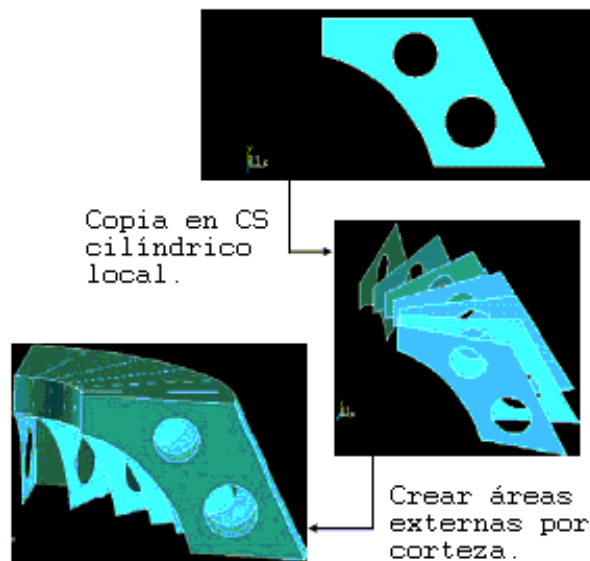


Figura 3.28 Operación booleana copiar.

**Reflejar (Reflect)**, figura 3.29. Útil para reflejar una entidad alrededor a un plano.



Figura 3.29 Operación booleana reflejar.

Especifique la dirección de reflexión:

- ✓ X para reflejar con respecto al plano YZ.
- ✓ Y para reflejar con respecto al plano XZ.
- ✓ Z para reflejar con respecto al plano XY.

Todas las direcciones se interpretan en el sistema coordenado activo, el cual debe ser un sistema cartesiano.

**Fusionar (Merge)**, figura 3.30. Se utiliza para unir dos entidades juntas al remover keypoints coincidentes. La fusión de keypoints automáticamente unirá las entidades de orden más alto, si las hay. La fusión requiere después reflejar, copiar u otra operación que cause entidades coincidentes.

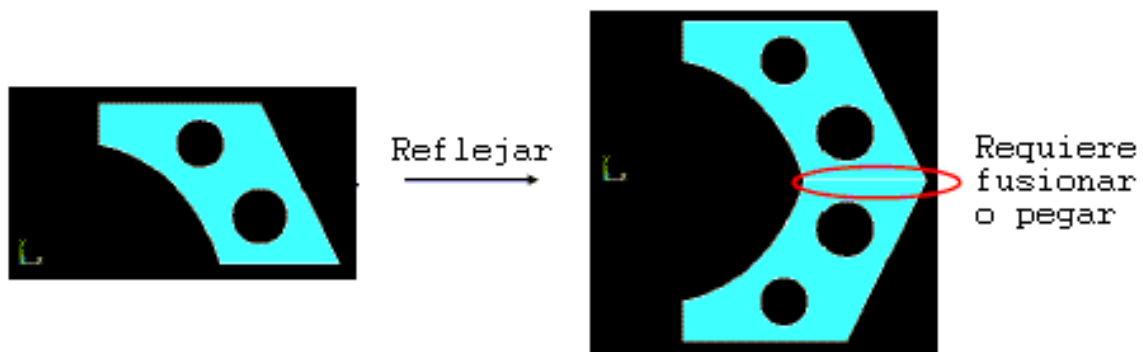


Figura 3.30 Operación booleana fusionar.

**Filetear (Fillet)**, figura 3.31. La línea a filetear requiere dos líneas intersecadas con un keypoint común en la intersección. Si el keypoint común no existe, se debe hacer primero una operación de división. ANSYS no cuenta con áreas fundamentales actualizadas con esta función, así que es necesario agregar o sustraer la región del filete.

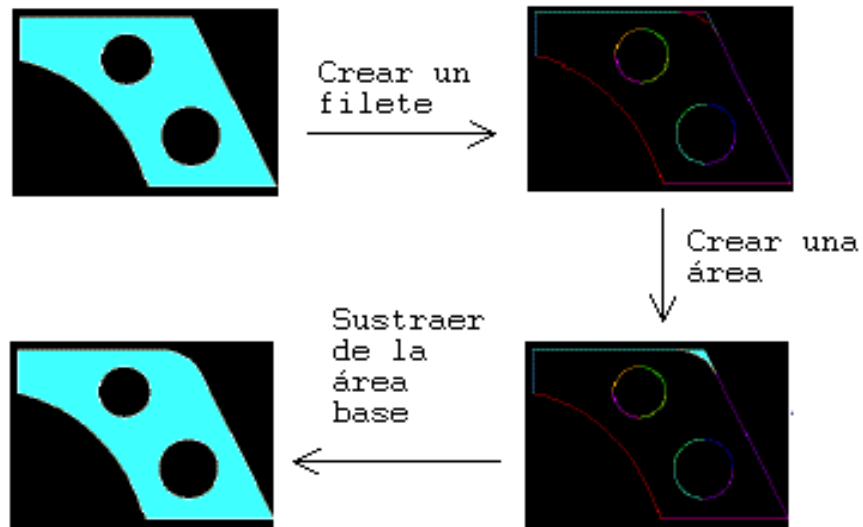


Figura 3.31 Operación booleana filetear.

## 3.2. MALLADO

El procedimiento para mallar consiste de tres pasos básicos, a saber:

1. Definir atributos de elemento.
2. Especificar controles de mallado.
3. Generar la malla.

### 3.2.1. MÚLTIPLES ATRIBUTOS DE ELEMENTO

Cada elemento tiene los siguientes atributos asociados a el:

- ✓ Tipo de elemento (TYPE).
- ✓ Constante real (REAL).
- ✓ Propiedades del material (MAT).

La mayoría de los modelos (FEA) tienen múltiples atributos. Por ejemplo, el silo mostrado en la figura 3.32 tiene dos tipos de elementos, tres juegos de constantes reales y dos materiales.

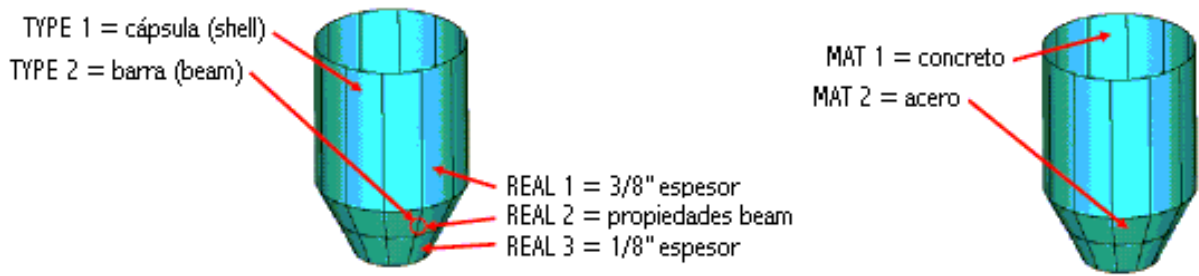


Figura 3.32 Silo con múltiples atributos de elemento.

### 3.2.2. DETERMINANDO LA DENSIDAD DE MALLADO

ANSYS proporciona muchas herramientas para el control de la densidad de mallado, tanto a nivel global como local.

Los controles globales comprenden:

**Control inteligente (SmartSizing).** Determina el tamaño del elemento al asignar divisiones en todas las líneas, tomando en cuenta la curvatura de la línea, su proximidad a barrenos y otras características como orden de elementos.

*SmartSizing* está sin activar por defecto, pero se recomienda para mallado libre. Esto no afecta el mallado mapeado.

Para usar *SmartSizing*, seleccione la ventana MeshTool a través del menú **ANSYS Main Menu > Preprocessor > MeshTool...** (figura 3.33-A), seleccione la casilla *SmartSizing* y elija el tamaño al nivel deseado o use el comando ***SMRT,LEVEL***. El rango de nivel de tamaño va de 1 (muy fino) a 10 (muy tosco). Por defecto el nivel se establece en 6. Después, aplique el mallado en todos los volúmenes o áreas a la vez, en vez de uno en uno.

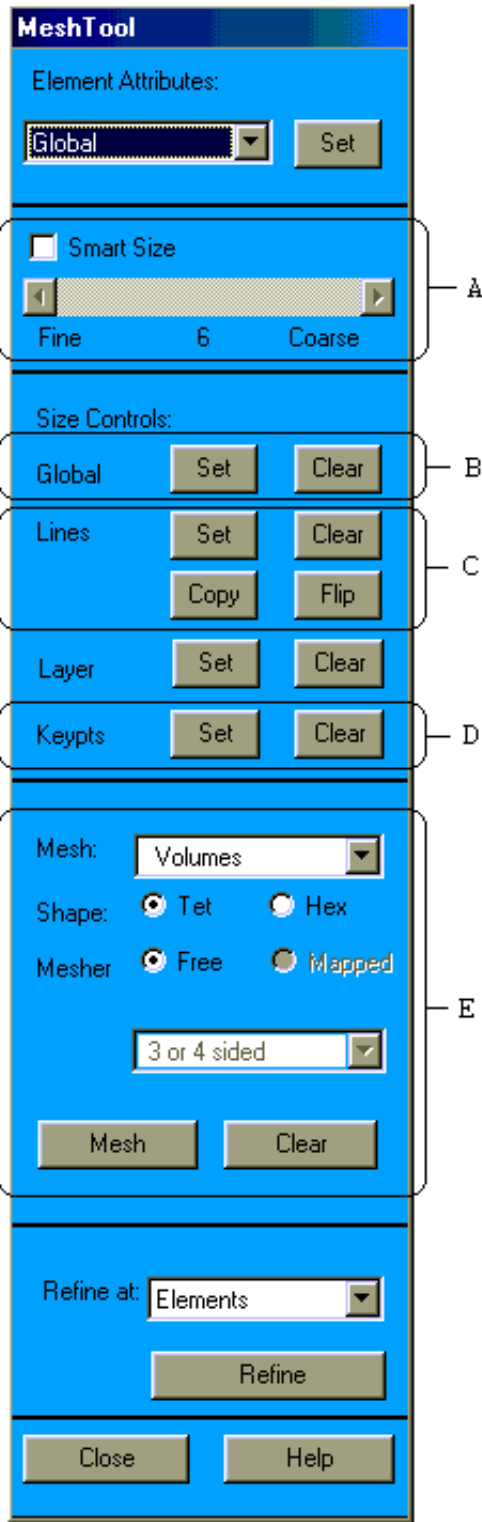


Figura 3.33 Ventana MeshTool.

En la figura 3.34 se ilustran ejemplos de diferentes niveles de *SmartSize* con un mallado tetraédrico.

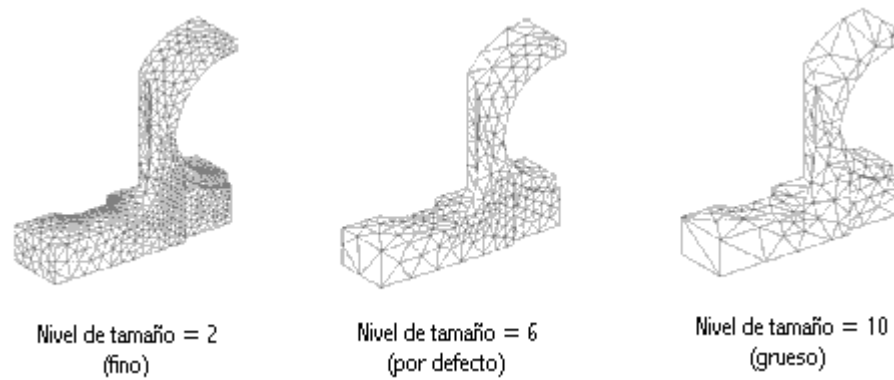


Figura 3.34 Diferentes niveles de tamaño de malla.

Los controles avanzados *SmartSize*, tales como expansión de la malla y factores de transición, están disponibles con el comando *SMRT* o mediante el menú **ANSYS Main Menu > Preprocessor > -Meshing- Size Cntrls > -SmartSize- Adv Opts...**. Se puede desactivar *SmartSizing* usando el MeshTool o impartiendo el comando *SMRT,OFF*.

**Tamaño de elemento global.** Permite especificar un elemento máximo de longitud de corte por todo el modelo (o número de divisiones por línea). Se activa utilizando el comando *ESIZE,SIZE* o a través del menú **ANSYS Main Menu > Preprocessor > MeshTool...** (figura 3.33-B), o **ANSYS Main Menu > Preprocessor > -Meshing- Size Cntrls > -ManualSize- -Global- Size...**.

Puede usarse solo o en conjunción con *SmartSizing*. Usando solo *ESIZE* (desactivando *SmartSizing*) resulta un tamaño de elemento uniforme por todo el volumen o área que esta siendo mallada. Con el *SmartSizing* activado, *ESIZE* actúa como una guía, pero el tamaño especificado puede omitirse para acomodar una curvatura de línea.

**Elección de tamaño.** Si no se especifica ningún control, ANSYS asigna por defecto el tamaño, asigna divisiones de línea máximos y mínimos, proporciona aspecto, etcétera; basado en el orden del elemento. Es propuesto para mallado mapeado, pero también es usado para mallado libre si *SmartSizing* esta desactivado. Se pueden ajustar las especificaciones de tamaño por defecto usando el comando *DESIZA* o mediante el menú **ANSYS Main Menu > Preprocessor > -Meshing- Size Cntrls > -ManualSize- -Global- Other...**.

Los controles globales abarcan:

**Tamaño de línea.** Controla el tamaño de elemento en líneas. Accesible a través del menú **ANSYS Main Menu > Preprocessor > MeshTool...** (figura 3.33-C), o con el comando **LESIZE**, también esta disponible en el menú **ANSYS Main Menu > Preprocessor > -Meshing- Size Cntrls > -ManualSize- -Lines-**.

Diferentes líneas pueden tener diferentes LESIZES. Las especificaciones de tamaño pueden ser “duro (*hard*)” o “blando (*soft*)”. El tamaño “*hard*” es siempre respetado por el mallado aún cuando *SmartSizing* esta activo. Ello tiene prioridad sobre todas las otras zonas de control. El tamaño “*soft*” puede ser ignorado por *SmartSizing*. También es posible especificar una proporción de espaciamiento (relación de la última división a la primera). Usado para inclinar las divisiones hacia el final o hacia el medio.

**Tamaño de keypoint.** Controla el tamaño de elemento en keypoints. Disponible en el menú **ANSYS Main Menu > Preprocessor > MeshTool...** (figura 3.33-D), o con el comando **KESIZE**, también aplicando el menú **ANSYS Main Menu > Preprocessor > -Meshing- Size Cntrls > -ManualSize- -Keypoints-**.

Los diferentes keypoints pueden tener diferentes KESIZES, dando más control sobre el mallado. Útil para regiones de concentración de esfuerzos. Los tamaños especificados pueden ser omitidos por *SmartSizing* al acomodar curvaturas de líneas.

### 3.2.3. CAMBIANDO LA MALLA

Si una malla no es aceptable, es posible remallar (*re-mesh*) el modelo siguiendo estos pasos:

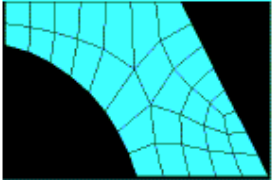
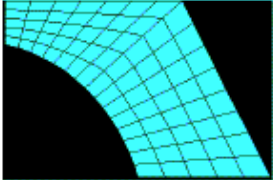
1. Limpie la malla.
  - ✓ La operación limpiar (*clear*) es lo opuesto de mallar: remueve nodos y elementos. Use el botón *Clear* en la ventana MeshTool (figura 3.33-E), o use el comando **VCLEAR**, **ACLEAR**, etcétera. (Si se usa el MeshTool, se puede omitir este paso puesto que el programa indicará limpiar o no cuando se ejecute el paso 3).

2. Especifique nuevos o diferentes controles de mallado.
3. Aplique mallar nuevamente, use el botón *Mesh*.

### 3.2.4. MÉTODOS DE MALLADO

Hay dos métodos fundamentales de mallado: libre “*free*” y mapeado “*mapped*”. En la tabla 3.1 se muestran las principales características de los métodos de mallado.

Tabla 3.1 Principales características de los métodos de mallado.

<p style="text-align: center;"><b>MALLADO LIBRE</b></p> 	<p style="text-align: center;"><b>MALLADO MAPEADO</b></p> 
<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ No tiene restricciones la forma del elemento.</li> <li>✓ La malla no sigue ningún patrón.</li> <li>✓ Adecuado para formas complejas de áreas y volúmenes.</li> <li>✓ Fácil de crear; no necesita dividir formas complejas en formas regulares.</li> <li>✓ Los volúmenes mallados pueden contener solo tetraedros, resultando un número grande de elementos.</li> <li>✓ Solo acepta un orden superior de elementos (10 nodos), así el número de grados de libertad [DOF, por sus siglas en ingles] puede ser muy alto.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Restringe la forma del elemento en cuadriláteros para áreas y hexaedros (ladrillos, “bricks”) para volúmenes.</li> <li>✓ Típicamente tiene un patrón regular con obvias alineaciones de elementos.</li> <li>✓ Adecuado solamente para áreas regulares y volúmenes tales como rectángulos y hexaedros.</li> <li>✓ Acepta un orden inferior de elementos, así el número de grados de libertad es bajo.</li> <li>✓ Estéticamente agradable.</li> <li>✓ Muy difícil de realizar, especialmente para volúmenes de forma compleja.</li> </ul>



**Creando un mallado libre.** El mallado libre por defecto se coloca para áreas y volúmenes.  
Crear un mallado libre es fácil:

- ✓ En la ventana MeshTool, verifique que la forma a mellar (área o volumen) este en la opción “free” en el apartado *Mesher*.
- ✓ *SmartSize* se recomienda generalmente para el mallado libre, actívalo y especifica el nivel de mallado.
- ✓ En seguida, inicie el mallado al oprimir el botón *Mesh* (Presiona [Pick All] para seleccionar todas las entidades, (recomendado)).
- ✓ También se pueden utilizar los comandos *VMESH,ALL* o *AMESH,ALL*.

**Creando un mallado mapeado.** Esto no es tan fácil como el mallado libre debido a que las áreas y los volúmenes deben de cumplir ciertos requerimientos:

- ✓ El área debe contener ya sea 3 o 4 líneas (triángulo o cuadrilátero), figura 3.35.

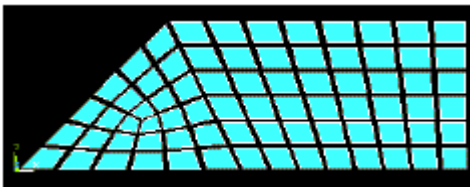


Figura 3.35 Área con mallado mapeado.

- ✓ El volumen debe contener ya sea 4, 5 o 6 áreas (tetraedro, prisma triangular, o hexaedro), figura 3.36.

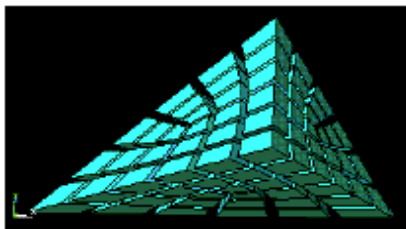


Figura 3.36 Volumen con mallado mapeado.

- ✓ Las divisiones de elemento sobre lados opuestos deben coincidir.
- ✓ Para áreas triangulares o volúmenes tetraédricos, el número de divisiones de elemento deben ser iguales.
- ✓ Para áreas cuadrilaterales o volúmenes hexaédricos, se permite que las divisiones no sean iguales, como se muestra en la figura 3.37.

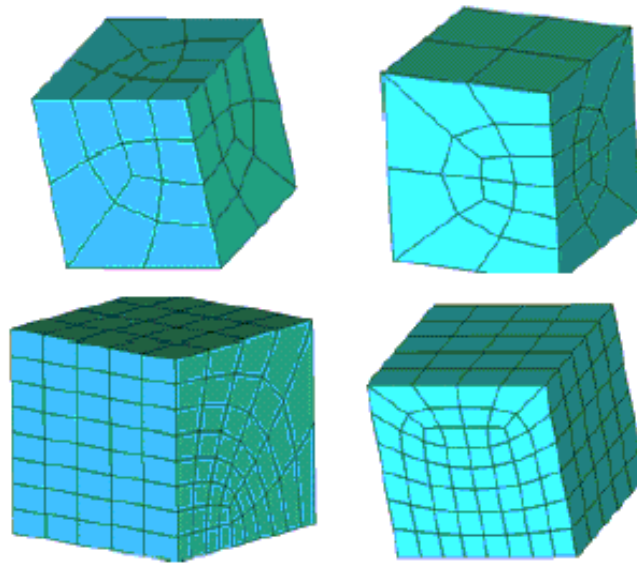


Figura 3.37 Áreas cuadrilaterales y volúmenes hexaédricos.

De esta manera el mallado mapeado involucra un procedimiento de tres pasos:

1. Asegurar formas regulares, es decir, áreas con 3 o 4 lados o volúmenes con 4, 5 o 6 lados.
2. Especificar los controles de tamaño y forma.
3. Generar la malla mapeada.

***Asegurar formas regulares.*** En muchos casos, la geometría modelo es tal que las áreas tienen más de 4 lados y los volúmenes tienen más de 6 lados. Para convertir éstos a formas regulares, es necesario realizar una o ambas de las operaciones siguientes:

- ✓ Partir (*slice*) las áreas o volúmenes en formas simples pequeñas.
- ✓ Concatenar (*concatenate*) dos o mas líneas o áreas para reducir el número total de lados.

**Partir (Slicing)**, figura 3.38. Se puede efectuar con la operación booleana *dividir*. Recuerde que es posible usar el plano de trabajo, una área o una línea como la herramienta *slicing*. A veces, puede ser más fácil crear una nueva línea o una nueva área que mover y orientar el plano de trabajo en la dirección correcta.

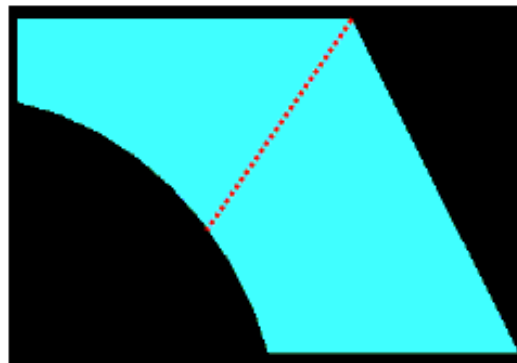


Figura 3.38 Operación Slicing.

**Concatenación (Concatenation)**, figura 3.39. Crea una nueva línea que es una combinación de dos o más líneas, con lo cual se reduce el número de líneas que hacen el área. Use el comando *LCCAT* o el menú **ANSYS Main Menu > Preprocessor > -Meshing- Concatenate > Lines +**; después seleccione las líneas para ser concatenadas. Para concatenar un área use el comando *ACCAT* o el menú **ANSYS Main Menu > Preprocessor > -Meshing- Concatenate > Areas +**.

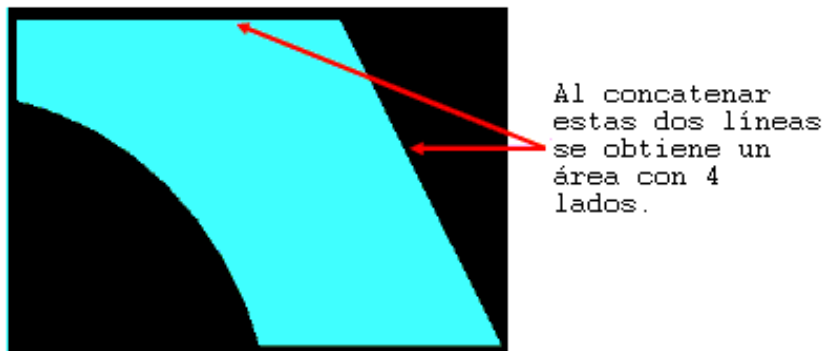


Figura 3.39 Operación Concatenation.

**Especificar los controles de tamaño y forma.** Este es el segundo paso del procedimiento de mallado mapeado de tres pasos. Seleccionar la forma es simple. En la ventana MeshTool, elija *Quad* en el apartado *Shape* para mallar un área y *Hex* en el apartado *Shape* para mallar un volumen, posteriormente haga clic en *Mapped* en el apartado *Mesher*.

Al especificar las divisiones de línea, figura 3.40, recuerde que:

- ✓ Las divisiones sobre lados opuestos deben ser iguales, pero sólo se necesita especificar un lado. El mallado mapeado automáticamente transfiere las divisiones para el lado opuesto.
- ✓ Si se tienen líneas concatenadas, las divisiones pueden ser aplicadas solo a las líneas de entrada originales, no a las líneas compuestas.

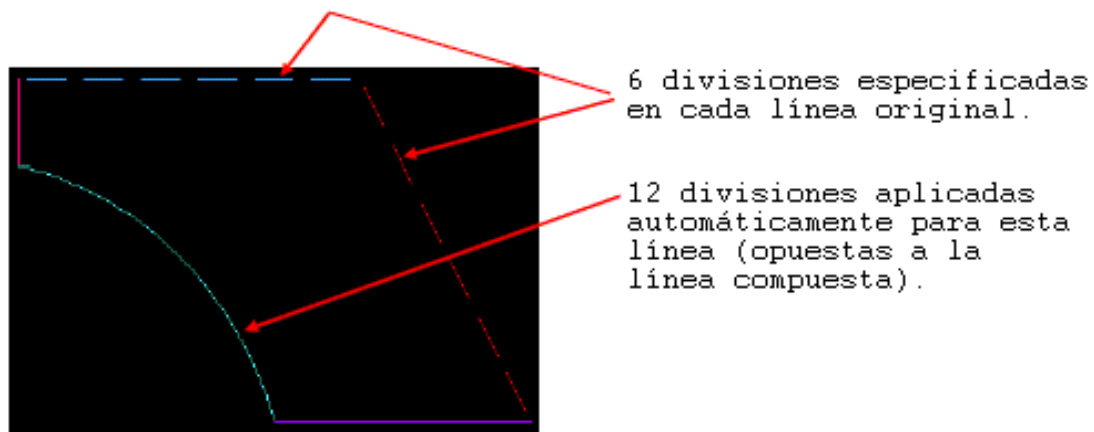


Figura 3.40 Divisiones de línea.

**Generar la malla mapeada.** Una vez que se han asegurado las formas regulares y asignado las divisiones apropiadas, generar la malla es fácil (figura 3.41). Solo oprima el botón *Mesh* en la ventana MeshTool, después presione [Pick All] en el seleccionador o elija las entidades deseadas.

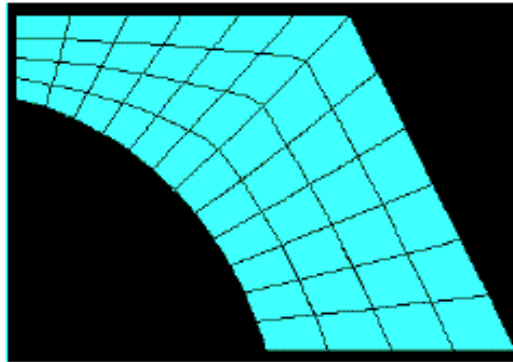


Figura 3.41 Malla mapeada.

### 3.3. APLICAR CARGA

El paso solución es donde se aplican las cargas sobre el objeto y permiten al programa calcular la solución mediante elemento finito. Las cargas están disponibles en el menú **ANSYS Main Menu > Preprocessor** o en el menú **ANSYS Main Menu > Solution**, figura 3.42.

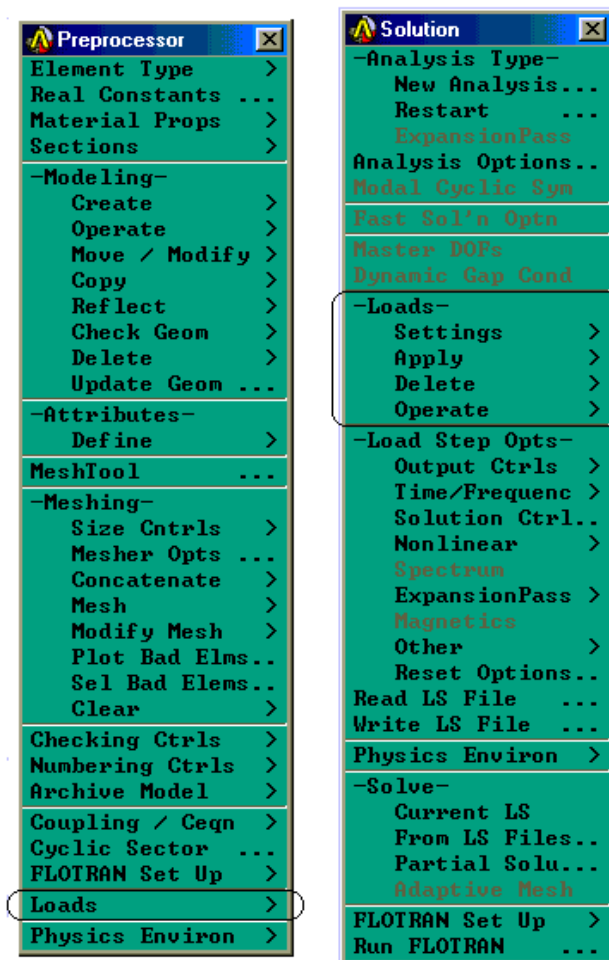


Figura 3.42 Menús desde donde se puede aplicar carga.

Hay cinco tipos de cargas, a saber:

1. **Limitaciones de grado de libertad.** Los valores especifican los grados de libertad, tales como desplazamientos en un análisis de esfuerzos o temperaturas en un análisis termal.
2. **Cargas concentradas.** Señala cargas, tales como fuerzas o niveles de flujo de calor.
3. **Cargas de superficie.** Cargas distribuidas sobre una superficie, tales como presiones o convección.
4. **Cargas de cuerpo.** Cargas volumétricas o de campo, tales como temperaturas (causando expansión termal) o generación interna de calor.
5. **Cargas de inercia.** Cargas debido a masa o inercia estructural, tales como gravedad y velocidad rotacional.

Es posible aplicar las cargas ya sea sobre un modelo sólido o directamente en el modelo FEA (nodos y elementos), ver figura 3.43.

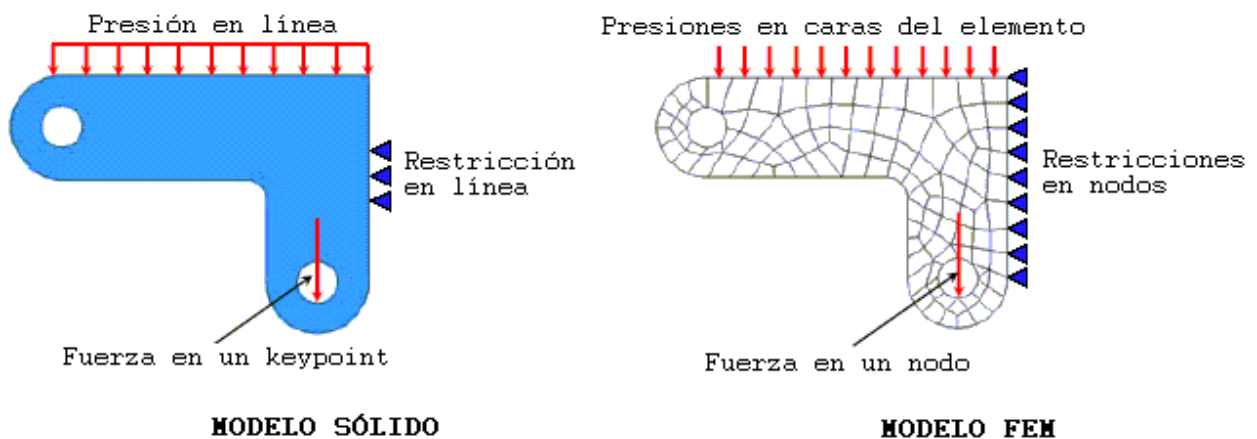


Figura 3.43 Modelo sólido y modelo FEA.

Las cargas en el modelo sólido son mas fáciles de aplicar debido a que hay menos entidades para seleccionar. Además, las cargas en el modelo sólido son independientes de la malla. No es necesario re aplicar las cargas si se cambia la malla.

Sin tener en cuenta como se apliquen las cargas, ANSYS espera que todas las cargas estén en términos del modelo de elemento finito. Por lo tanto, las cargas en el modelo sólido son transferidas automáticamente a los nodos y elementos fundamentales durante la solución.

A continuación se discutirán como aplicar los tipos de carga estructural:

**Limitaciones de desplazamiento.** Se usa para especificar en donde el modelo esta fijo (posición cero de desplazamiento). También puede ser diferente de cero, para simular una deflexión conocida. Para aplicar limitaciones de desplazamiento utilice el menú ANSYS Main Menu > Solution > -Loads- Apply > -Structural- Displacement >, figura 3.44. O use la familia D de comandos: *DK, DL, DA, D*.

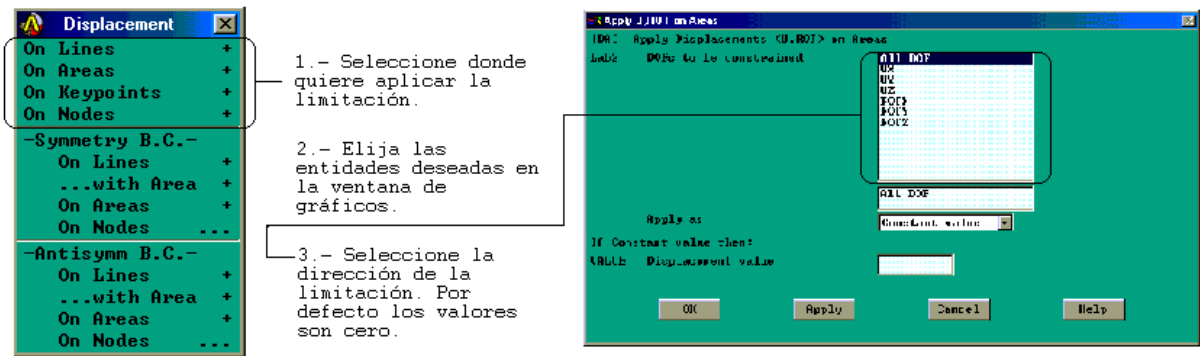


Figura 3.44 Limitaciones de desplazamiento.

**Presiones.** Para aplicar una presión utilice el menú ANSYS Main Menu > Solution > -Loads- Apply > -Structural- Pressure >, figura 3.45. O use la familia SF de comandos: *SFL, SFA, SFE, SF*.

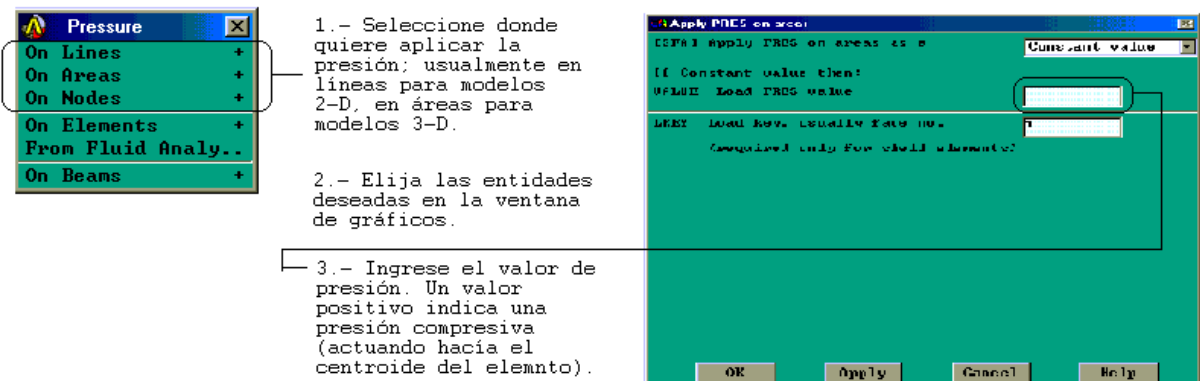


Figura 3.45 Procedimiento para aplicar presión.

Para un modelo 2-D, donde la presión se aplica usualmente sobre la línea, es posible especificar una presión escalonada al introducir un valor para los finales  $I$  y  $J$  de la línea, figura 3.46.  $I$  y  $J$  son determinadas por la dirección de línea. Si nota que la flecha va en dirección equivocada, simplemente reaplique la presión con los valores invertidos.

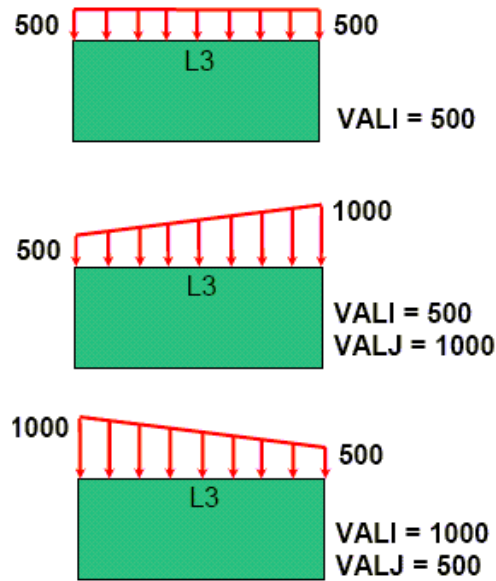


Figura 3.46 Presión escalonada o graduada.

**Gravedad.** Para aplicar aceleración gravitacional utilice le menú **ANSYS Main Menu > Solution > -Loads- Apply > -Structural- Gravity...**, figura 3.47, o use el comando *ACEL*.

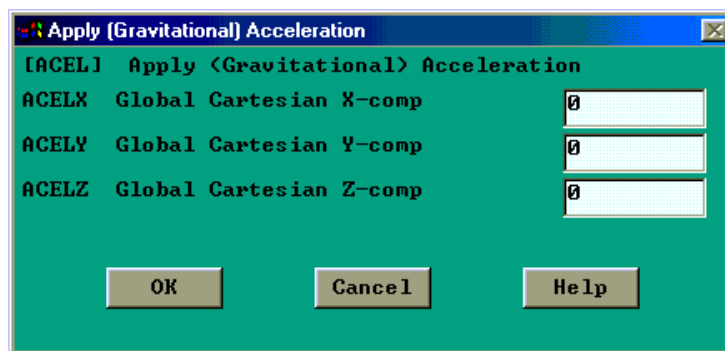


Figura 3.47 Ventana Apply (Gravitational) Acceleration.

**NOTA:** Un valor de aceleración *positivo* causa deflexión en la dirección *negativa*. Si  $Y$  esta señalando hacia arriba, por ejemplo, un valor positivo *ACELY* provoca que la estructura se mueva hacia abajo.



**Modificando y eliminando cargas.** Para modificar un valor de carga, simplemente reaplique la carga con el nuevo valor. Para eliminar una carga utilice el menú **ANSYS Main Menu > Solution > -Loads- Delete>**, figura 3.48. Cuando se eliminan cargas de un modelo sólido, ANSYS elimina automáticamente todas las cargas del elemento finito correspondiente.



Figura 3.48 Ventana Delete.

### 3.4. RESOLVER

El paso siguiente es donde se permite al programa calcular la solución de elemento finito. Primero, es una buena idea revisar y verificar los datos del análisis, por ejemplo:

- ✓ Unidades compatibles.
- ✓ Opciones de tipos de elemento y constantes reales.
- ✓ Propiedades del material.
- ✓ Densidad si hay carga de inercia.
- ✓ Coeficiente de expansión termal si hay esfuerzos termales.

- ✓ Densidad de malla, específicamente en regiones de concentración de esfuerzos.
- ✓ Valores y direcciones de carga.
- ✓ Temperatura de referencia para expansiones termales.

Para iniciar la solución primero guarde la base de datos. Después, utilice el menú ANSYS **Main Menu > Solution > -Solve- Current LS**, figura 3.49, o use el comando *SOLVE*.

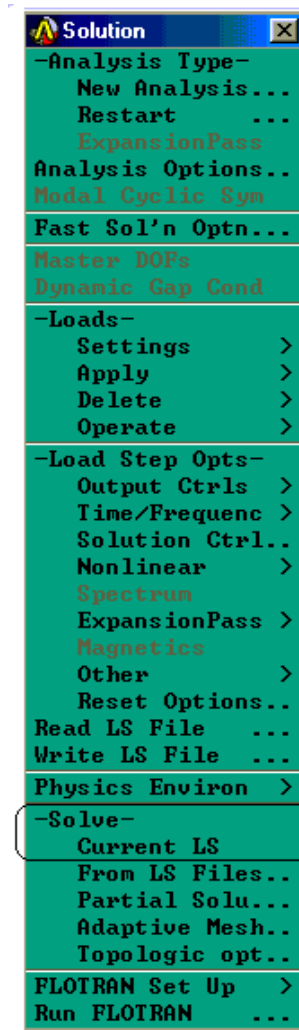


Figura 3.49 Ventana Solution.

ANSYS escribe los resultados de datos en la memoria de la base de datos y el archivo de resultados, *jobname.rst* (.rth, .rmg, .rfl).

### 3.5. REVISIÓN DE RESULTADOS

El postproceso es sin duda el paso mas importante en un análisis. Se puede requerir que se tomen decisiones de diseño basadas en los resultados, así que es una buena idea no solo revisar los resultados cuidadosamente, sino también verificar la validez de la solución.

ANSYS tiene dos postprocesadores:

1. El postprocesador general, **POST1**, se usa para revisar un juego sencillo de resultados sobre el modelo completo.
2. El postprocesador tiempo-historia, **POST26**, se usa para revisar resultados en puntos seleccionados en el modelo sobre tiempo. Se usa principalmente para análisis transitorios y no lineales.

La revisión de resultados de análisis de esfuerzos comprende generalmente:

**Forma deformada.** Da una indicación rápida sobre si las cargas se aplicaron en la dirección correcta. En la columna leyenda muestra el máximo desplazamiento, DMX. Es posible animar la deformación. Para mostrar la forma deformada utilice el menú **ANSYS Main Menu > General Postproc > Plot Results > Deformed Shape**, figura 3.50, o use el comando **PLDISP**. Para animar utilice el menú **Utility Menu > PlotCtrls > Animate > Deformed Shape...**, o use el comando **ANDISP**.

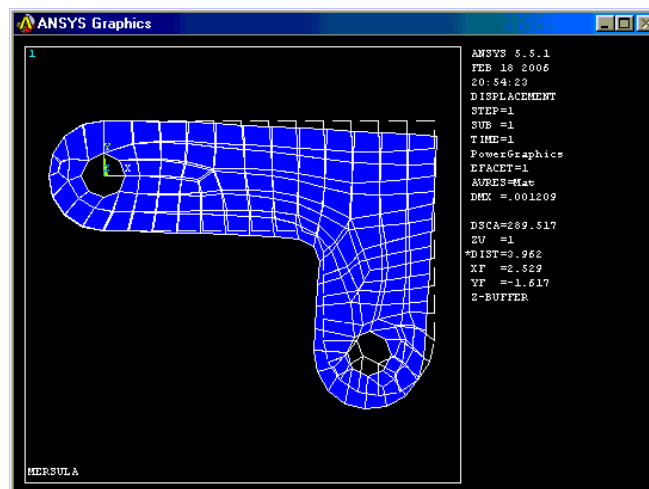


Figura 3.50 Forma deformada.

**Esfuerzos.** Los siguientes esfuerzos están típicamente disponibles para modelos sólidos 3-D:

- ✓ *Esfuerzos componentes.* SX, SY, SZ, SXY, SYZ, SXZ (direcciones cartesianas globales por defecto).
- ✓ *Esfuerzos principales.* S1, S2, S3, SEQV (von Mises), SINT (intensidad de esfuerzo).

Los cuales permiten localizar rápidamente “*puntos críticos*” o regiones problemáticas.

- ✓ *Solución Nodal.* Los esfuerzos son promediados en los nodos, mostrando sin problema perfiles continuos.
- ✓ *Solución Elemento.* No promedia esfuerzos, dando como resultado perfiles discontinuos.

Para mostrar niveles de esfuerzos utilice el menú **ANSYS Main Menu > General Postproc > Plot Results**, o utilice el comando ***PLNSOL*** para “*solución nodal*” o ***PLESOL*** para “*solución elemento*”. También es posible animar perfiles de esfuerzo por medio del menú **Utility Menu > PlotCtrls > Animate > Deformed Results...**, figura 3.51, o use el comando ***ANCNTR***.



Figura 3.51 Nivel de esfuerzo animado.

**Fuerzas de reacción.** La suma de las fuerzas de reacción en cada dirección debe igualar la suma de las cargas aplicadas en esa dirección. Los resultados pueden ser observados en una lista mediante el menú **ANSYS Main Menu > General Postproc > List Results > Reaction Solution...**, o utilizando el comando **PRRSOL**.

### 3.6. VERIFICANDO LA VALIDEZ DE SOLUCIÓN

Es siempre una buena idea hacer una “*verificación sensata*” para asegurarse que la solución es aceptable. Lo que se necesita verificar depende del tipo de problema que se resolvió, ello genera algunas preguntas típicas:

✓ *¿Las fuerzas de reacción equilibran las fuerzas aplicadas?*

✓ *¿Dónde se localiza el esfuerzo máximo?*

Si esta es una singularidad, tal como un punto de carga o una esquina de reentrada, el valor es generalmente sin sentido.

✓ *¿Están los valores de esfuerzo mas allá del limite elástico?*

Si es así, las magnitudes de carga pueden estar equivocadas, o puede necesitar hacer un análisis no lineal.

✓ *¿Es adecuada la malla?*

Esto es siempre debatible, pero es posible ganar confianza en la malla al usar datos de estimación de error.

Otras maneras de verificar la adecuación de la malla son:

✓ Plotear el elemento solución (esfuerzos no promediados) y buscar elementos con gradiente de esfuerzo alto. Estas regiones son candidatas para refinar la malla.

✓ Si hay una diferencia significativa entre los perfiles de esfuerzos nodal (promediado) y elemento (no promediado), la malla puede ser demasiado gruesa.

## CAPÍTULO 4

### EJEMPLOS DE APLICACIÓN

#### 4.1. VIGA EN VOLADIZO

El siguiente problema servirá para dar una introducción al programa ANSYS mediante un ejemplo 2-D sencillo. Se trata de modelar una viga en voladizo (pequeña), hecha de silicio, con una carga aplicada en su extremo libre.

##### 4.1.1. ESPECIFICACIÓN DEL PROBLEMA

**Disciplina:** Estructural.

**Tipo de análisis:** Estático lineal.

**Tipo de elemento usado:** PLANE42.

**Características ANSYS demostradas:** modelado sólido incluyendo primitivos; carga de presión graduada; exhibir forma deformada y esfuerzos; listado de fuerzas de reacción.

##### 4.1.2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Este ejemplo es un análisis estático lineal de una viga en voladizo. Uno de sus extremos está restringido, mientras que el otro está libre. Una sola fuerza puntual de 50 N se aplica en el centro del extremo libre en la dirección mostrada. La viga tiene las dimensiones y propiedades que se muestran en la figura 4.1.

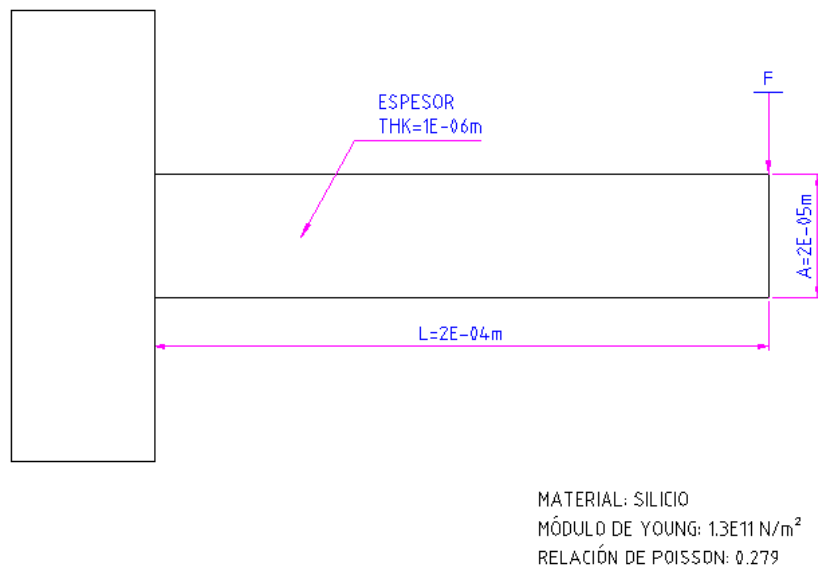


Figura 4.1 Dibujo y propiedades de la viga.

### 4.1.3. PREPROCESO

El preproceso es donde se definen el tipo y las opciones del análisis (nombre de trabajo, unidades empleadas, tipo de elemento y sus opciones, constantes reales, propiedades del material, etc.), crear o importar la geometría y mallarla.

#### *Asignar nombre de trabajo.*

- Seleccione **Utility Menu > File > Change Jobname...**
- Se abrirá la ventana de dialogo *Change Jobname*, figura 4.2.
- Introducir *VIGA* en el apartado *[/FILNAM] Enter new jobname*. El jobname por default es “file.db” si no se especifica otra cosa.
- Seleccione *OK* para aceptar el nuevo jobname y cerrar la ventana de dialogo.

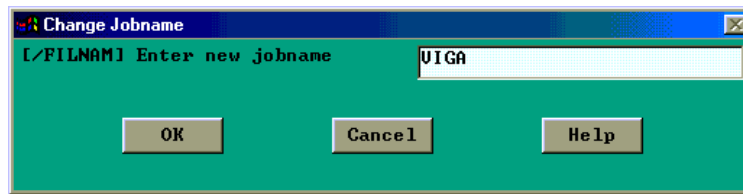


Figura 4.2 Ventana Change Jobname.

#### *Asignar título.*

Este paso no es necesario para el análisis, pero ayuda en la documentación del trabajo. El título aparecerá en todas las representaciones gráficas y será incluido en la salida de la solución.

- Seleccione **Utility Menu > File > Change Title...**
- Se abrirá la ventana de dialogo *Change Title*, figura 4.3.
- Introducir *VIGA EN VOLADIZO* en el apartado *[/TITLE] Enter new title*.
- Seleccione *OK* para aceptar el título y cerrar la ventana de dialogo.

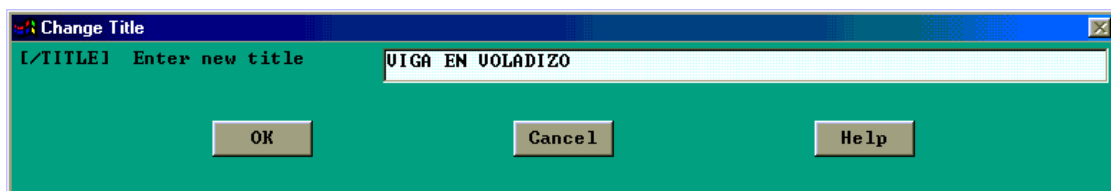


Figura 4.3 Ventana Change Title.

### *Seleccionar tipo de análisis.*

- a. Seleccione **ANSYS Main Menu > Preprocessor > Loads > -Analysis Type- New Analysis...**
- b. Se abrirá la ventana de dialogo *New Analysis*, figura 4.4.
- c. Seleccione la opción *Static* en el apartado *[ANTYPE] Type of analysis*.
- d. Seleccione *OK* para aceptar el tipo de análisis y cerrar la ventana de dialogo.

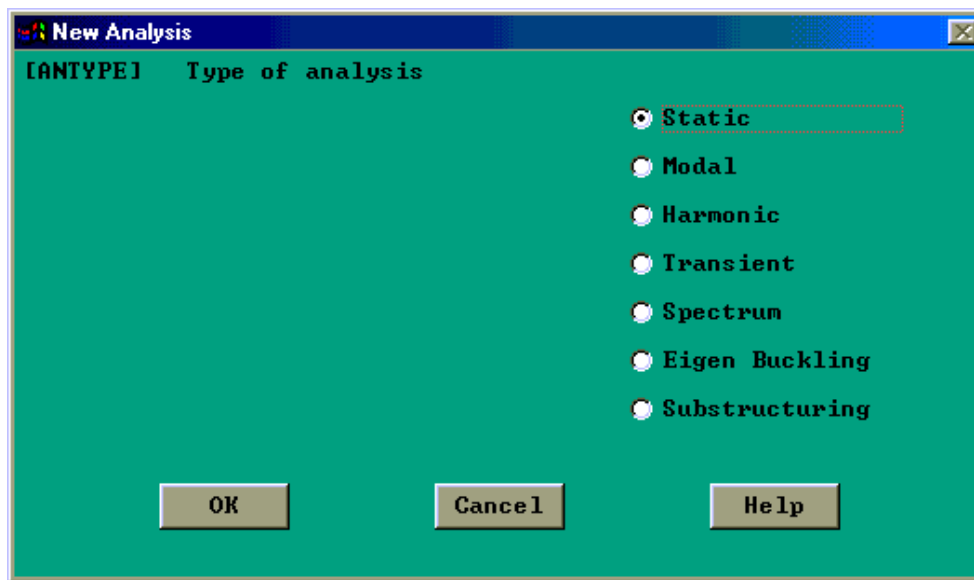


Figura 4.4 Ventana New Analysis.

### *Seleccionar preferencias.*

Las preferencias permiten que se elija la disciplina de ingeniería (estructural, térmica, electromagnético, etc.) para filtrar los comandos innecesarios de las opciones del menú.

- a. Seleccione **ANSYS Main Menu > Preferences...**
- b. Se abrirá la ventana de dialogo *Preferences for GUI Filtering*, figura 4.5.
- c. Seleccione la opción *Structural* en el apartado *Individual discipline<s> to show in the GUI*. Dejar las otras opciones tal como están.
- d. Seleccione *OK* para aceptar y cerrar la ventana de dialogo.



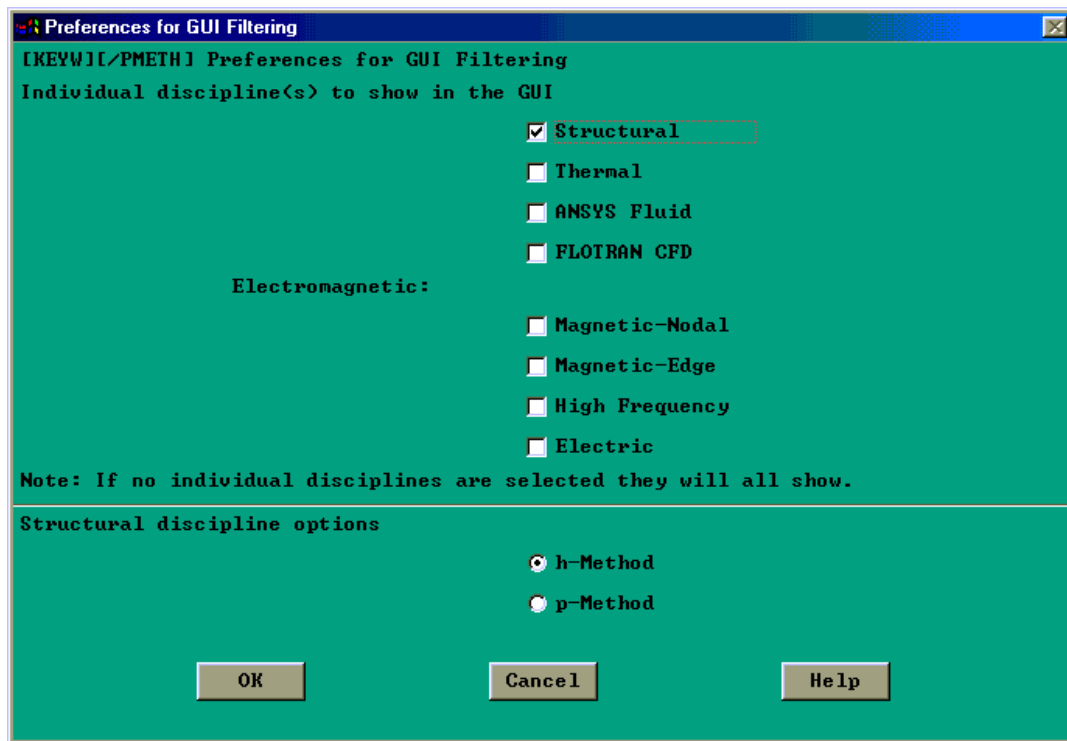


Figura 4.5 Ventana Preferences for GUI Filtering.

### *Seleccionar unidades.*

ANSYS no especifica que unidades se van a utilizar y es opcional al usuario si desea especificar las unidades. En este caso las unidades serán SI.

**Teclear:** `/UNITS,SI` en la ventana ANSYS Input, figura 4.6.

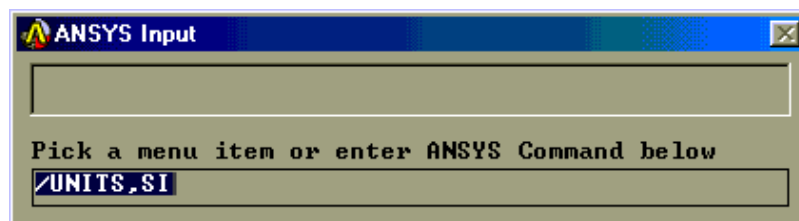


Figura 4.6 Ventana ANSYS Input.

Este comando no esta disponible mediante menú. Al presionar ↵, el comando `/UNITS,SI` se almacena en el búfer de memoria de la ventana ANSYS Input, figura 4.7.

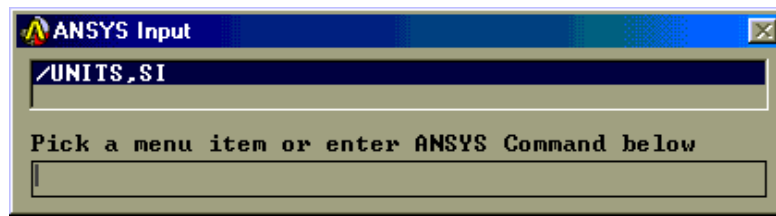


Figura 4.7 Comando /UNITS,SI almacenado.

### ***Definir tipo de elemento y sus opciones.***

En cualquier análisis se debe seleccionar de la librería de tipos de elemento, el más apropiado para el análisis. El tipo de elemento determina los grados-de-libertad (desplazamientos, rotaciones, temperatura, etc.), la forma del elemento (línea, cuadrilátero, ladrillo [BRICK], etc.) y si el elemento es 2D o 3D. Muchos tipos de elemento también tienen opciones adicionales para especificar el comportamiento del elemento y suposiciones del análisis.

Para este problema se seleccionará el elemento estructural 2-D (***PLANE42***). Para un resultado más exacto, se puede utilizar un elemento de orden (***PLANE82***). En este problema, se debe seleccionar esfuerzo plano con espesor (***Plane Stress with Thickness***) como opción para PLANE42. El espesor del elemento será definido como constante real (***Real Constant***).

- Seleccione **ANSYS Main Menu > Preprocessor > Element Type > Add/Edit/Delete...**
- Se abrirá la ventana de dialogo ***Element Types***, figura 4.8.
- Seleccione ***Add...*** para definir el tipo de elemento.

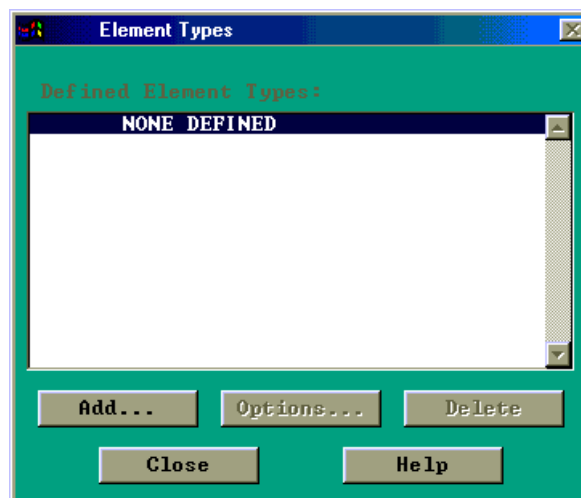


Figura 4.8 Ventana Element Types.

- d. Se abrirá la ventana de dialogo *Library of Element Types*, figura 4.9.
- e. Seleccione del apartado *Library of Element Types* la opción *Structural Solid* y *Quad 4node 42*.
- f. Seleccione *OK* para aceptar el tipo de elemento y cerrar la ventana de dialogo.

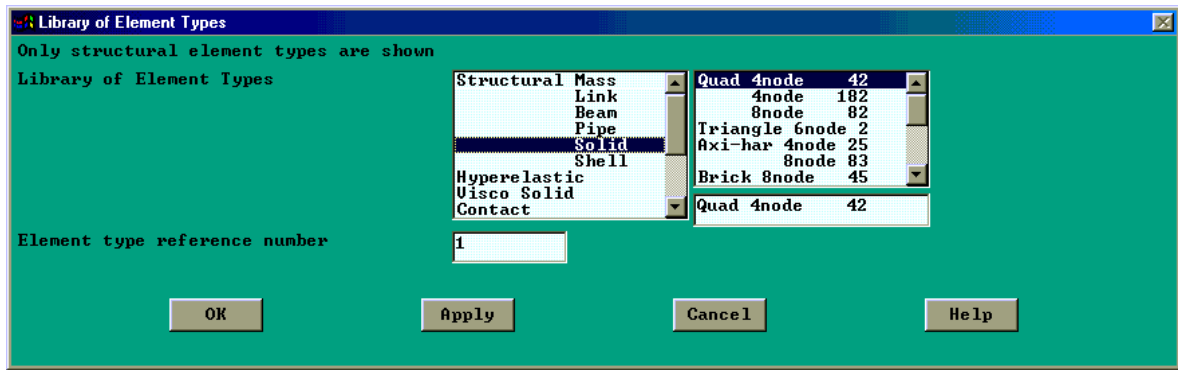


Figura 4.9 Ventana Library of Element Types.

- g. Se abrirá la ventana de dialogo *Element Types*, figura 4.10.
- h. Seleccione *Options...* para definir las opciones para el elemento PLANE42.

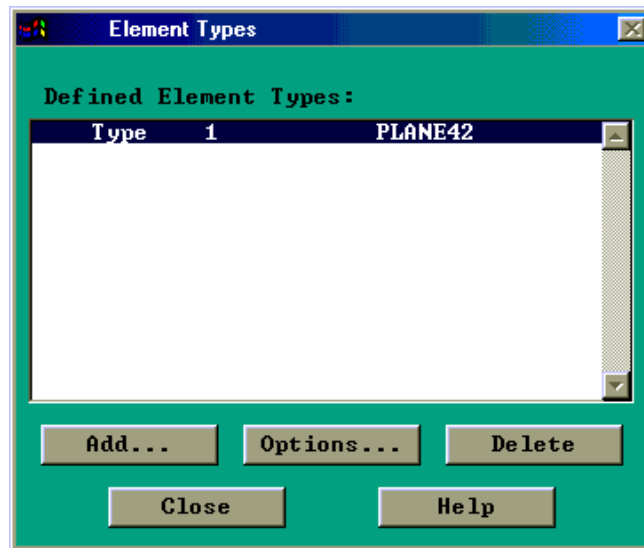


Figura 4.10 Ventana Element Types.

- i. Se abrirá la ventana de dialogo *PLANE 42 element type options*, figura 4.11.
- j. Seleccione del apartado *Element behavior (comportamiento del elemento)* *K3* la opción *Plane Stress with Thickness (Plane strs w/thk)*.
- k. Seleccione *OK* para aceptar las opciones y cerrar la ventana de dialogo.

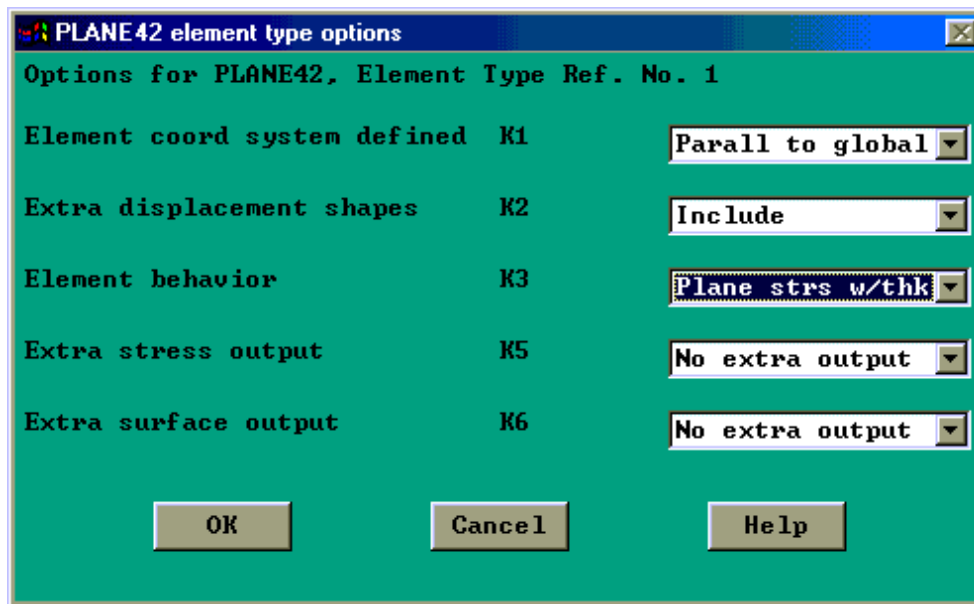


Figura 4.11 Ventana PLANE 42 element type options.

### ***Definir constantes reales.***

Las constantes reales son parámetros que proporcionan información adicional de la geometría para cada tipo de elemento, debido a que la geometría no se define completamente por las localizaciones de sus nodos. Por ejemplo, el espesor de placa para elementos tipo **SHELL** (*carcasa*) y las características de la sección transversal para los elementos tipo **BEAM** (*viga*).

Para este problema en particular, debido a que se asumió un estado de esfuerzo plano con espesor, el espesor se debe definir como constante real para el elemento PLANE42.

- a. Seleccione ***ANSYS Main Menu > Preprocessor > Real Constants...***
- b. Se abrirá la ventana de dialogo *Real Constants*, figura 4.12.
- c. Seleccione *Add...* Para añadir un conjunto de constantes reales.

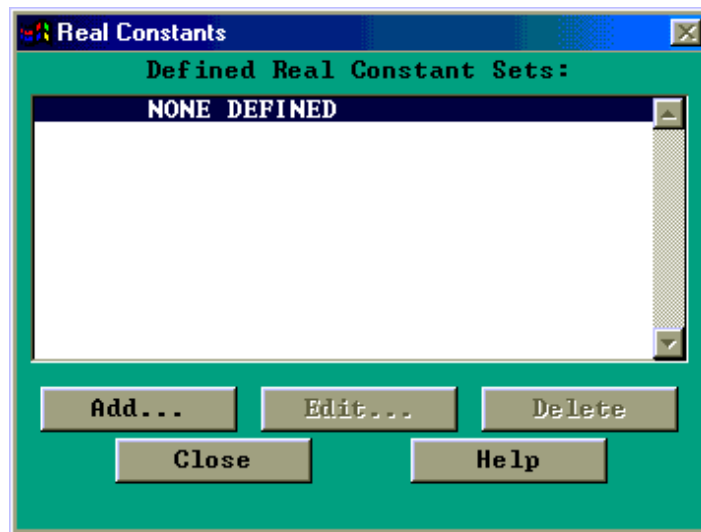


Figura 4.12 Ventana Real Constants.

- d. Se abrirá la ventana de dialogo *Element Type for Real Constants*, figura 4.13.
- e. Seleccione *Type 1 PLANE42* y presione *OK*.

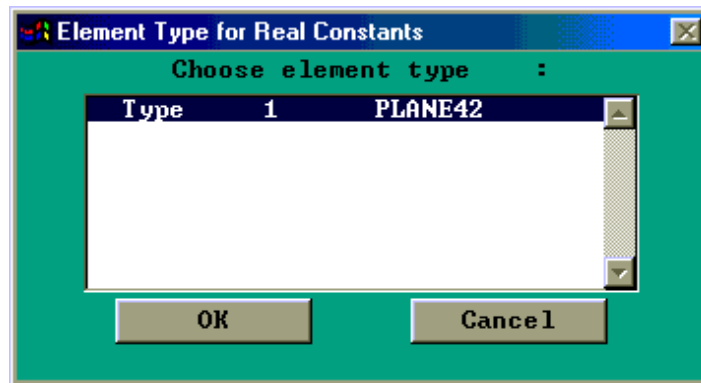


Figura 4.13 Ventana Element Type for Real Constants.

- f. Se abrirá la ventana de dialogo *Real Constant Set Number 1, for PLANE42*; figura 4.14.
- g. Introducir  $1.0E-6$  en el apartado *Thickness (espesor) THK*.
- h. Seleccione *OK* para aceptar la constante y cerrar la ventana de dialogo.

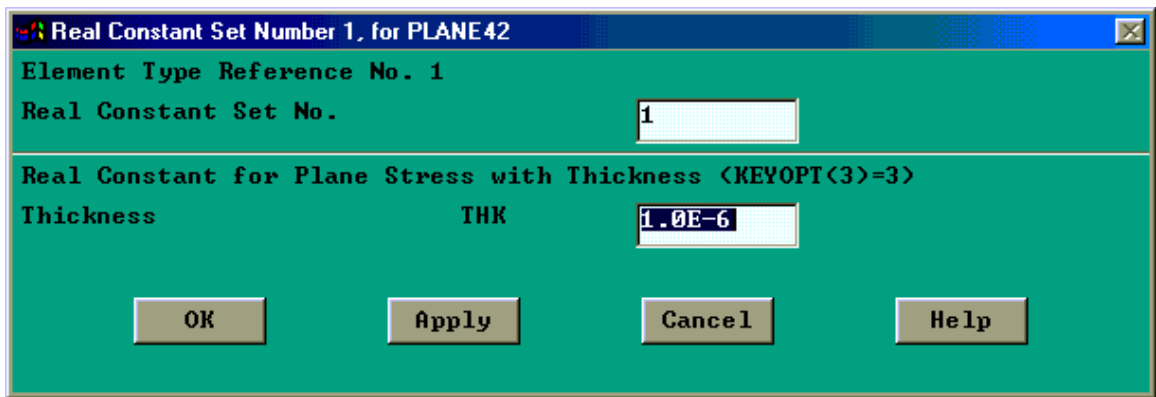


Figura 4.14 Ventana Real Constant Set Number 1, for PLANE42.

- i. Se abrirá la ventana de dialogo *Real Constants*, figura 4.15.
- j. Seleccione *Close* para cerrar la venta *Real Constants*.

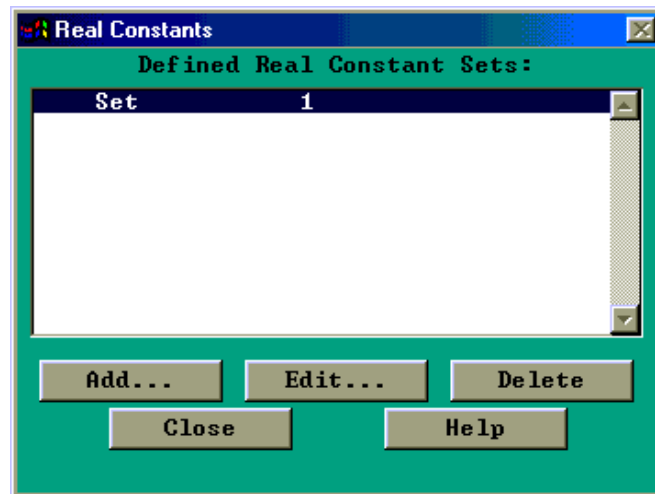


Figura 4.15 Ventana Real Constants.

### ***Definir propiedades del material.***

Las propiedades del material son características constitutivas de los materiales tales como el módulo de Young, la relación de Poisson, la densidad, etc.; (son independientes de la geometría). Dependiendo del análisis, las propiedades del material pueden ser lineares, no lineares, y/o anisotrópicas.

Para este problema, hay dos propiedades del material que son necesarias para el análisis: ***el módulo de Young y la relación de Poisson.***

- a. Seleccione ANSYS Main Menu > Preprocessor > Material Props > -Constant- Isotropic...
- b. Se abrirá la ventana de dialogo *Isotropic Material Properties*, figura 4.16.
- c. Seleccione *OK* para definir el material *1*.

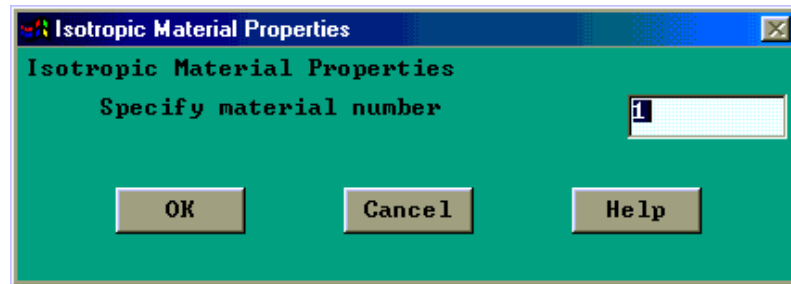


Figura 4.16 Ventana Isotropic Material Properties.

- d. Se abrirá la ventana de dialogo *Isotropic Material Properties*, figura 4.17.
- e. Introducir  $1.3E11$  en el apartado *Young's modulus EX* e introducir  $0.279$  en el apartado *Poisson's ratio <minor> NUXY*.
- f. Seleccione *OK* para aceptar las propiedades y cerrar la ventana de dialogo.

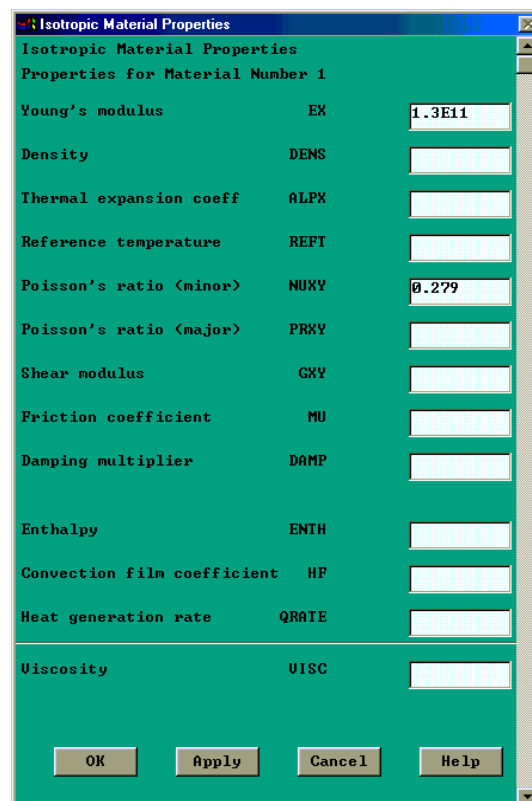


Figura 4.17 Ventana Isotropic Material Properties.

### ***Salvar la base de datos.***

Salvar la base de datos que se ha creado hasta ahora en el archivo *VIGA.db*. Para salvar la base de datos seleccione de la ventana *ANSYS Toolbar* el icono *SAVE\_DB*, figura 4.18.

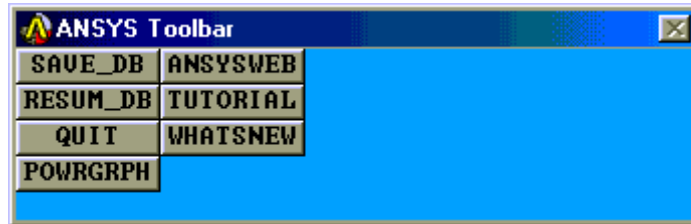


Figura 4.18 Ventana ANSYS Toolbar.

### ***Mover el sistema global de coordenadas.***

Antes de crear la geometría, el símbolo del sistema global de coordenadas se puede mover desde el origen a la esquina inferior izquierda de la ventana de gráficos de modo que no interfiera con la visualización del keypoint y del nodo en el origen.

- a. Seleccione **Utility Menu > PlotCtrls > Window Controls > Window Options...**
- b. Se abrirá la ventana de dialogo *Window Options*, figura 4.19.
- c. Para la opción *[/TRIAD] Location of triad*, seleccione *At bottom left*.
- d. Seleccione *OK* para aceptar el movimiento y cerrar la ventana de dialogo.



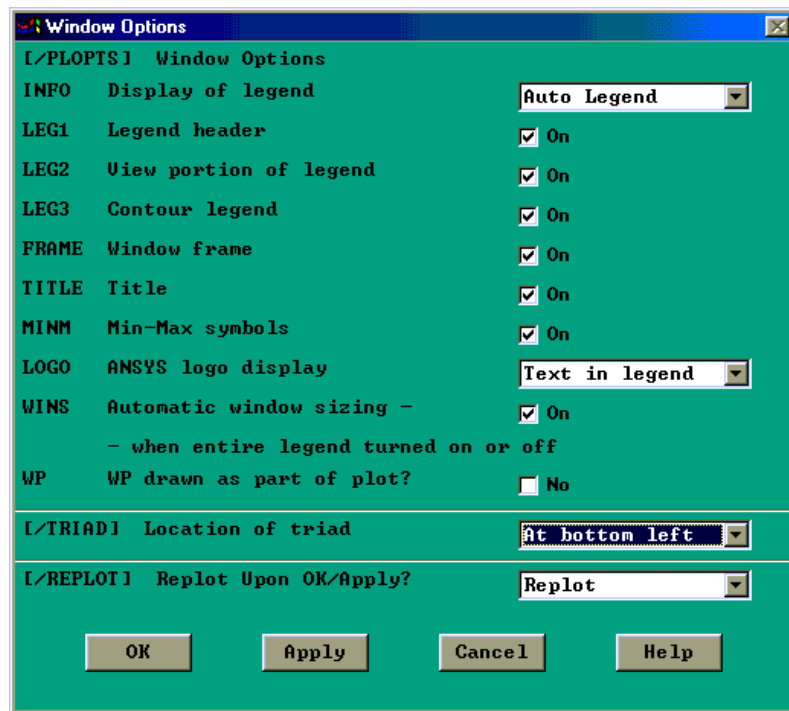


Figura 4.19 Ventana Window Options.

- e. En la ventana *ANSYS Graphics*, figura 4.20, se visualiza el símbolo del sistema global de coordenadas en la esquina inferior izquierda.

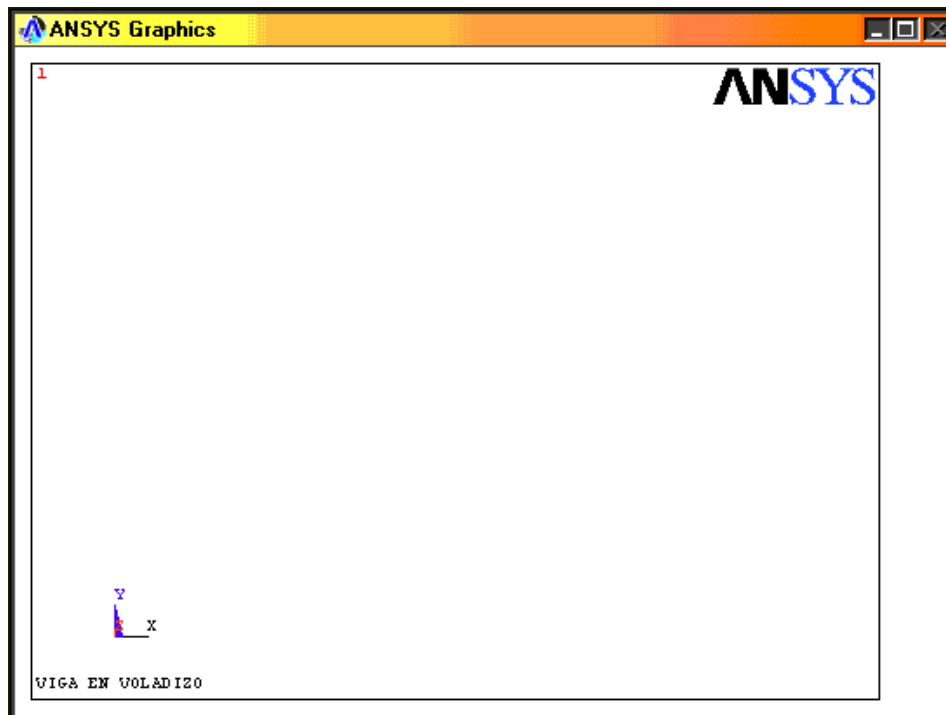


Figura 4.20 Ventana ANSYS Graphics mostrando el símbolo del sistema global de coordenadas.

### Crear geometría.

Hay varias maneras de crear la geometría del modelo con ANSYS. Por ejemplo: modelado de sólidos y la generación directa. Para este problema, la geometría será generada usando la técnica de modelado de sólidos. El primer paso es reconocer que la viga es solo un rectángulo. Hay formas geométricas predefinidas simples disponibles en ANSYS llamadas primitivas. La geometría primitiva rectángulo, por ejemplo, define las siguientes entidades del modelo sólido en un solo paso: un área, cuatro líneas y cuatro keypoints.

- Seleccione **ANSYS Main Menu > Preprocessor > -Modeling- Create > -Areas- Rectangle > By Dimensions...**
- Se abrirá la ventana de dialogo *Create Rectangle by Dimensions*, figura 4.21.
- Introducir  $0$  y  $2E-4$  en el apartado *X1,X2 X-coordinates*, respectivamente. Introducir  $0$  y  $2E-5$  en el apartado *Y1,Y2 Y-coordinates*, respectivamente.
- Seleccione *OK* para crear el rectángulo y cerrar la ventana de dialogo.

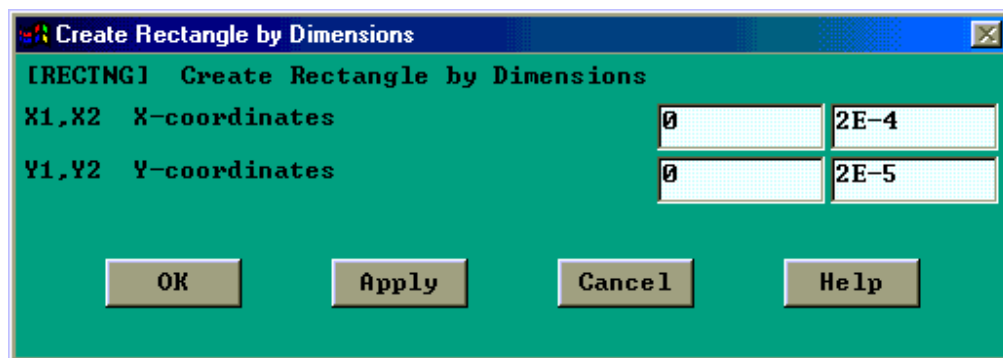


Figura 4.21 Ventana Create Rectangle by Dimensions.

- En la venta *ANSYS Graphics*, figura 4.22, se visualiza el rectángulo creado.

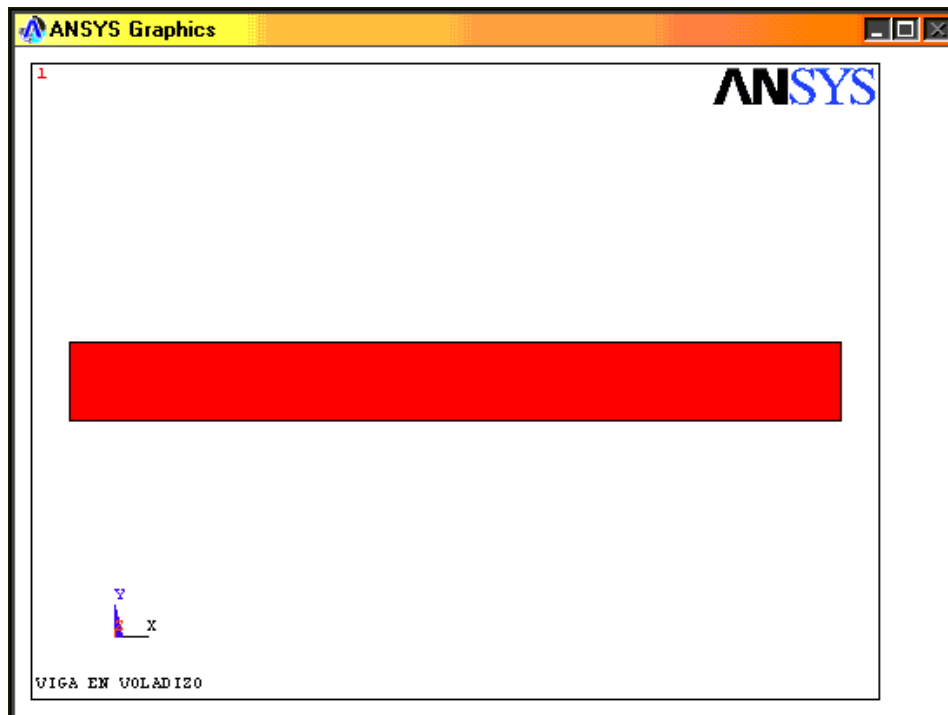


Figura 4.22 Ventana ANSYS Graphics mostrando el rectángulo creado.

***Salvar la base de datos como (MODELO.db).***

Salvar la base de datos creada hasta ahora a un archivo con un nombre que represente el modelo antes de mallarlo. En caso de que el modelo necesite re-mallarse, el análisis se puede leer desde esta base de datos.

- a. Seleccione ***Utility Menu > File > Save as...***
- b. Se abrirá la ventana de dialogo *Save DataBase*, figura 4.23.
- c. Introducir *MODELO.db* en el apartado *Save Database to*.
- d. Seleccione *OK* para salvar el archivo y cerrar la ventana de dialogo.

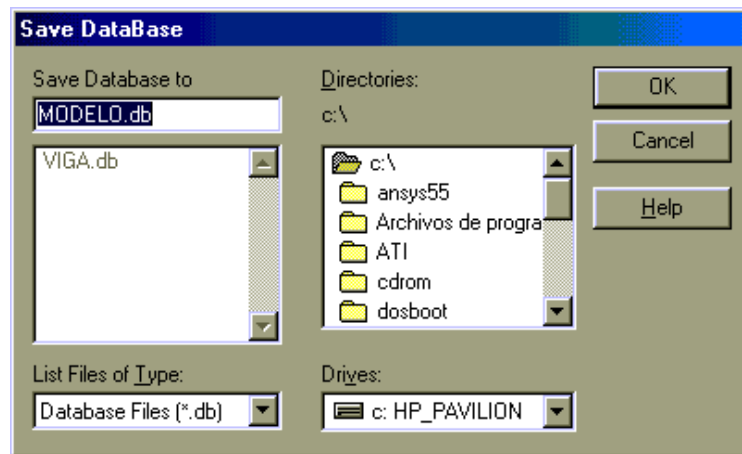


Figura 4.23 Ventana Save DataBase.

### ***Mallar el área.***

ANSYS tiene la característica de crear automáticamente la malla del modelo sin especificar ningún control del tamaño de la malla (tamaño por defecto). Si no queda claro cómo determinar la densidad de la malla, se puede comenzar usando el tamaño por defecto. En este problema, se especifica el tamaño global del elemento para controlar la densidad total de la malla.

- a. Seleccione **ANSYS Main Menu > Preprocessor > -Meshing- SizeCtrls > -Manual Size- -Global- Size...**
- b. Se abrirá la ventana de dialogo *Global Element Sizes*, figura 4.24.
- c. Introducir  $1E-5$  en el apartado *SIZE Element edge length*.
- d. Seleccione *OK* para definir el tamaño del elemento y cerrar la ventana de dialogo.

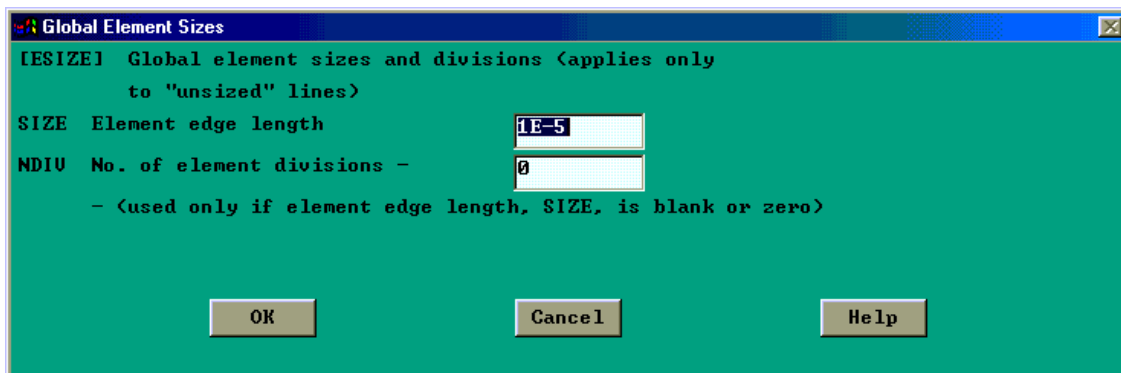


Figura 4.24 Ventana Global Element Sizes.

- e. Seleccione *ANSYS Main Menu > Preprocessor > -Meshing- Mesh > -Areas- Free +*
- f. Se abrirá la ventana de dialogo *Mesh Areas*, figura 4.25.
- g. Seleccione *Pick All* para seleccionar todas las áreas.

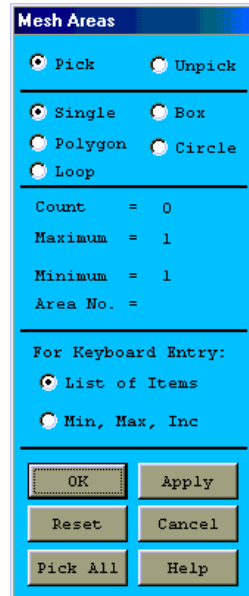


Figura 4.25 Ventana Mesh Areas.

- h. En la venta *ANSYS Graphics*, figura 4.26, se visualiza la malla generada.

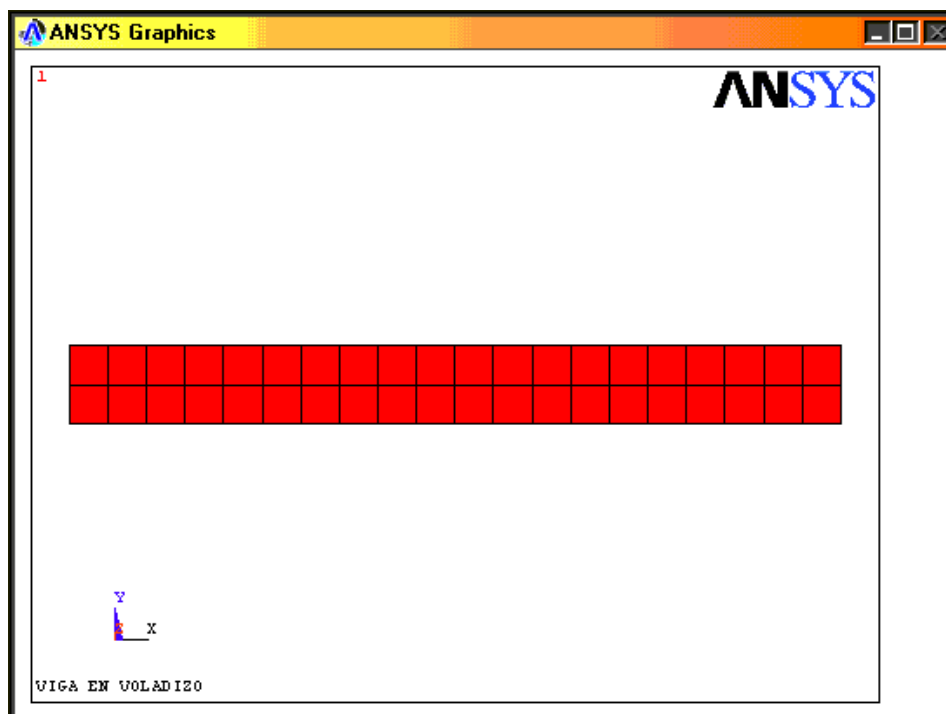


Figura 4.26 Ventana ANSYS Graphics mostrando la malla generada.

**Salvar la base de datos como (MALLA.db).**

Salvar la base de datos creada hasta ahora a un archivo con un nombre que represente la malla.

- Seleccione **Utility Menu > File > Save as...**
- Se abrirá la ventana de dialogo *Save DataBase*, figura 4.27.
- Introducir *MALLA.db* en el apartado *Save Database to*.
- Seleccione *OK* para salvar el archivo y cerrar la ventana de dialogo.

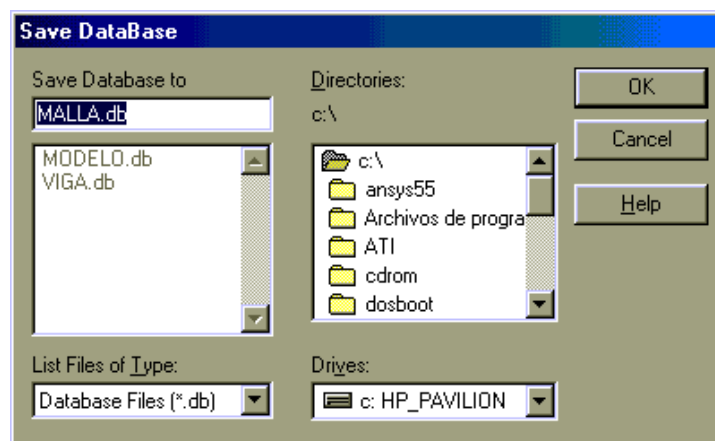


Figura 4.27 Ventana Save DataBase.

#### 4.1.4. SOLUCIÓN

En este paso se definen el tipo y las opciones del análisis (realizado al principio de la fase de preproceso de este ejemplo), aplicar cargas y las opciones de la carga, e iniciar la solución del elemento finito. Todas las restricciones de desplazamientos y cargas se aplican a los nodos. Sin embargo, hay métodos en ANSYS para aplicarlos inicialmente a los primitivos geométricos y ANSYS transferirá automáticamente las restricciones o las cargas a los nodos.

***Aplicar restricciones a los desplazamientos.***

- Seleccione **ANSYS Main Menu > Solution > -Loads- Apply > -Structural- Displacement > On Nodes +**
- Se abrirá la ventana de dialogo *Apply U,ROT on Nodes*, figura 4.28.

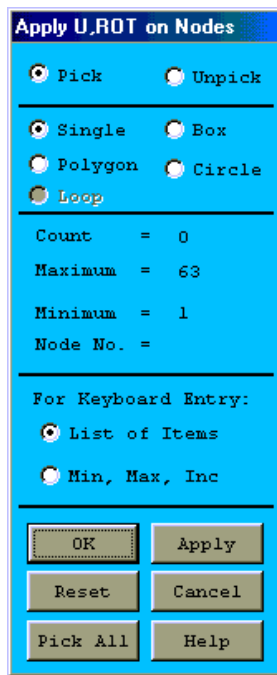


Figura 4.28 Ventana Apply U,ROT on Nodes.

- c. En la ventana *ANSYS Graphics* use el botón izquierdo del mouse para seleccionar el nodo del centro en el extremo izquierdo de la viga. Un círculo pequeño aparecerá alrededor del nodo seleccionado, figura 4.29.

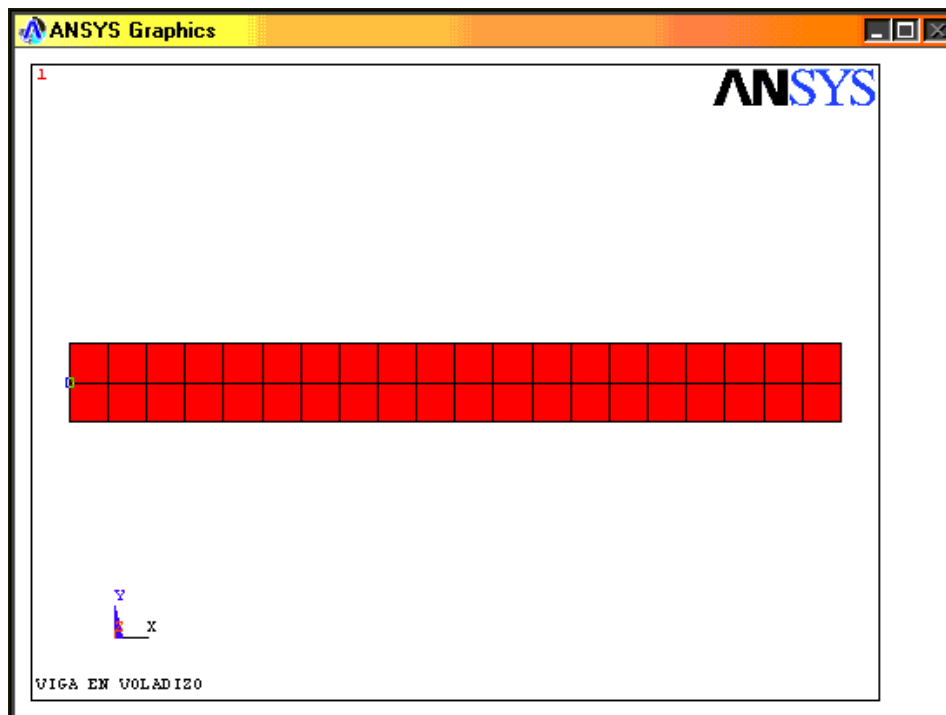


Figura 4.29 Ventana ANSYS Graphics mostrando el nodo seleccionado.

- d. Seleccione *OK* en la figura 4.28 para definir la restricción en el nodo seleccionado.
- e. Se abrirá la ventana de dialogo *Apply U,ROT on Nodes*, figura 4.30.
- f. Seleccione *All DOF* en el apartado *Lab2 DOFs to be constrained*.
- g. Introduzca *0* en el apartado *VALUE Displacement value*.
- h. Seleccione *Apply* para aplicar la restricción y continuar.

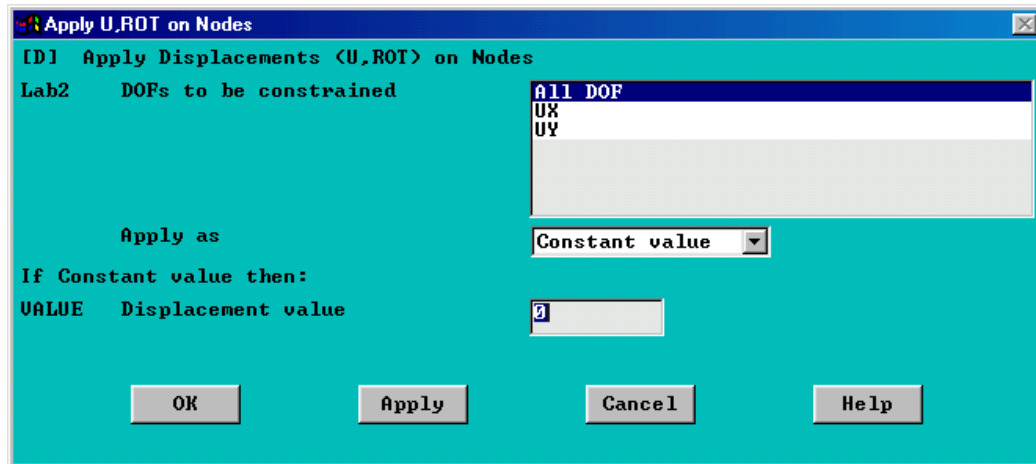


Figura 4.30 Ventana Apply U,ROT on Nodes.

- i. En la ventana *ANSYS Graphics*, figura 4.31, se visualiza la restricción aplicada.

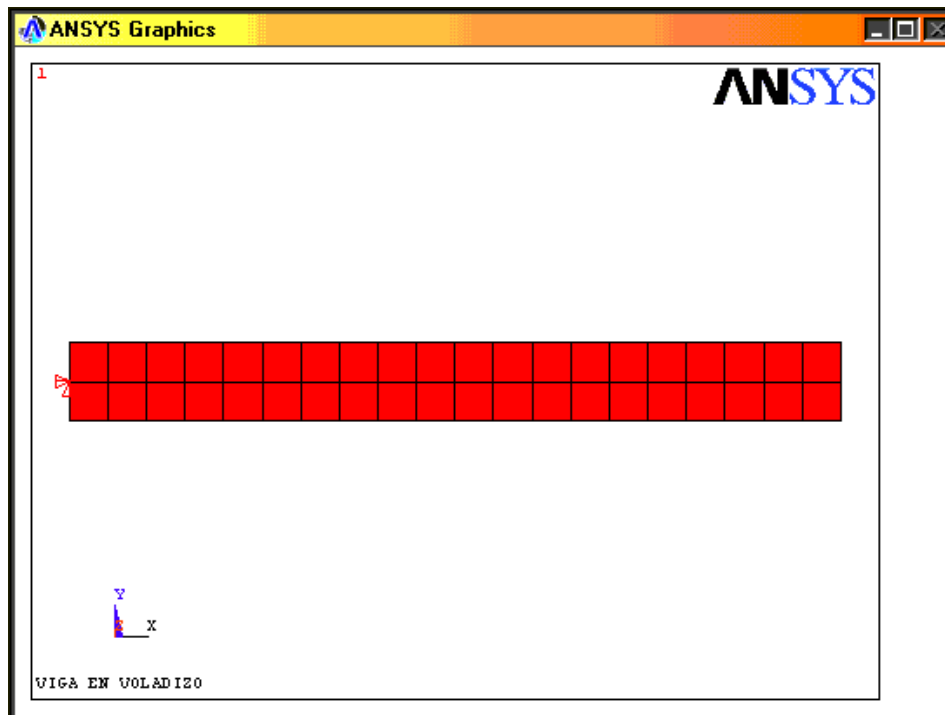


Figura 4.31 Ventana ANSYS Graphics mostrando la restricción aplicada.



- j. En la ventana *ANSYS Graphics* use el botón izquierdo del mouse para seleccionar el resto de los nodos en el extremo izquierdo de la viga. Un círculo pequeño aparecerá alrededor de los nodos seleccionados, figura 4.32.

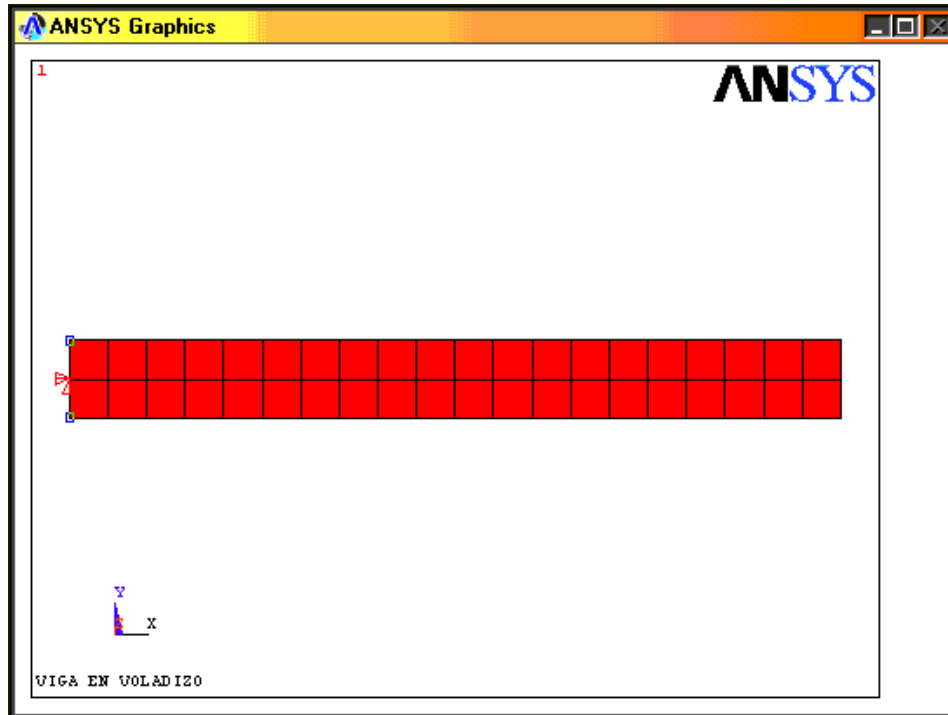


Figura 4.32 Ventana ANSYS Graphics mostrando los nodos seleccionados.

- k. Seleccione *OK* en la figura 4.28 para definir la restricción en los nodos seleccionados.
- l. Se abrirá la ventana de dialogo *Apply U,ROT on Nodes*, figura 4.33.
- m. Seleccione *UX* en el apartado *Lab2 DOFs to be constrained*.
- n. Introduzca *0* en el apartado *VALUE Displacement value*.
- o. Seleccione *OK* para aplicar las restricciones y cerrar la ventana.

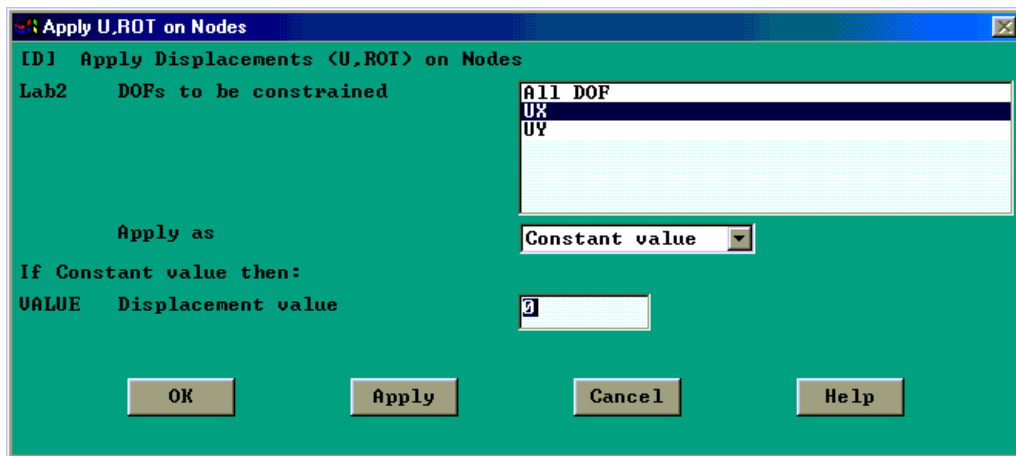


Figura 4.33 Ventana Apply U,ROT on Nodes.

- p. En la ventana *ANSYS Graphics*, figura 4.34, se visualizan las restricciones aplicadas.

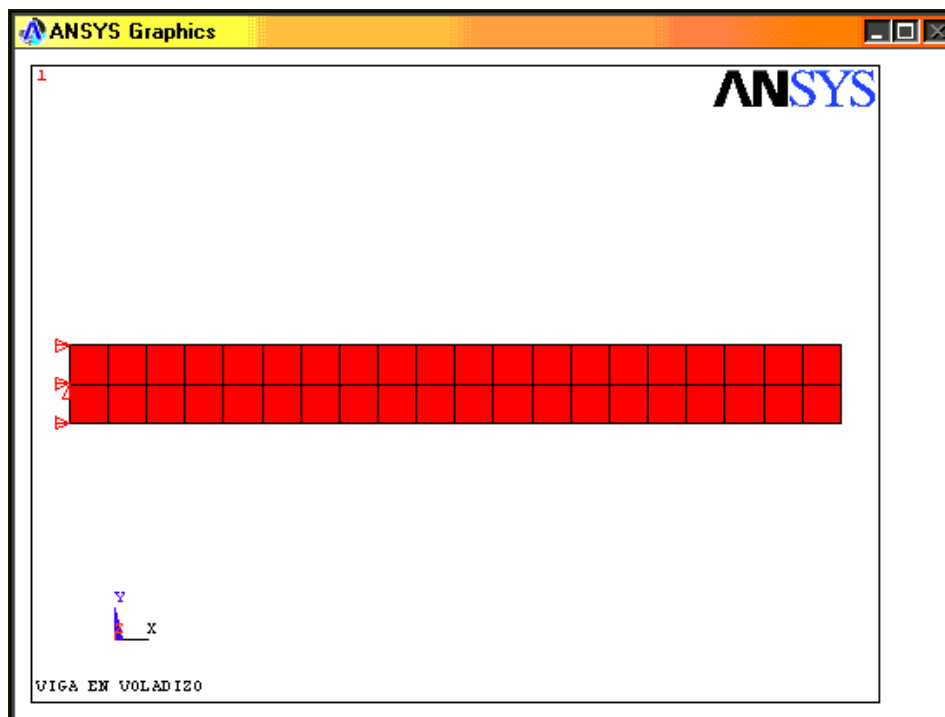


Figura 4.34 Ventana ANSYS Graphics mostrando las restricciones aplicadas.

**Aplicar la carga.**

- a. Seleccione *ANSYS Main Menu > Solution > -Loads- Apply > -Structural- Force/Moment > On Nodes +*
- b. Se abrirá la ventana de dialogo *Apply F/M on Nodes*, figura 4.35.

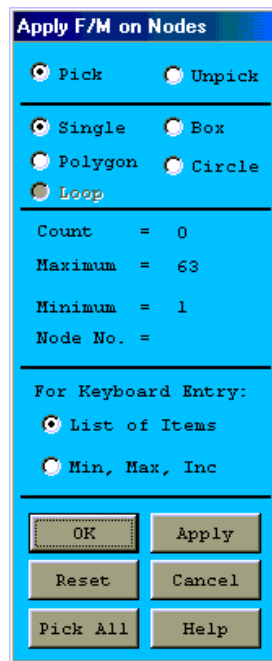


Figura 4.35 Ventana Apply F/M on Nodes.

- c. En la ventana *ANSYS Graphics* use el botón izquierdo del mouse para seleccionar el nodo del centro en el extremo derecho de la viga. Un círculo pequeño aparecerá alrededor del nodo seleccionado, figura 4.36.

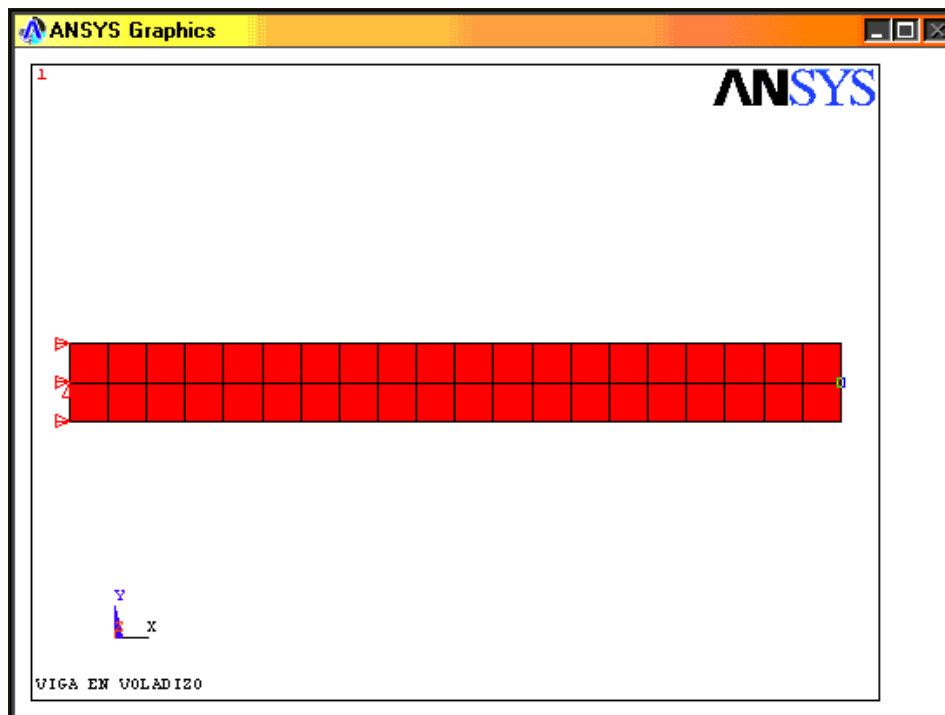


Figura 4.36 Ventana ANSYS Graphics mostrando el nodo seleccionado.

- d. Seleccione *OK* en la figura 4.35 para definir la fuerza en el nodo seleccionado.
- e. Se abrirá la ventana de dialogo *Apply F/M on Nodes*, figura 4.37.
- f. Seleccione *FY* en el apartado *Lab Direction of force/mom*.
- g. Introduzca *-5E-8* en el apartado *VALUE Force/moment value*.
- h. Seleccione *OK* para aplicar la carga y cerrar la ventana.

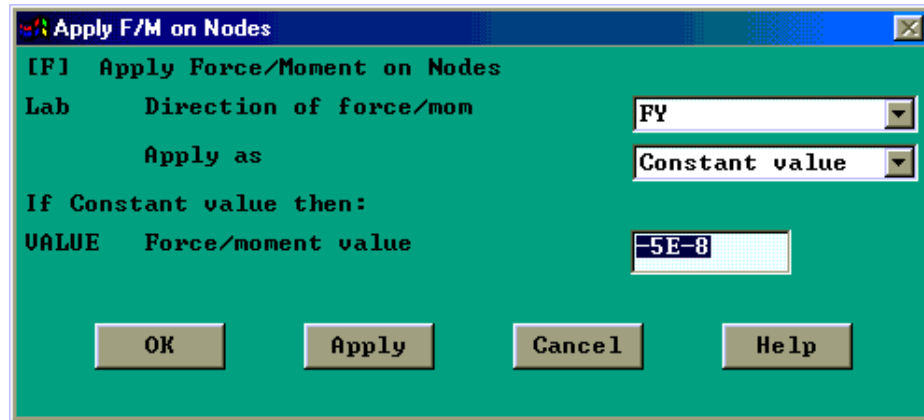


Figura 4.37 Ventana Apply F/M on Nodes.

- i. En la ventana *ANSYS Graphics*, figura 4.38, se visualiza la carga generada.

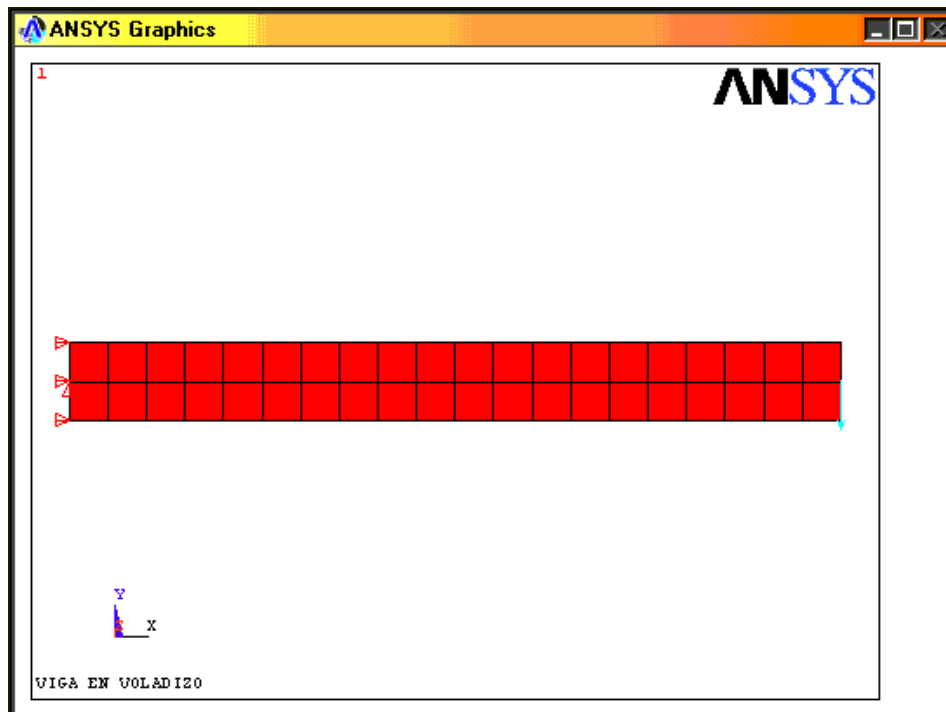


Figura 4.38 Ventana ANSYS Graphics mostrando la carga generada.

**Resolver.**

- a. Seleccione *ANSYS Main Menu > Solution > -Solve- Current LS*
- b. Se abrirá la ventana de dialogo */STAT Command*, figura 4.39.
- c. Cierre la ventana */STAT Command*, después de revisar la información contenida en ella.

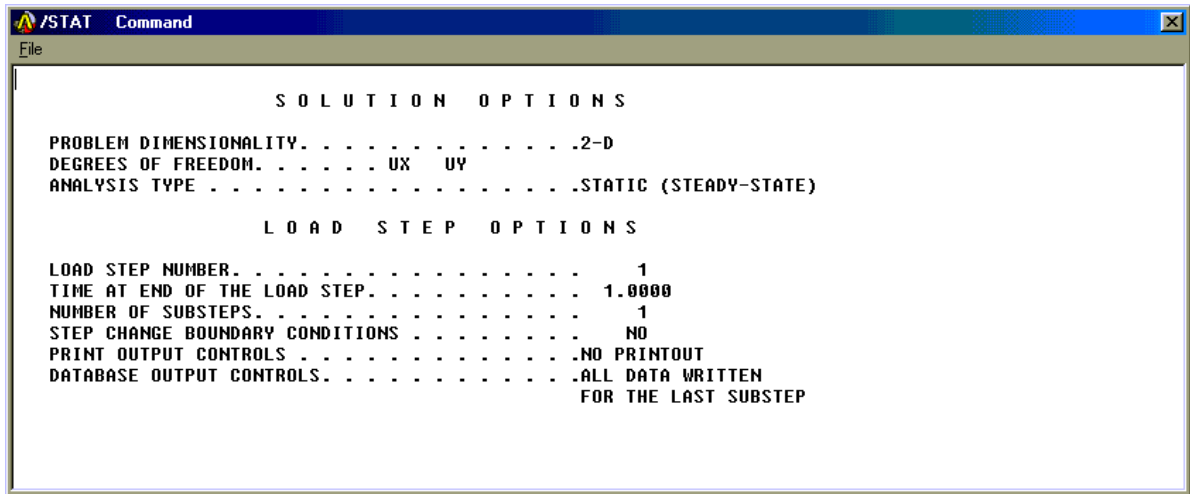


Figura 4.39 Ventana /STAT Command.

- d. Se abrirá la ventana de dialogo *Solve Current Load Step*, figura 4.40.
- e. Seleccione *OK* para comenzar a resolver el modelo en el paso actual de carga.

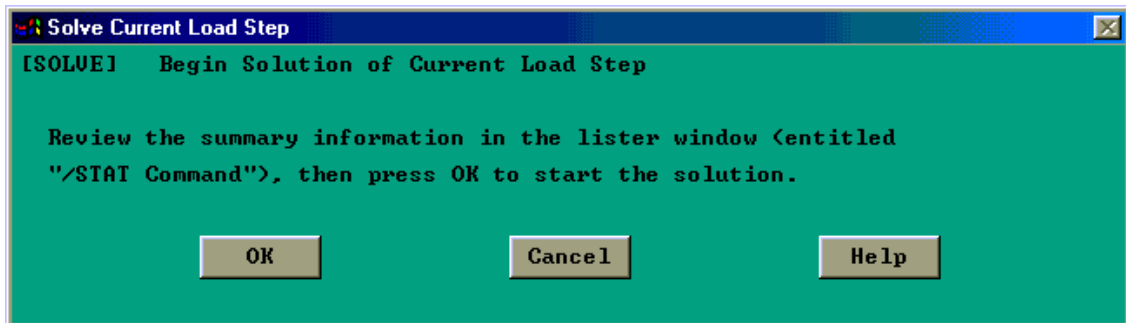


Figura 4.40 Ventana Solve Current Load Step.

- f. Se abrirá la ventana de dialogo *Information*, figura 4.41.
- g. Seleccione *Close* para cerrar la ventana de información cuando la solución este hecha (*Solution is done!*).

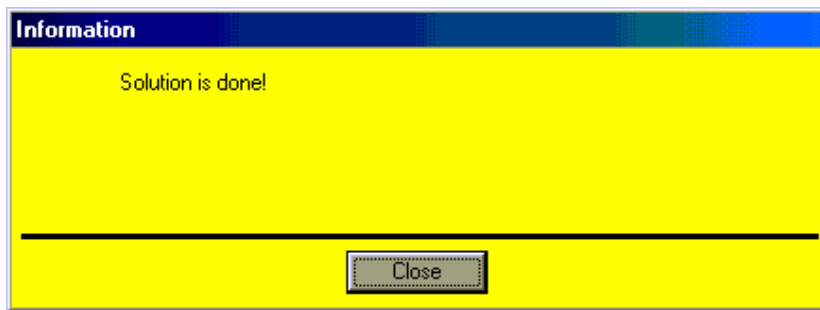


Figura 4.41 Ventana Information.

#### 4.1.5. POSTPROCESO

El postproceso es donde se revisan los resultados del análisis a través de representaciones gráficas y de listados tabulares. El post-procesador general (POST1) se utiliza para revisar resultados en un subpaso (*substep*) del tiempo. El post-procesador de tiempo-historia (POST26) se utiliza para revisar resultados en puntos específicos del modelo sobre todos los pasos del tiempo. En este ejemplo, solamente el post-procesador general necesita ser utilizado.

***Leer resultados en el postprocesador general.***

- a. Seleccione ***ANSYS Main Menu > General Postproc > -Read Results- First Set***

***Plotear los esfuerzos de elementos en la dirección x.***

- a. Seleccione ***ANSYS Main Menu > General Postproc > Plot Results > -Contour Plot- Element Solu...***
- b. Se abrirá la ventana de dialogo *Contour Element Solution Data*, figura 4.42.
- c. Seleccione *Stress* y *X-direction SX* en el apartado *Item, Comp Item to be contoured*.
- d. Seleccione *Def + undef edge* en el apartado *KUND Items to be plotted*.
- e. Seleccione *OK* para plotear y cerrar la ventana.

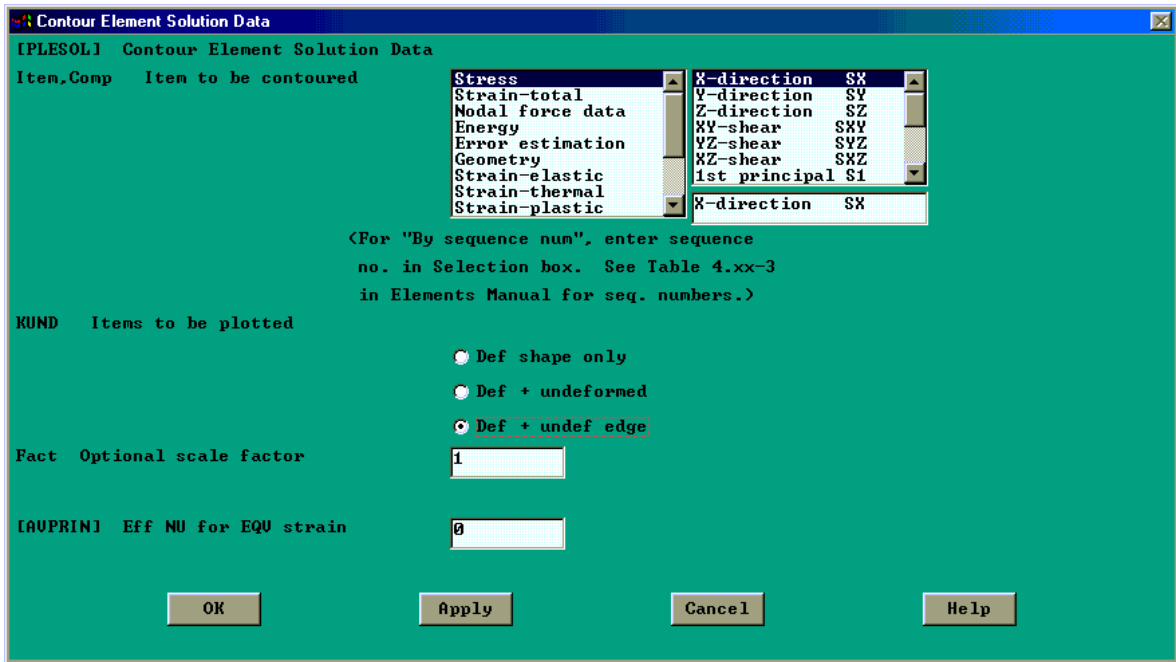


Figura 4.42 Ventana Contour Element Solution Data.

- f. Un gráfico a colores que muestra el nivel de los esfuerzos en la dirección x se puede ver en la ventana *ANSYS Graphics*, figura 4.43.

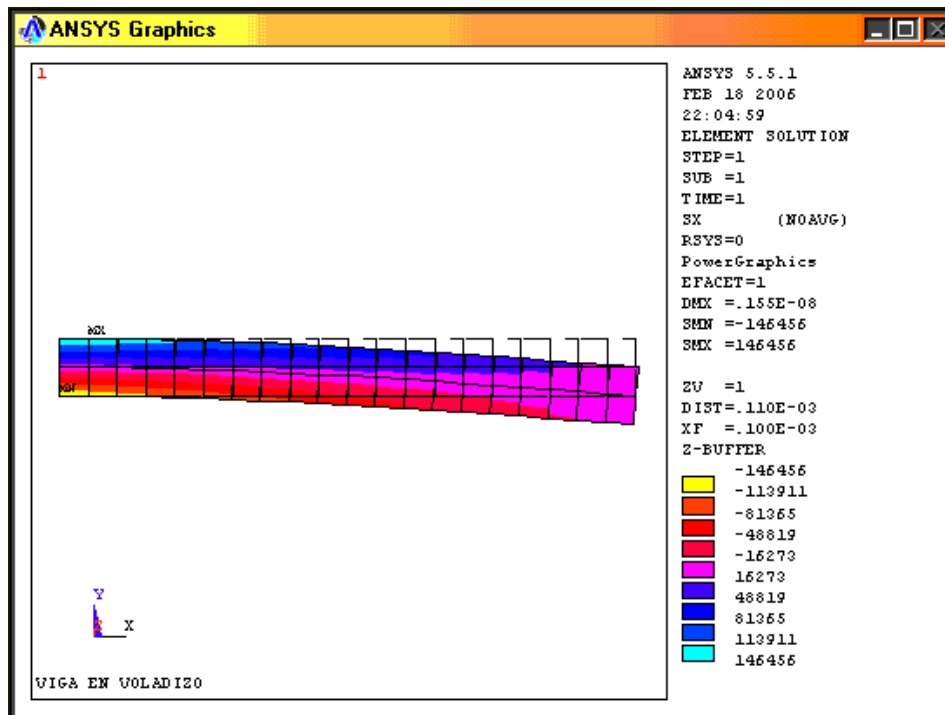


Figura 4.43 Ventana ANSYS Graphics mostrando un gráfico a colores del nivel de los esfuerzos en x.

*Listar las reacciones.*

- Seleccione ANSYS Main Menu > General Postproc > List Results > Reaction Solu...
- Se abrirá la ventana de dialogo *List Reaction Solution*, figura 4.44.
- Seleccione *All items* en el apartado *Lab Item to be listed*.
- Seleccione *OK* para listar y cerrar la ventana.

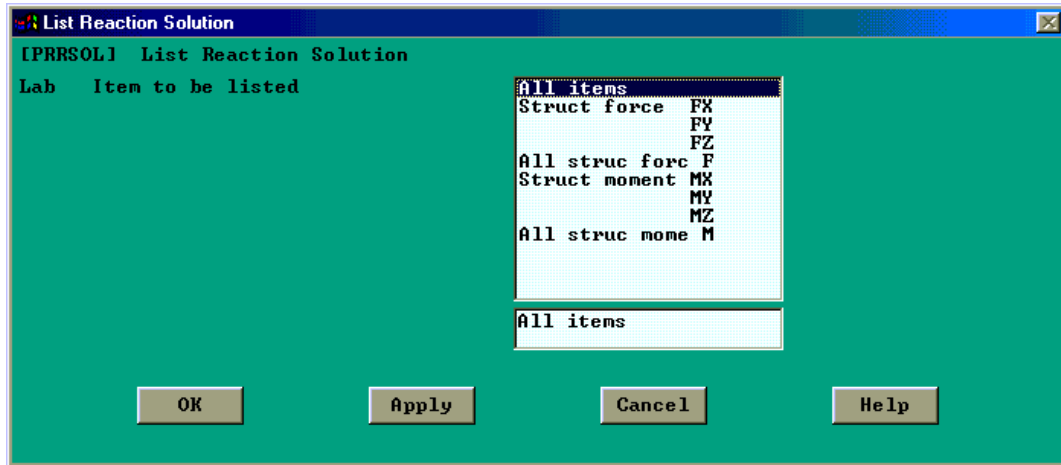


Figura 4.44 Ventana List Reaction Solution.

- Se abrirá la ventana de dialogo *PRRSOL Command*, figura 4.45.
- Revise los datos y cierre la ventana.

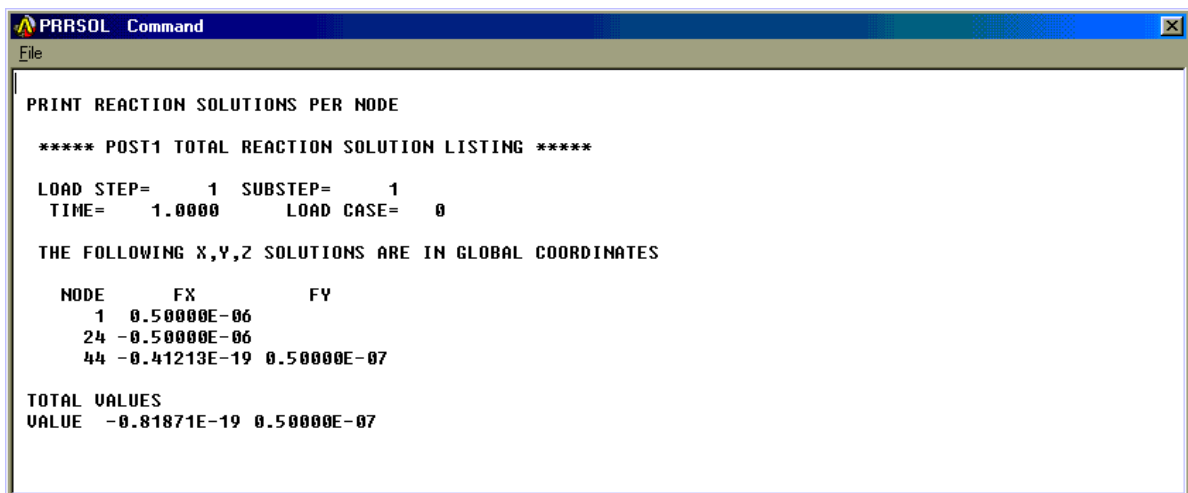


Figura 4.45 Ventana PRRSOL Command.



*Animar el esfuerzo equivalente von Mises.*

- Seleccione **Utility Menu > PlotCtrls > Animate > Deformed Results...**
- Se abrirá la ventana de dialogo *Animate Nodal Solution Data*, figura 4.46.
- Seleccione *Stress y von Mises SEQU* en el apartado *Item,Comp Item to be contoured*.
- Seleccione *OK* para animar y cerrar la ventana.

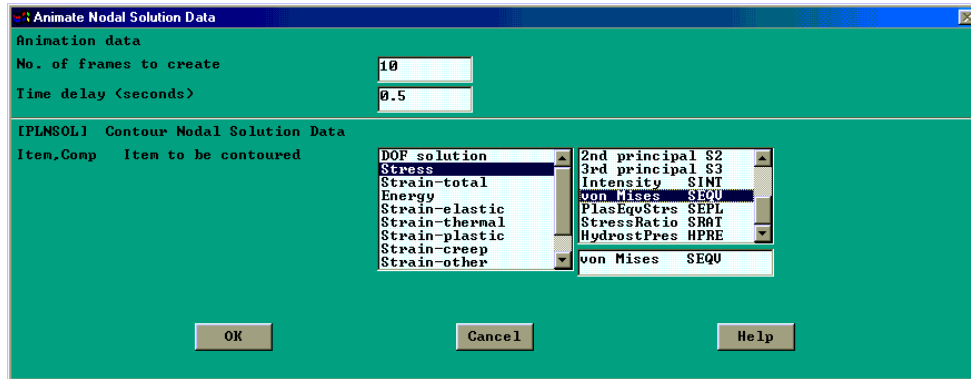


Figura 4.46 Ventana Animate Nodal Solution Data.

- Un gráfico a colores que muestra el esfuerzo equivalente von Mises se puede ver en la ventana *ANSYS Graphics*, figura 4.47.

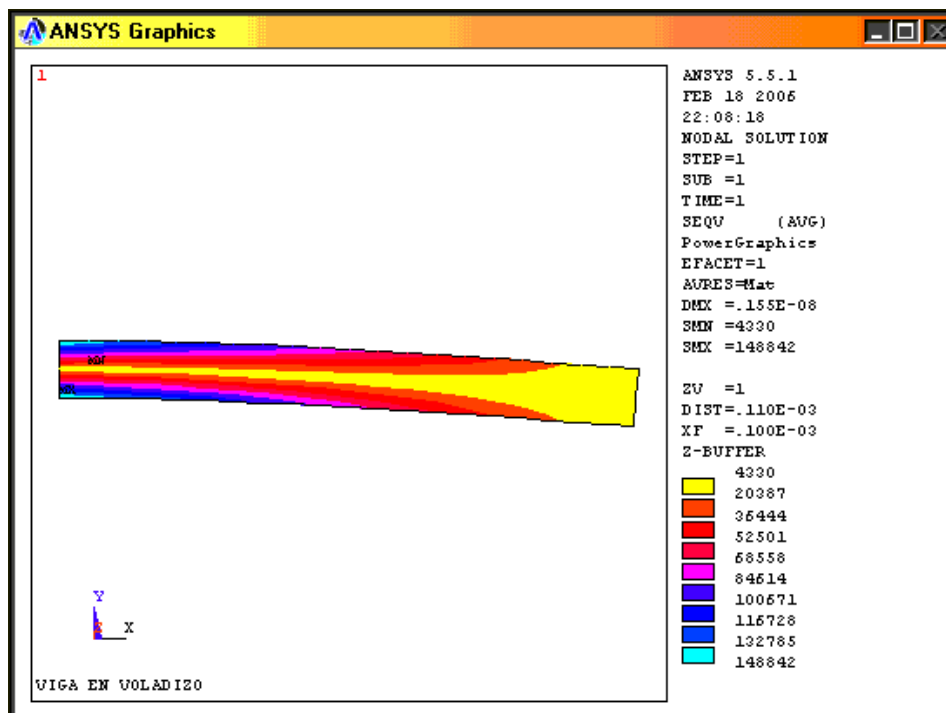


Figura 4.47 Ventana ANSYS Graphics mostrando un gráfico a colores del esfuerzo equivalente von Mises.

#### 4.1.6. SALIR DE ANSYS

Cuando el análisis este finalizado, se puede salir del programa ANSYS a través de varias opciones. En este ejemplo, todo será salvado.

- Seleccione ***Utility Menu > File > Exit***
- Se abrirá la ventana de dialogo *Exit from ANSYS*, figura 4.48.
- Seleccione *Save Everything* en el apartado *–Exit from ANSYS–*.
- Seleccione *OK* para salir de ANSYS.

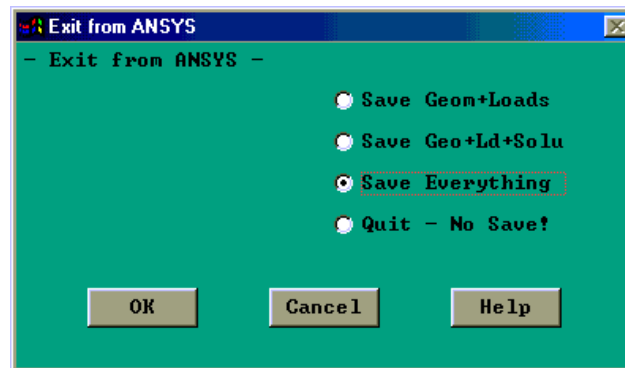


Figura 4.48 Ventana Exit from ANSYS.

## 4.2. MÉNSULA

El siguiente problema muestra el procedimiento típico de análisis mediante el programa ANSYS. Se trata de modelar una ménsula, hecha de un acero A-36, con una carga de presión graduada aplicada en el agujero inferior derecho, donde posteriormente se colocará un pasador.

### 4.2.1. ESPECIFICACIÓN DEL PROBLEMA

**Disciplina:** Estructural.

**Tipo de análisis:** Estático lineal.

**Tipo de elemento usado:** PLANE82

**Características ANSYS demostradas:** modelado sólido incluyendo primitivos, operaciones booleanas y filetes; carga de presión graduada; exhibir forma deformada y esfuerzos; listado de fuerzas de reacción; examinación de error de energía estructural.

### 4.2.2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Se trata de un análisis estático estructural de la ménsula mostrada en la figura 4.49. El agujero para pasador superior izquierdo se fija (mediante soldadura) alrededor de su circunferencia entera, y una carga de presión graduada es aplicada en la parte inferior del agujero para pasador inferior derecho. El sistema de unidades usado es el sistema inglés.

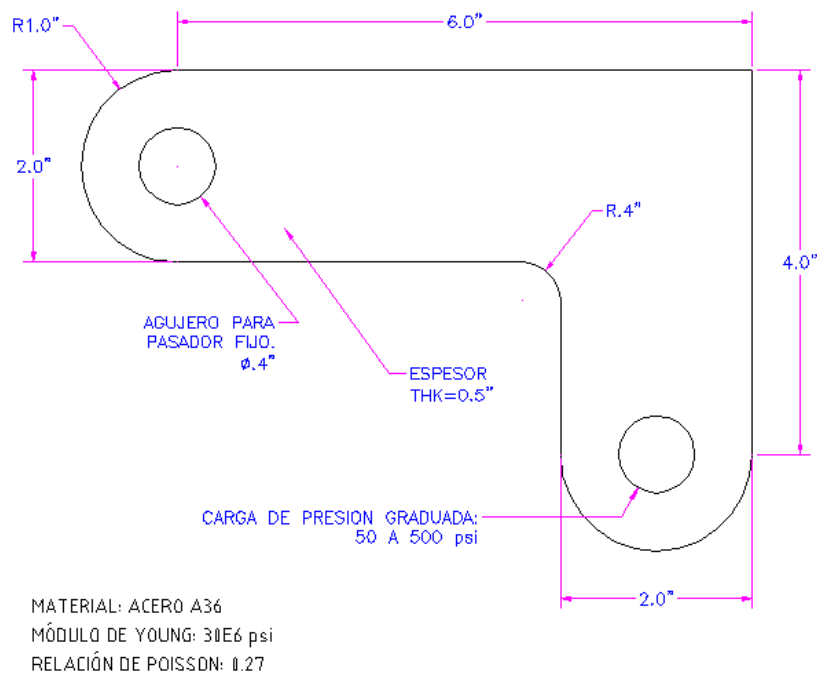


Figura 4.49 Dibujo y propiedades de la ménsula.

### 4.2.3. PREPROCESO

#### *Asignar nombre de trabajo.*

- e. Seleccione **Utility Menu > File > Change Jobname...**
- f. Se abrirá la ventana de dialogo *Change Jobname*, figura 4.50.
- g. Introducir *MENSULA* en el apartado *[/FILNAM] Enter new jobname*. El jobname por defecto es “file.db” si no se especifica otra cosa.
- h. Seleccione *OK* para aceptar el nuevo jobname y cerrar la ventana de dialogo.

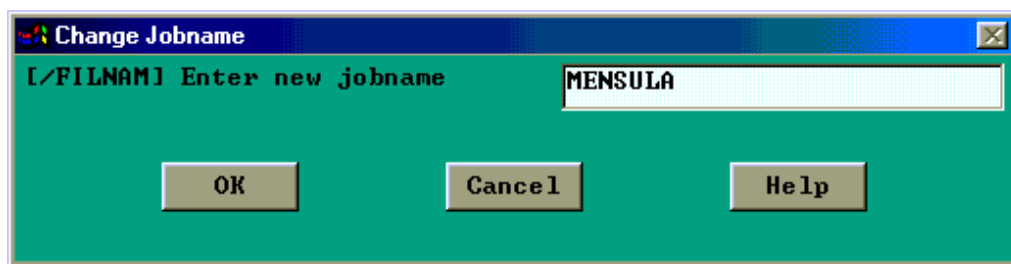


Figura 4.50 Ventana Change Jobname.

#### *Asignar título.*

- e. Seleccione **Utility Menu > File > Change Title...**
- f. Se abrirá la ventana de dialogo *Change Title*, figura 4.51.
- g. Introducir *MENSULA* en el apartado *[/TITLE] Enter new title*.
- h. Seleccione *OK* para aceptar el título y cerrar la ventana de dialogo.

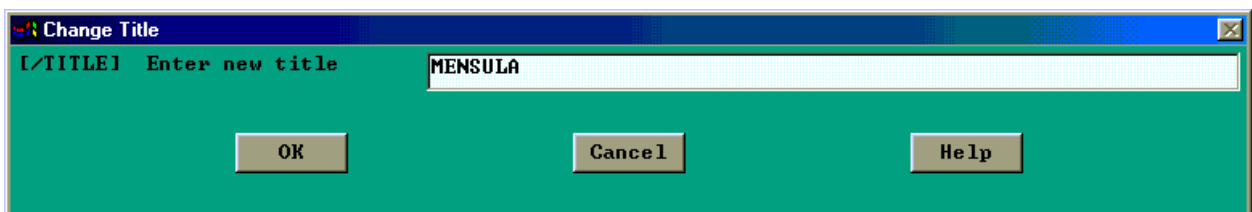


Figura 4.51 Ventana Change Title.

**Definir rectángulos.**

- f. Seleccione ANSYS Main Menu > Preprocessor > -Modeling- Create > -Areas- Rectangle > By Dimensions...
- g. Se abrirá la ventana de dialogo *Create Rectangle by Dimensions*, figura 4.52.
- h. Introducir 0 y 6 en el apartado *X1,X2 X-coordinates*, respectivamente. Introducir -1 y 1 en el apartado *Y1,Y2 Y-coordinates*, respectivamente.
- i. Seleccione *Apply* para crear el primer rectángulo, figura 4.53, y volver a mostrar la ventana de dialogo.

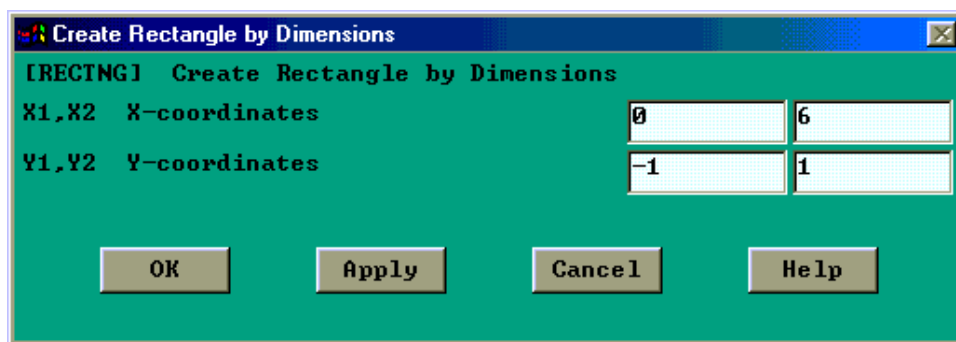


Figura 4.52 Ventana Create Rectangle by Dimensions.

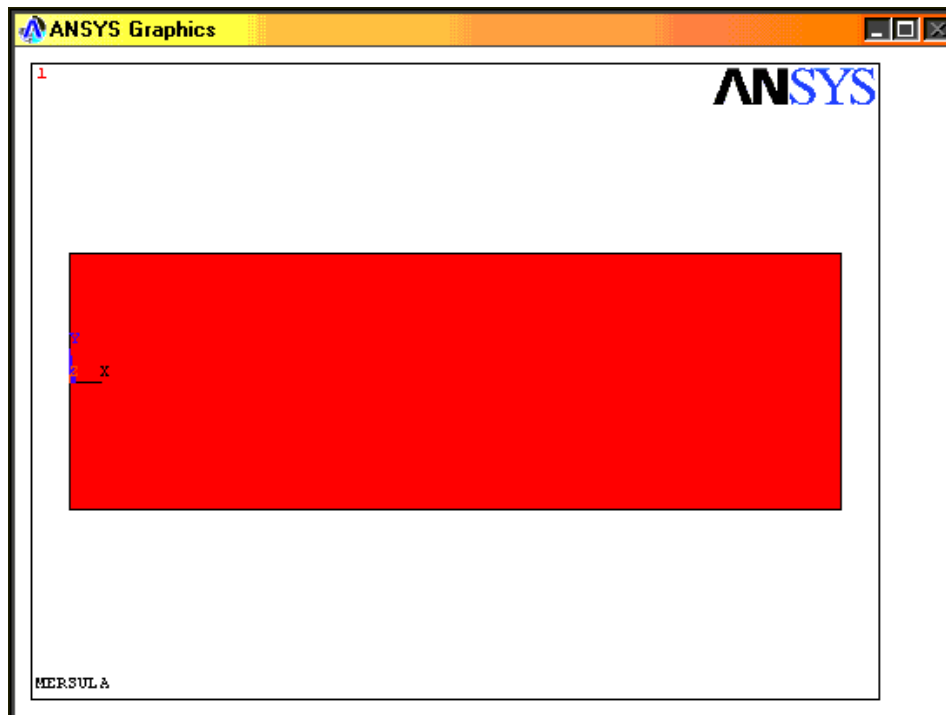


Figura 4.53 Ventana ANSYS Graphics mostrando el primer rectángulo creado.

- j. Introducir 4 y 6 en el apartado  $X1, X2$  X-coordinates, respectivamente. Introducir -1 y -3 en el apartado  $Y1, Y2$  Y-coordinates, respectivamente; figura 4.54.
- k. Seleccione *OK* para crear el segundo rectángulo, figura 4.55, y cerrar la ventana de dialogo.

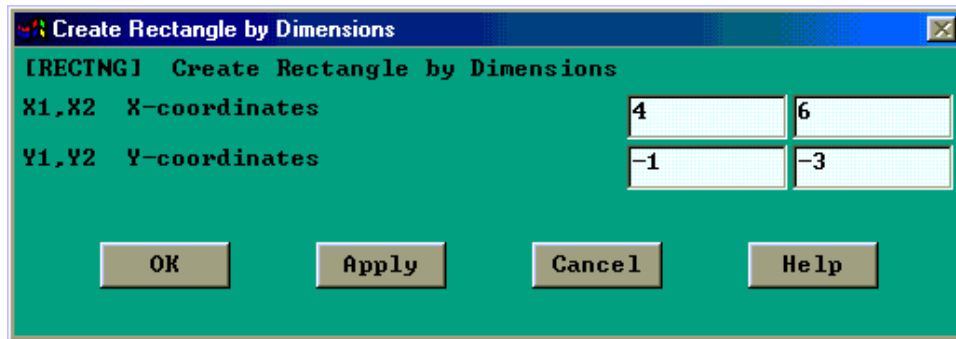


Figura 4.54 Ventana Create Rectangle by Dimensions.

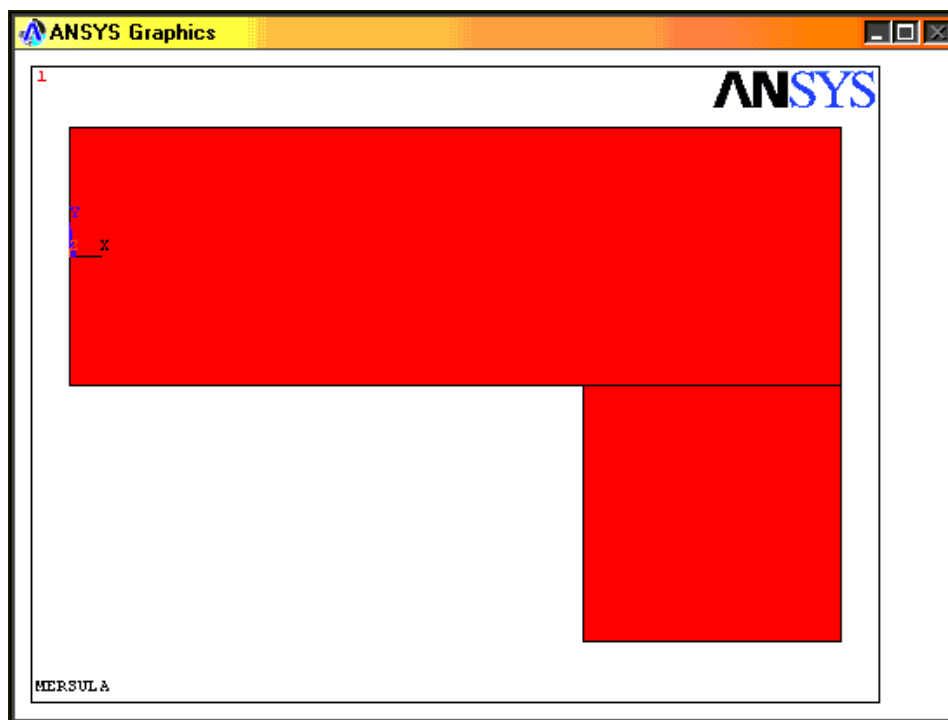


Figura 4.55 Ventana ANSYS Graphics mostrando el segundo rectángulo creado.

### ***Cambiar los controles "Plot".***

- a. Seleccione ***Utility Menu > PlotCtrls > Numbering...***
- b. Se abrirá la ventana de dialogo *Plot Numbering Controls*, figura 4.56.

- c. Activar el apartado *AREA Area numbers*.
- d. Seleccione *OK* para aceptar los cambios, figura 4.57, y cerrar la ventana de dialogo.

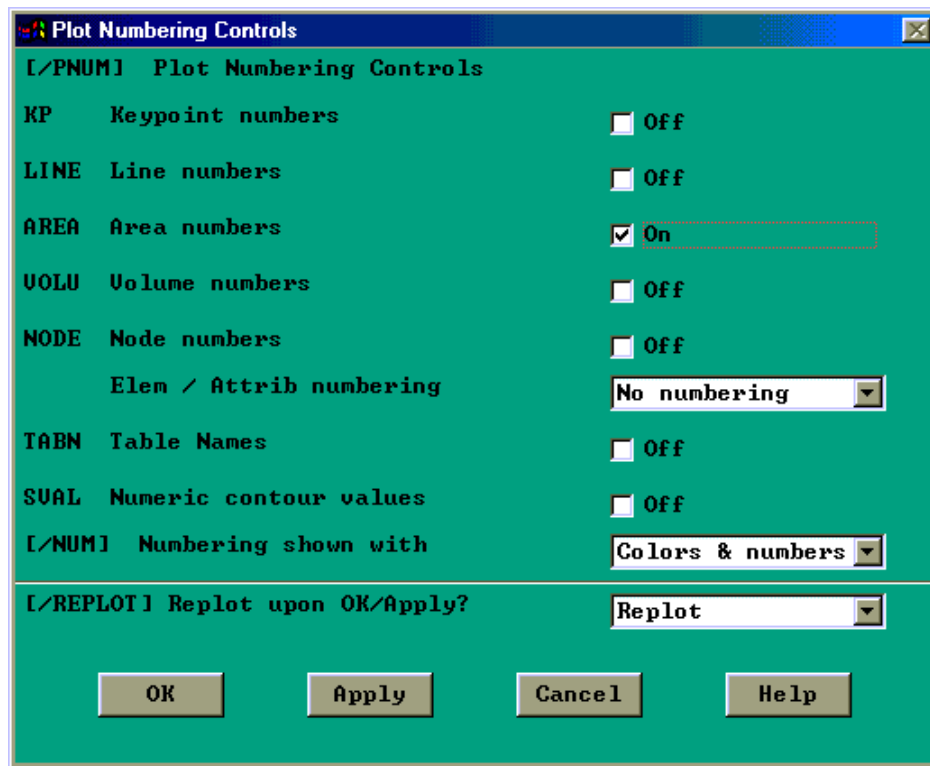


Figura 4.56 Ventana Plot Numbering Controls.

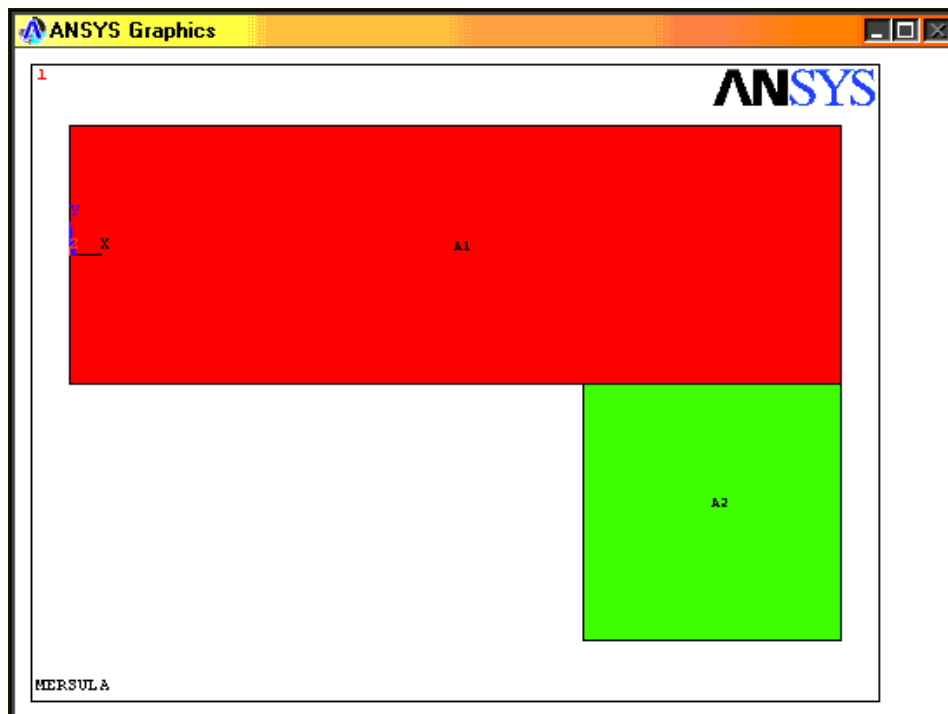


Figura 4.57 Ventana ANSYS Graphics mostrando dos áreas numeradas.

- e. Salvar la base de datos que se ha creado hasta ahora en el archivo *MENSULA.db*. Para salvar la base de datos seleccione de la ventana *ANSYS Toolbar* el icono *SAVE\_DB*, figura 4.58.

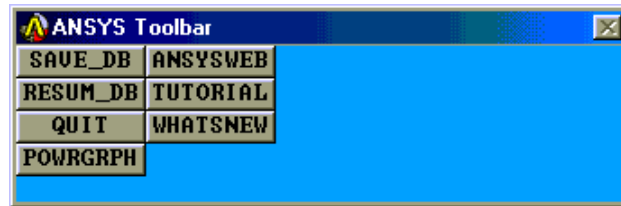


Figura 4.58 Ventana ANSYS Toolbar.

*Cambiar el plano de trabajo a polar y crear el primer círculo.*

- Seleccione ***Utility Menu > PlotCtrls > Pan, Zoom, Rotate...***
- Se abrirá la ventana de dialogo *Pan-Zoom-Rotate*, figura 4.59.
- Seleccione el icono que tiene un “*Punto Pequeño*” para alejar la geometría creada, figura 4.60.
- Seleccione *Close* para cerrar la ventana de dialogo.

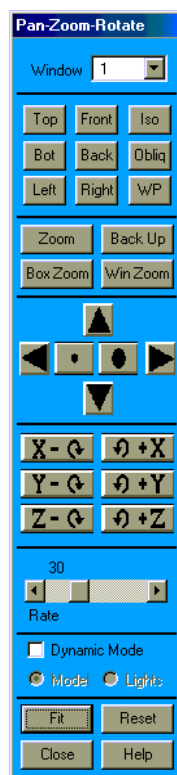


Figura 4.59 Ventana Pan-Zoom-Rotate.



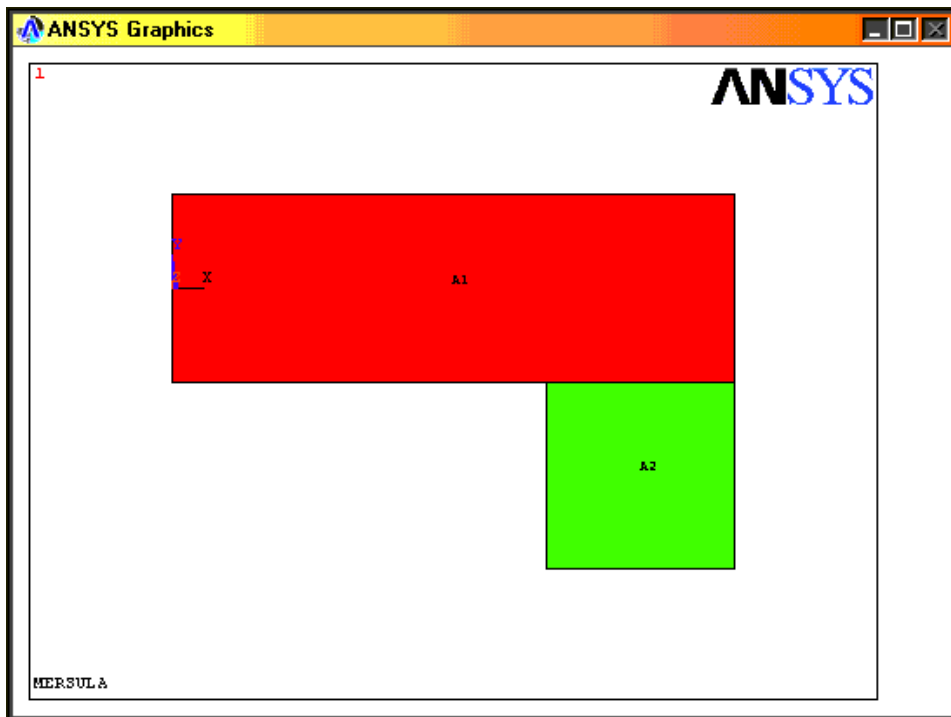


Figura 4.60 Ventana ANSYS Graphics mostrando la geometría alejada.

- e. Seleccione ***Utility Menu > WorkPlane > Display Working Plane (toggle on)***, figura 4.61.

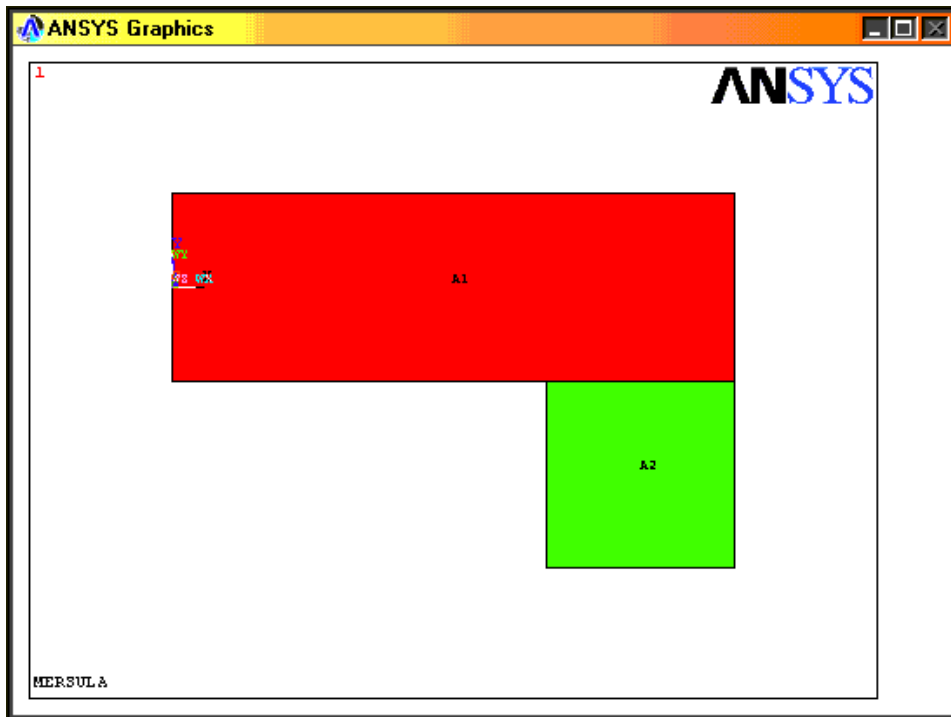


Figura 4.61 Ventana ANSYS Graphics mostrando el plano de trabajo activado.

- f. Seleccione ***Utility Menu > WorkPlane > WP Settings***
- g. Se abrirá la ventana de dialogo *WP Settings*, figura 4.62.
- h. Seleccione el apartado *Polar*, el apartado *Grid and Triad*, e introducir *0.1* en el apartado *Snap Incr*.
- i. Seleccione *OK* para realizar las acciones, figura 4.63, y cerrar la ventana de dialogo.



Figura 4.62 Ventana WP Settings.

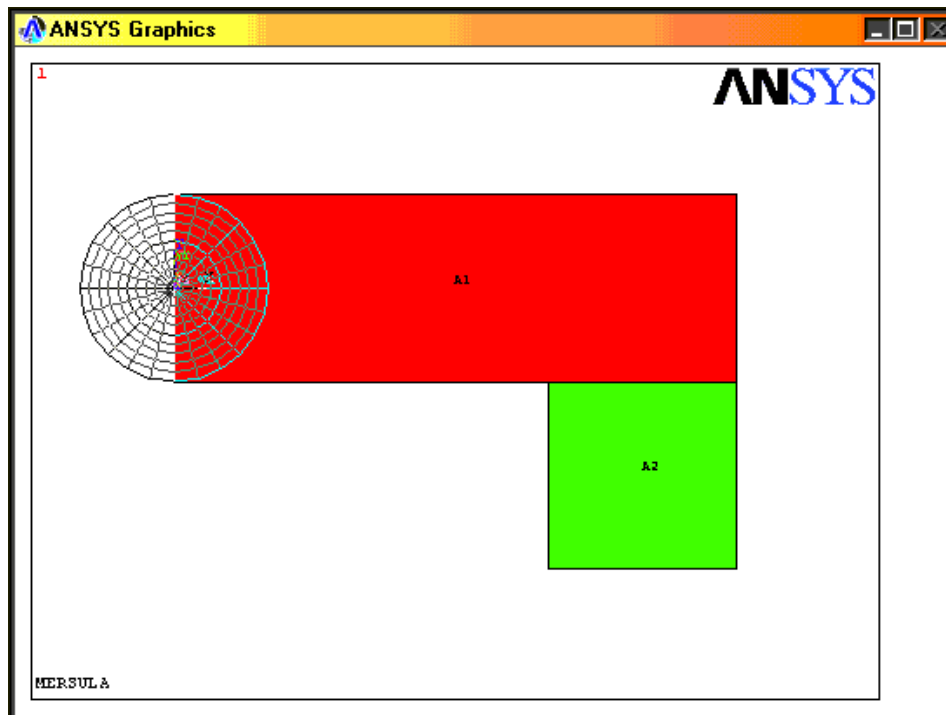


Figura 4.63 Ventana ANSYS Graphics mostrando el plano de trabajo especificado.

- j. Seleccione *ANSYS Main Menu > Preprocessor > -Modeling- Create > -Areas- Circle > Solid Circle +*
- k. Se abrirá la ventana de dialogo *Solid Circular Area*, figura 4.64.
- l. Introducir 0 en el apartado *WP X*, 0 en el apartado *WP Y*, 1 en el apartado *Radius*.
- m. Seleccione *OK* para crear el primer círculo, figura 4.65, y cerrar la ventana de dialogo.

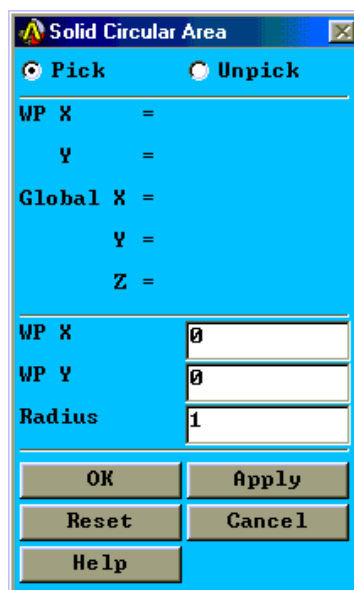


Figura 4.64 Ventana Solid Circular Area.

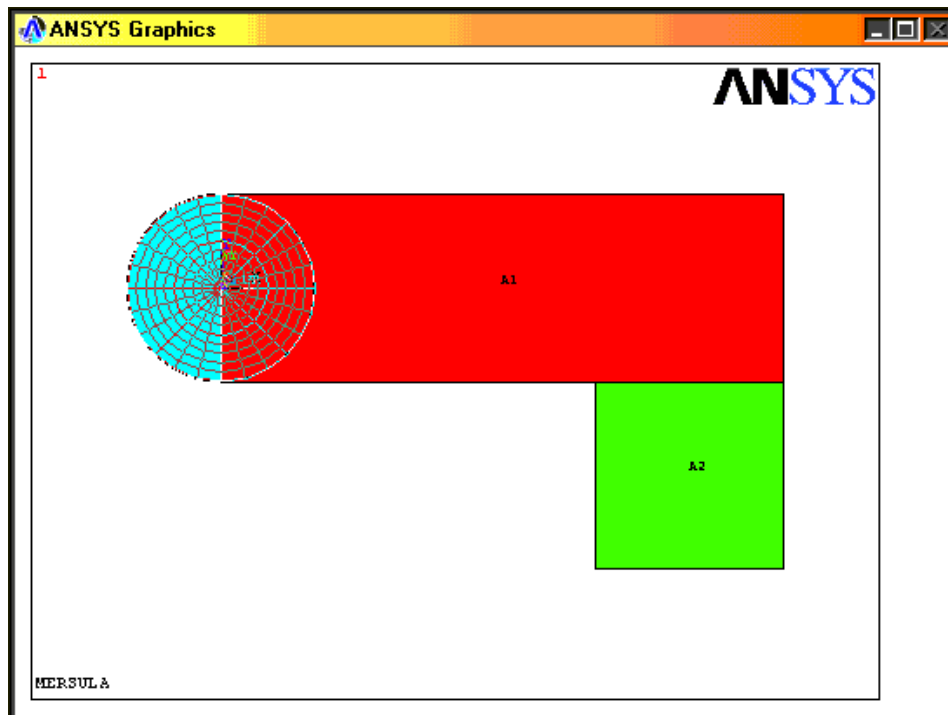


Figura 4.65 Ventana ANSYS Graphics mostrando el primer círculo creado.

- n. Salvar la base de datos que se ha creado hasta ahora en el archivo *MENSULA.db*. Para salvar la base de datos seleccione de la ventana *ANSYS Toolbar* el icono *SAVE\_DB*.

*Mover el plano de trabajo y crear el segundo círculo.*

- a. Seleccione ***Utility Menu > WorkPlane > Offset WP to > Keypoints +***
- b. Se abrirá la ventana de dialogo *Offset WP to Keypoints*, figura 4.66.
- c. Seleccione en la ventana *ANSYS Graphics*, el keypoint en la esquina inferior izquierda y en la esquina inferior derecha del segundo rectángulo creado, figura 4.67.
- d. Seleccione *OK* para mostrar el plano de trabajo en la posición elegida, figura 4.68, y cerrar la ventana de dialogo.

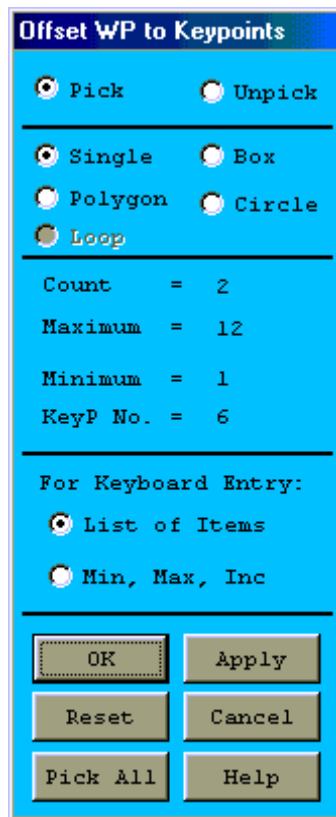


Figura 4.66 Ventana Offset WP to Keypoints.

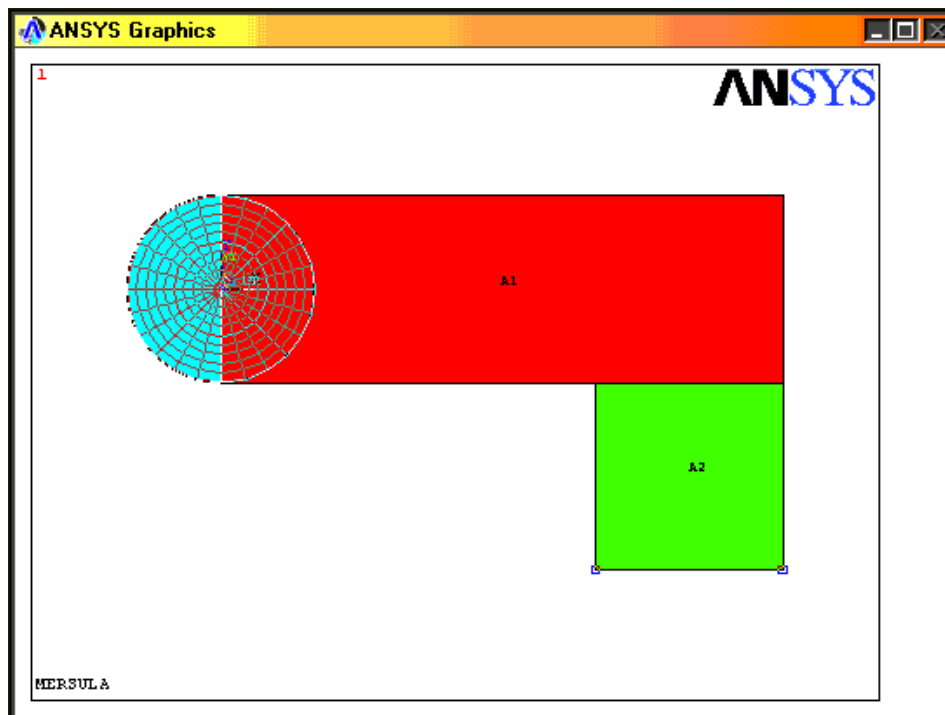


Figura 4.67 Ventana ANSYS Graphics mostrando los keypoints seleccionados.

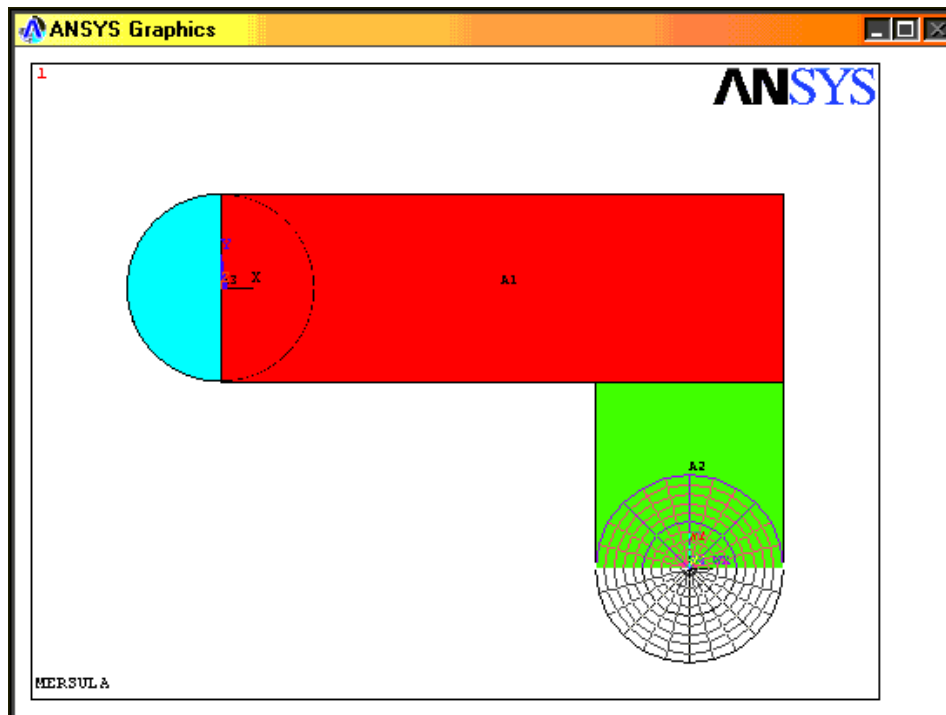


Figura 4.68 Ventana ANSYS Graphics mostrando el plano de trabajo en el lugar especificado.

- e. Seleccione *ANSYS Main Menu > Preprocessor > -Modeling- Create > -Areas- Circle > Solid Circle +*
- f. Se abrirá la ventana de dialogo *Solid Circular Area*, figura 4.69.
- g. Introducir 0 en el apartado *WP X*, 0 en el apartado *WP Y*, 1 en el apartado *Radius*.
- h. Seleccione *OK* para crear el segundo círculo, figura 4.70, y cerrar la ventana de diálogo.

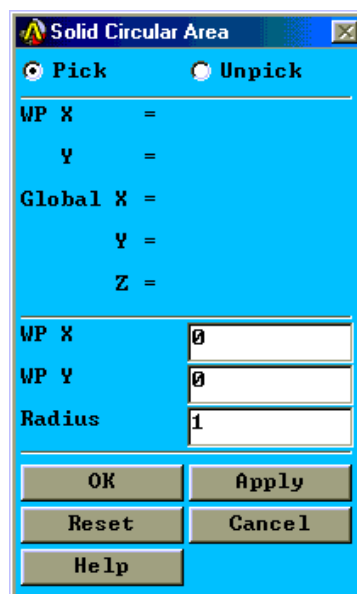


Figura 4.69 Ventana Solid Circular Area.

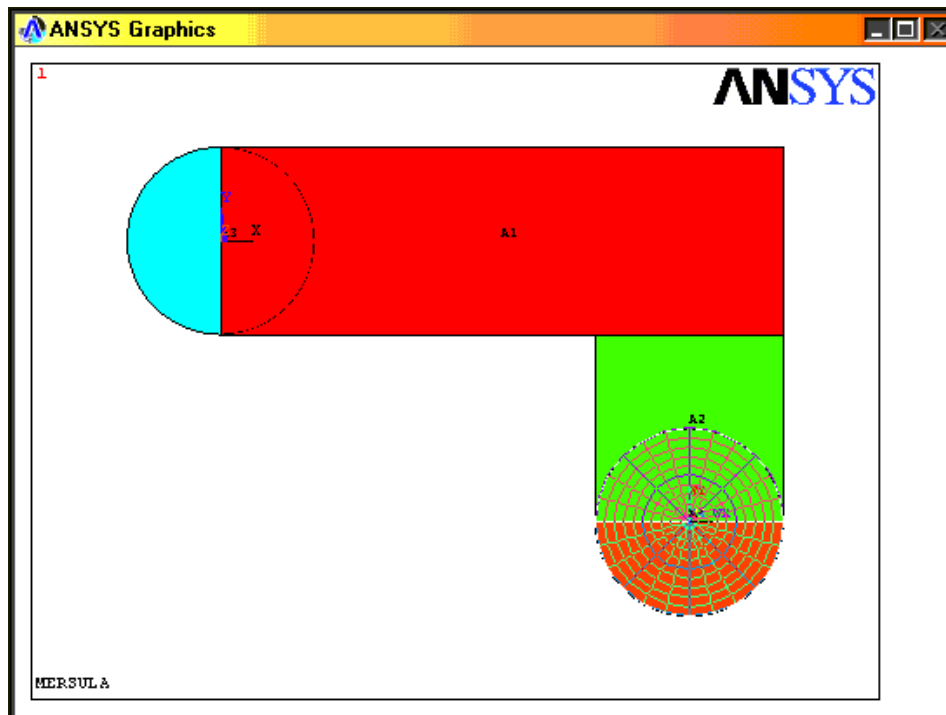


Figura 4.70 Ventana ANSYS Graphics mostrando el segundo círculo creado.

- i. Salvar la base de datos que se ha creado hasta ahora en el archivo *MENSULA.db*. Para salvar la base de datos seleccione de la ventana *ANSYS Toolbar* el icono *SAVE\_DB*.

### ***Agregar áreas.***

- a. Seleccione **ANSYS Main Menu > Preprocessor > -Modeling- Operate > -Booleans- Add > Areas +**
- b. Se abrirá la ventana de dialogo *Add Areas*, figura 4.71.
- c. Seleccione *Pick All* para agregar todas las áreas, figura 4.72, y cerrar la ventana de dialogo.

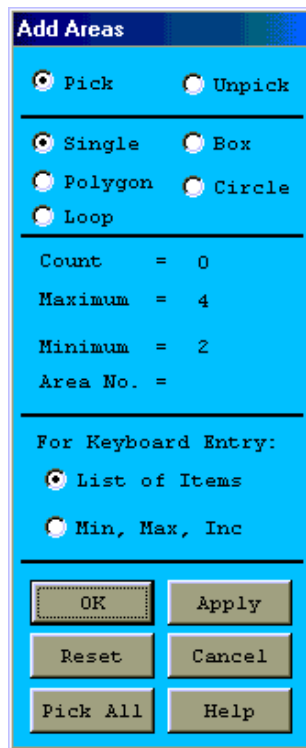


Figura 4.71 Ventana Add Areas.

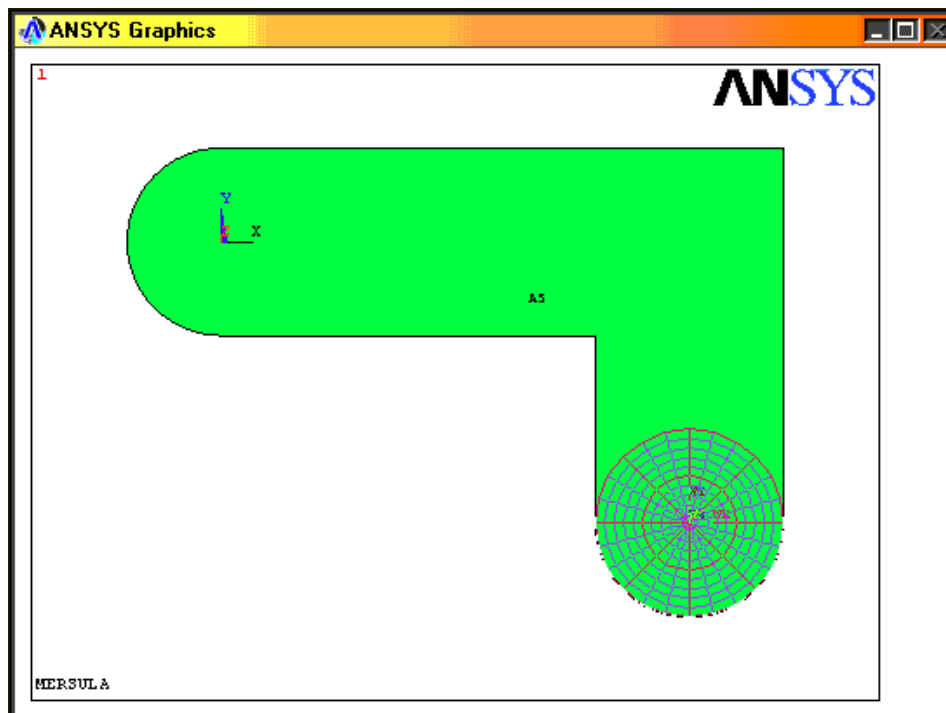


Figura 4.72 Ventana ANSYS Graphics mostrando el área agregada.

- d. Salvar la base de datos que se ha creado hasta ahora en el archivo *MENSULA.db*. Para salvar la base de datos seleccione de la ventana *ANSYS Toolbar* el icono *SAVE\_DB*.



**Crear línea fileteada.**

- a. Seleccione **Utility Menu > PlotCtrls > Numbering...**
- b. Se abrirá la ventana de dialogo *Plot Numbering Controls*, figura 4.73.
- c. Activar la opción *LINE Line numbers*.
- d. Seleccione *OK* para cambiar los controles, figura 4.74, y cerrar la ventana de dialogo.

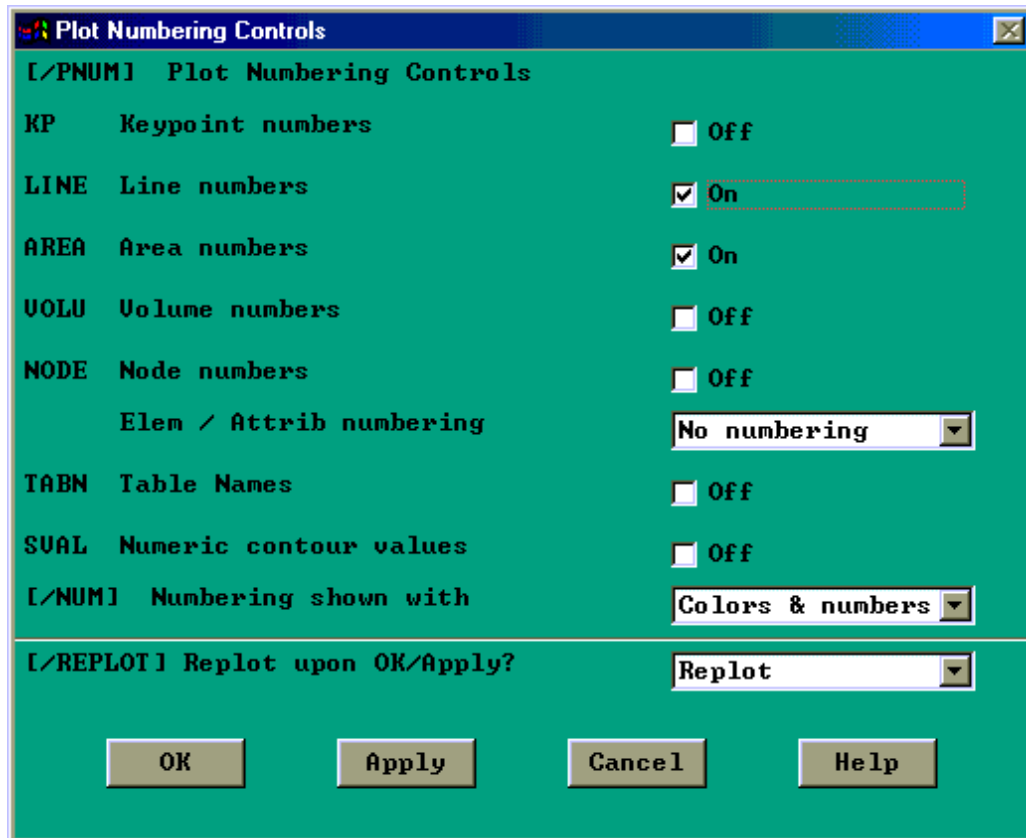


Figura 4.73 Ventana Plot Numbering Controls.

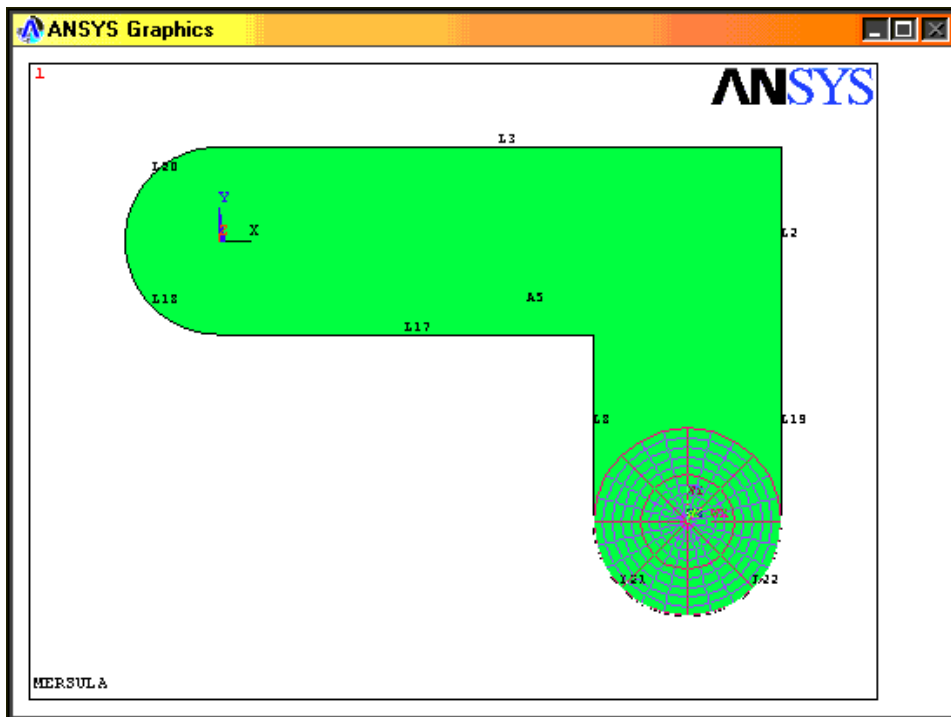


Figura 4.74 Ventana ANSYS Graphics mostrando las líneas numeradas de la geometría.

- e. Seleccione Utility Menu > WorkPlane > Display Working Plane (toggle off), figura 4.75.

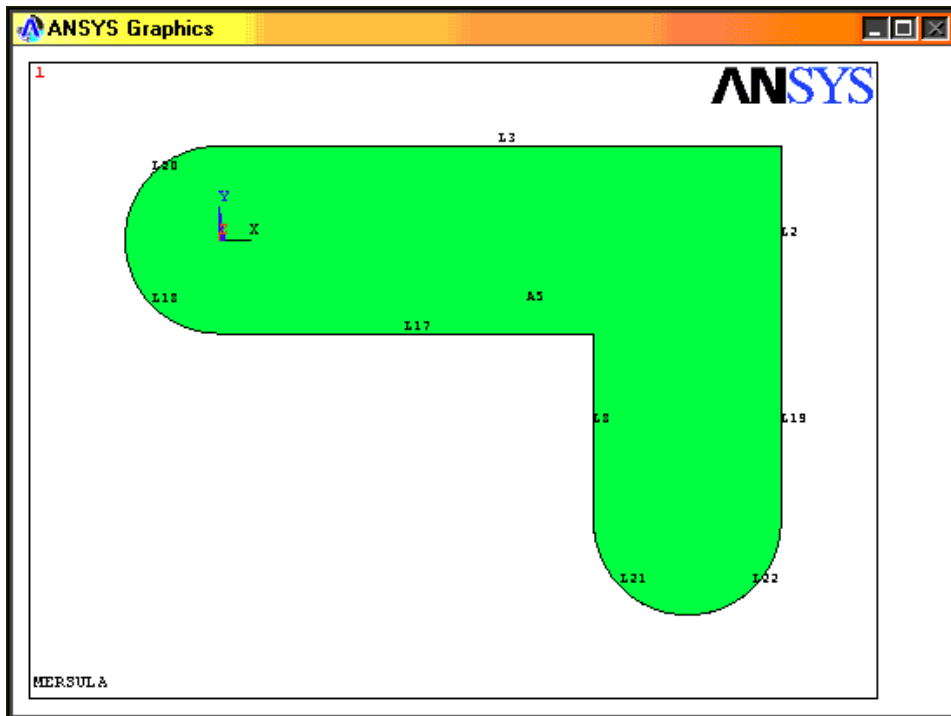


Figura 4.75 Ventana ANSYS Graphics mostrando la geometría sin plano de trabajo.

- f. Seleccione *ANSYS Main Menu > Preprocessor > -Modeling- Create > -Lines- Line Fillet +*
- g. Se abrirá la ventana de dialogo *Line Fillet*, figura 4.76.
- h. Seleccione en la ventana *ANSYS Graphics*, las líneas 17 y 8, figura 4.77.
- i. Seleccione *OK* para cerrar la ventana de dialogo.

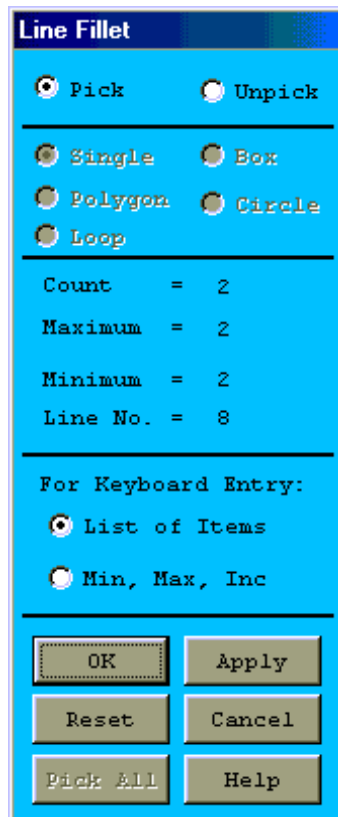


Figura 4.76 Ventana Line Fillet.

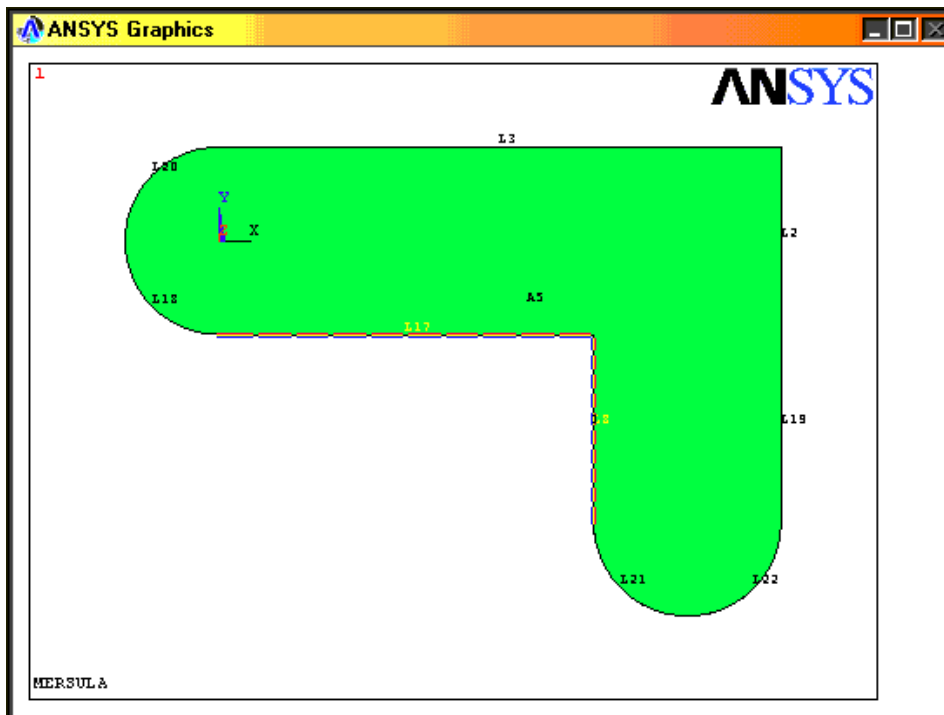


Figura 4.77 Ventana ANSYS Graphics mostrando las líneas seleccionadas.

- j. Se abrirá la ventana de dialogo *Line Fillet*, figura 4.78.
- k. Ingrese *0.4* en el apartado *RAD Fillet radius*.
- l. Seleccione *OK* para crear la línea fileteada, figura 4.79, y cerrar la ventana de dialogo.

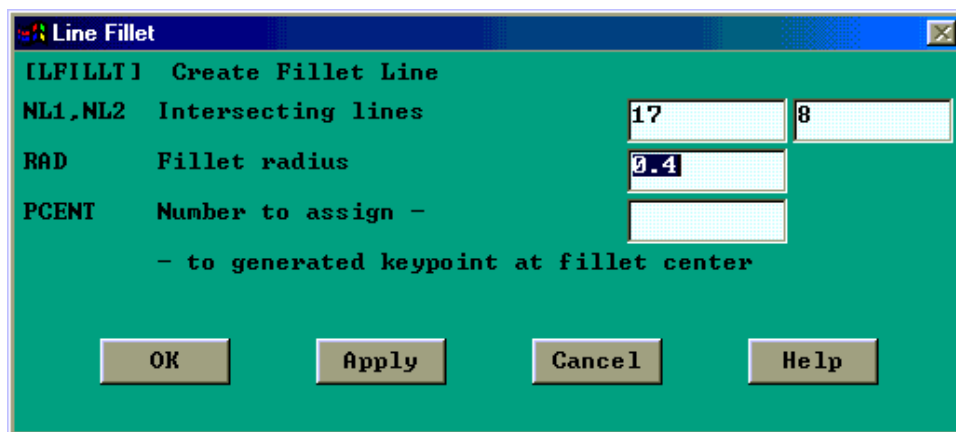


Figura 4.78 Ventana Line Fillet.

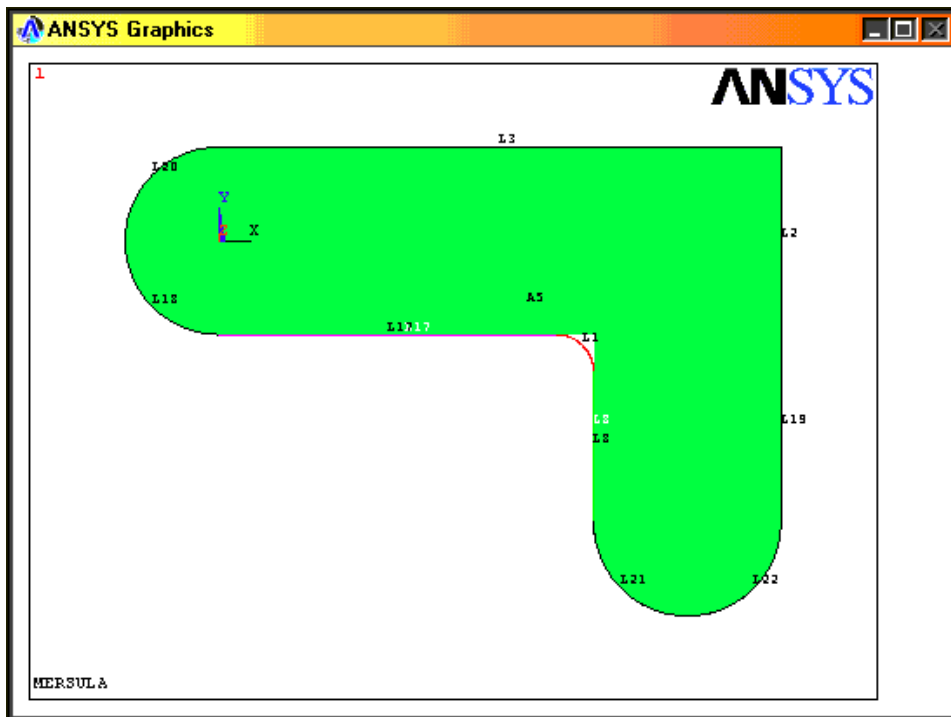


Figura 4.79 Ventana ANSYS Graphics mostrando la línea fileteada creada.

m. Seleccione **Utility Menu > Plot > Lines**, figura 4.80.

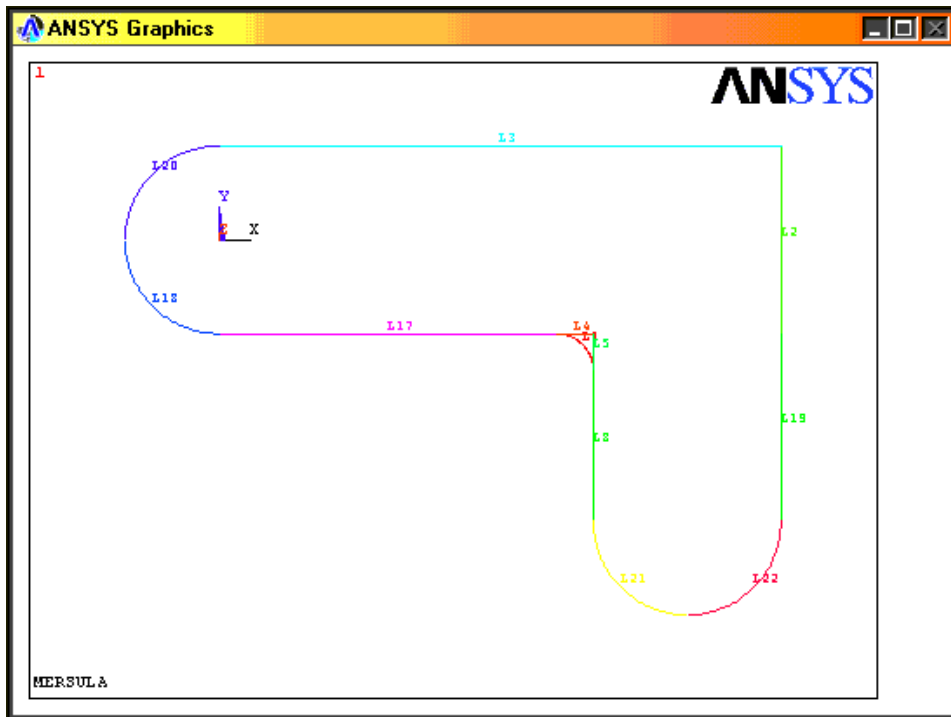


Figura 4.80 Ventana ANSYS Graphics mostrando todas las líneas de la geometría.

**Crear área del filete.**

- a. Seleccione **Utility Menu > PlotCtrls > Pan, Zoom, Rotate...**
- b. Se abrirá la ventana de dialogo *Pan-Zoom-Rotate*, figura 4.81.
- c. Seleccione el icono *Zoom*.
- d. Mueva el mouse a la región fileteada, haga clic al boton izquierdo, manteniéndolo oprimido, mueva el mouse para seleccionar la región fileteada, figura 4.82.
- e. Al soltar el botón izquierdo del mouse se visualiza unicamente la región elegida, figura 4.83.

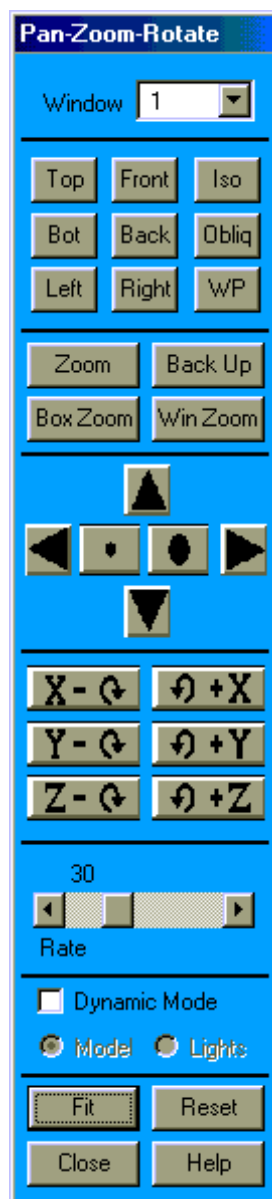


Figura 4.81 Ventana Pan-Zoom-Rotate.

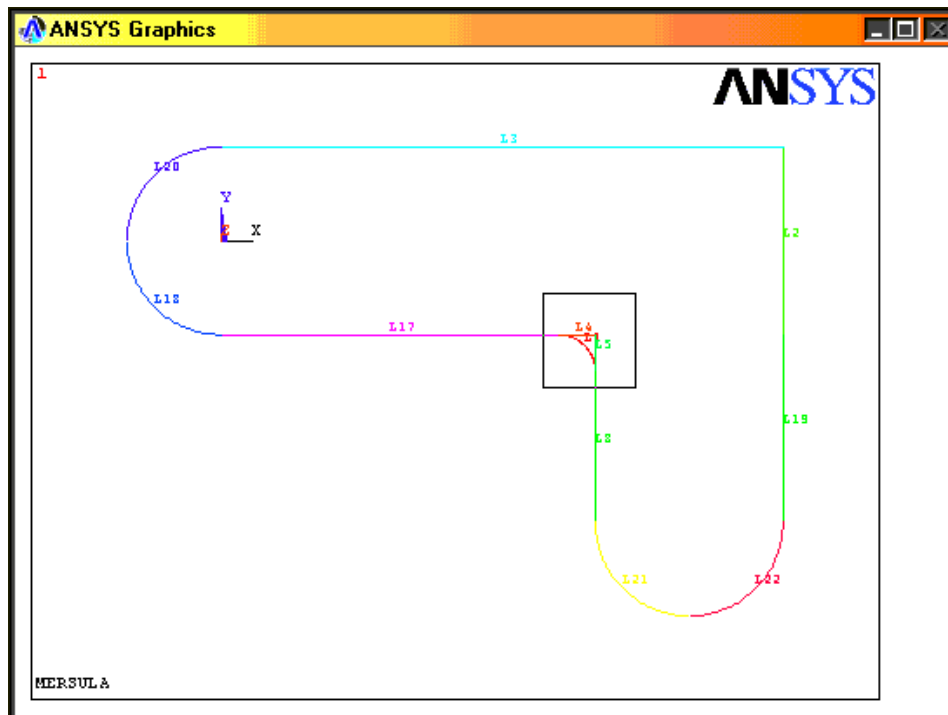


Figura 4.82 Ventana ANSYS Graphics mostrando la región fileteada seleccionada.

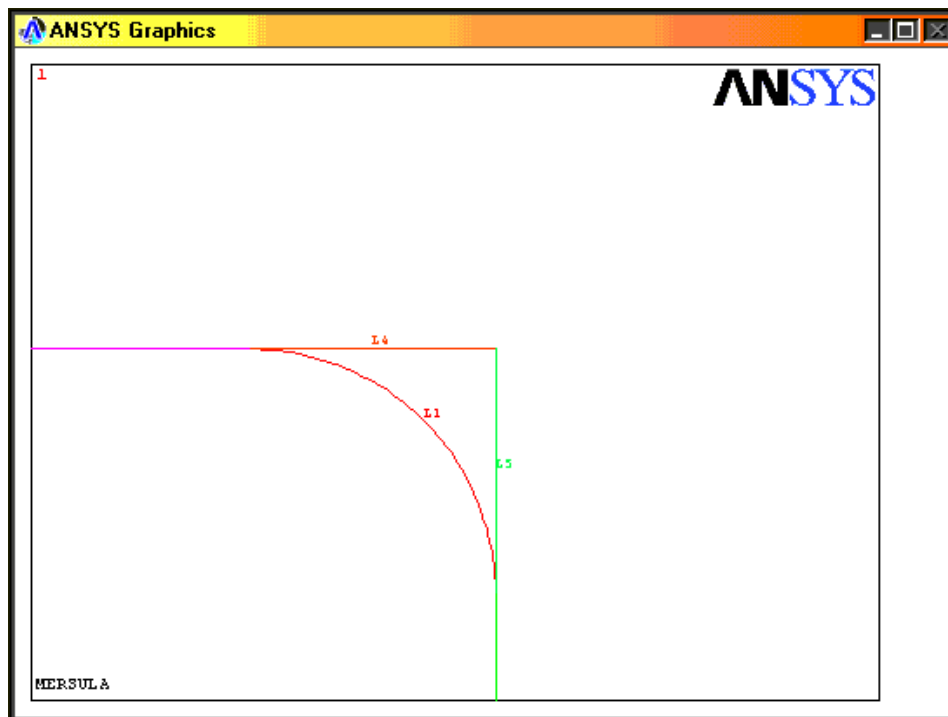


Figura 4.83 Ventana ANSYS Graphics mostrando la región fileteada ampliada.

- f. Seleccione **ANSYS Main Menu > Preprocessor > -Modeling- Create > -Areas- Arbitrary > By Lines +**
- g. Se abrirá la ventana de dialogo *Create Area by Lines*, figura 4.84.

- h. Seleccione en la ventana *ANSYS Graphics*, las líneas 4, 5 y 1, figura 4.85.
- i. Seleccione *OK* para crear el área, figura 4.86, y cerrar la ventana de dialogo.

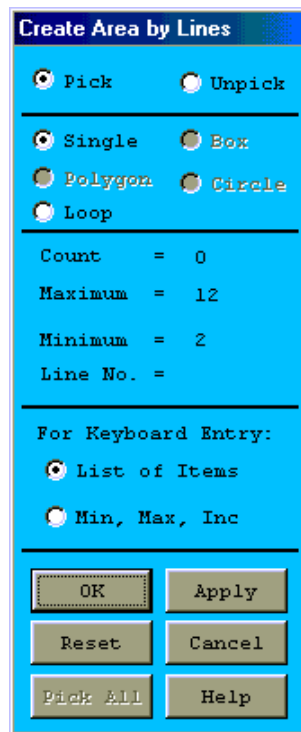


Figura 4.84 Ventana Create Area by Lines.

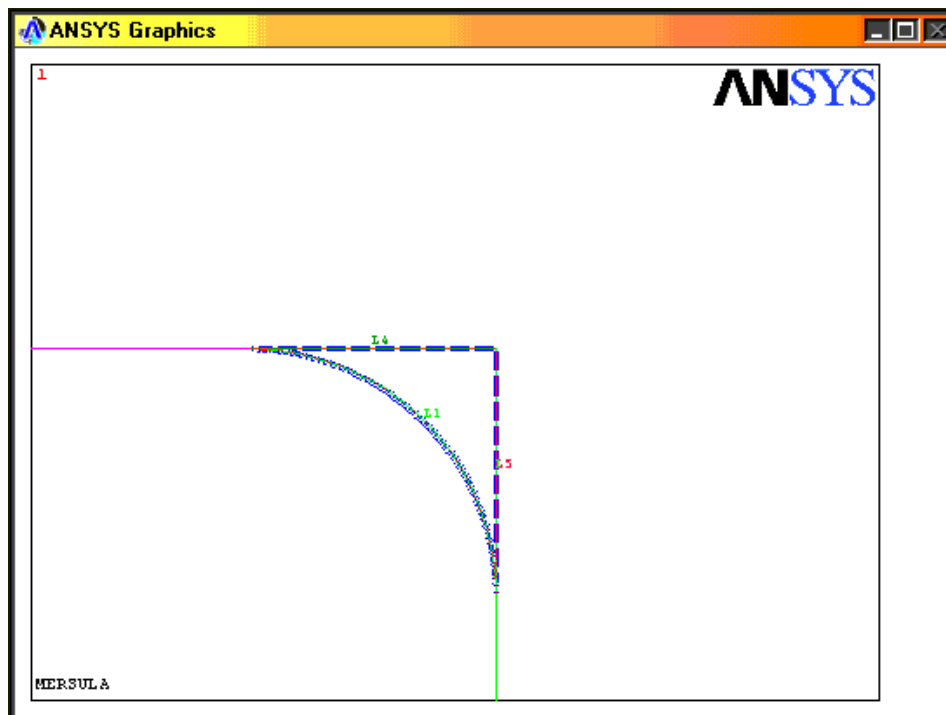


Figura 4.85 Ventana ANSYS Graphics mostrando las líneas seleccionadas.



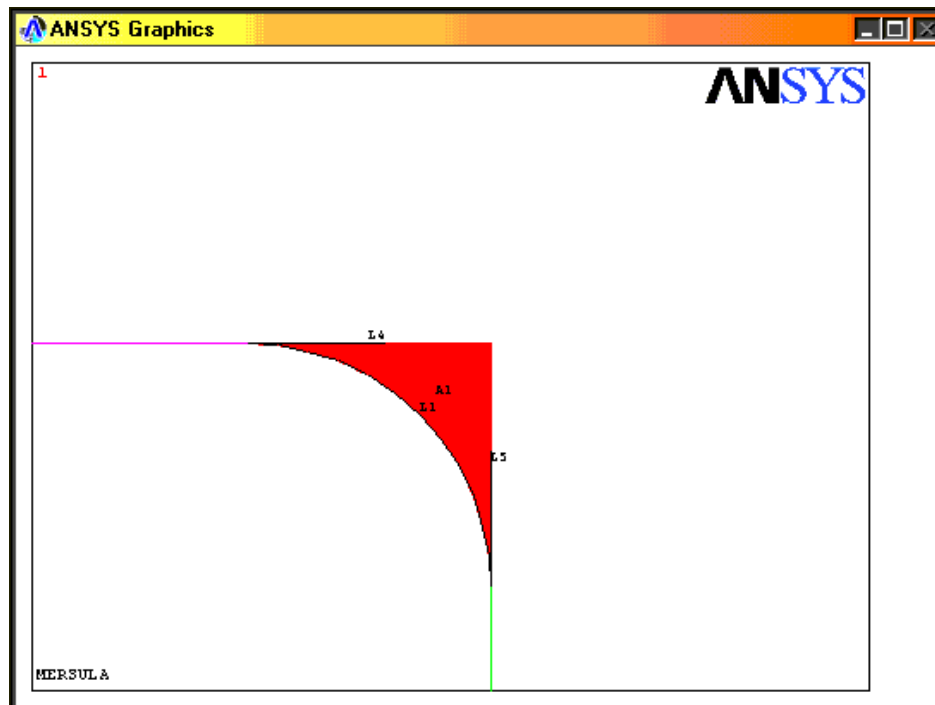


Figura 4.86 Ventana ANSYS Graphics mostrando el área creada de las líneas seleccionadas.

- j. Seleccione el icono *Fit* en la ventana *Pan-Zoom-Rotate* para mostrar toda la geometría, figura 4.87.
- k. Seleccione *Close* para cerrar la ventana de dialogo.

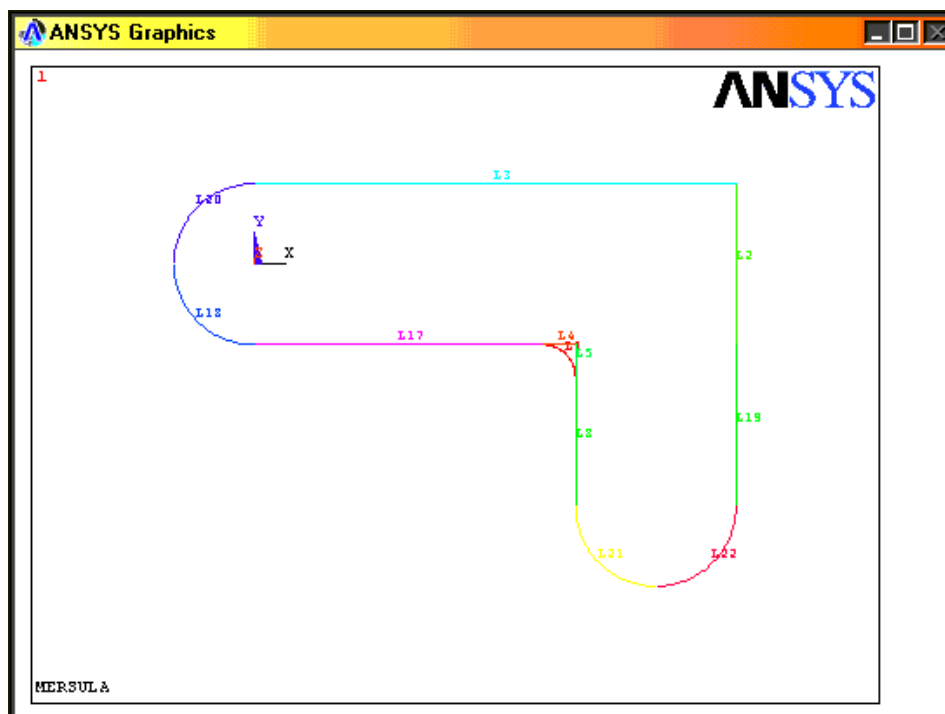


Figura 4.87 Ventana ANSYS Graphics mostrando la geometría completa.

1. Seleccione **Utility Menu > Plot > Areas**, figura 4.88.

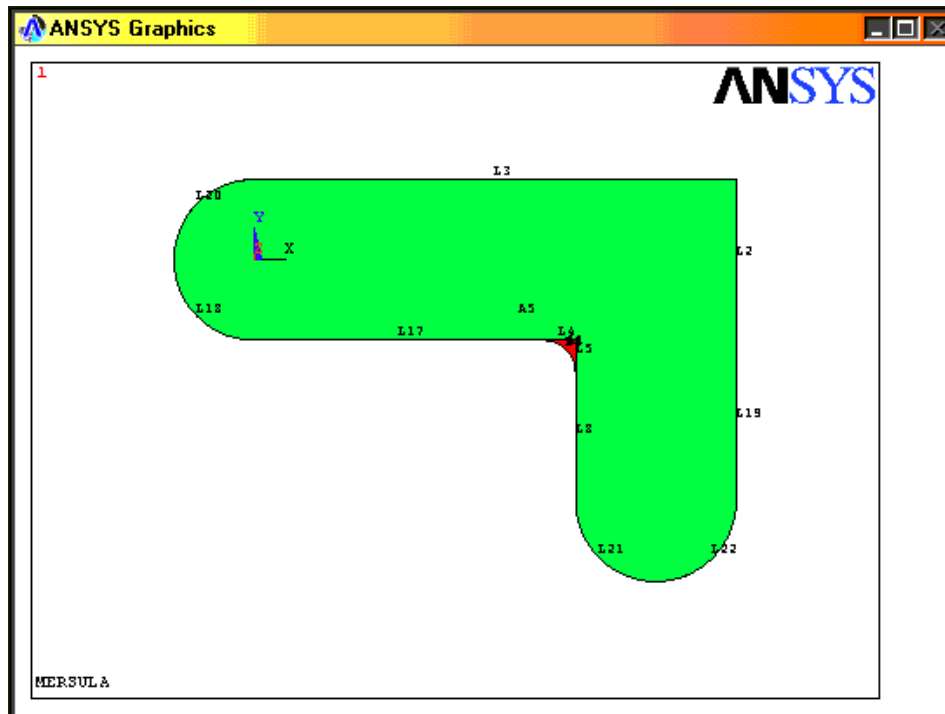


Figura 4.88 Ventana ANSYS Graphics mostrando dos áreas.

- m. Salvar la base de datos que se ha creado hasta ahora en el archivo *MENSULA.db*. Para salvar la base de datos seleccione de la ventana *ANSYS Toolbar* el icono *SAVE\_DB*.

#### ***Agregar áreas totales.***

- a. Seleccione **ANSYS Main Menu > Preprocessor > -Modeling- Operate > -Booleans- Add > Areas +**
- b. Se abrirá la ventana de dialogo *Add Areas*, figura 4.89.
- c. Seleccione *Pick All* para agregar todas las áreas, figura 4.90, y cerrar la ventana de dialogo.

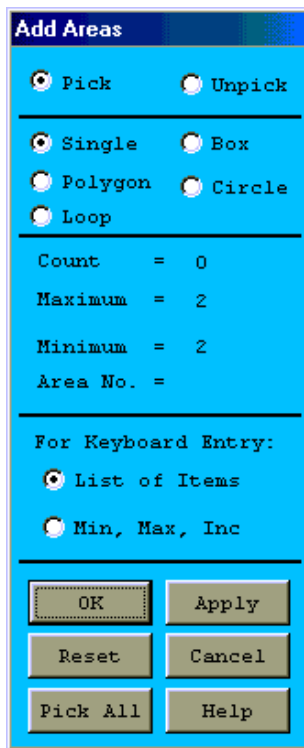


Figura 4.89 Ventana Add Areas.

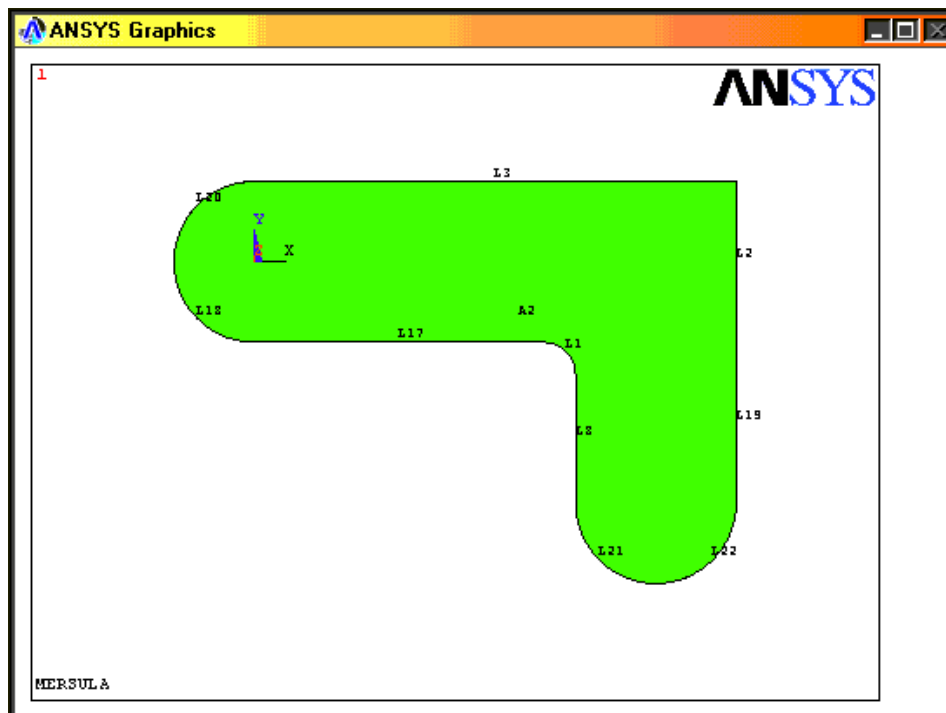


Figura 4.90 Ventana ANSYS Graphics mostrando el área agregada.

- d. Salvar la base de datos que se ha creado hasta ahora en el archivo *MENSULA.db*. Para salvar la base de datos seleccione de la ventana *ANSYS Toolbar* el icono *SAVE\_DB*.

Crear el primer agujero para pasador.

- a. Seleccione Utility Menu > WorkPlane > Display Working Plane (toggle on), figura 4.91.

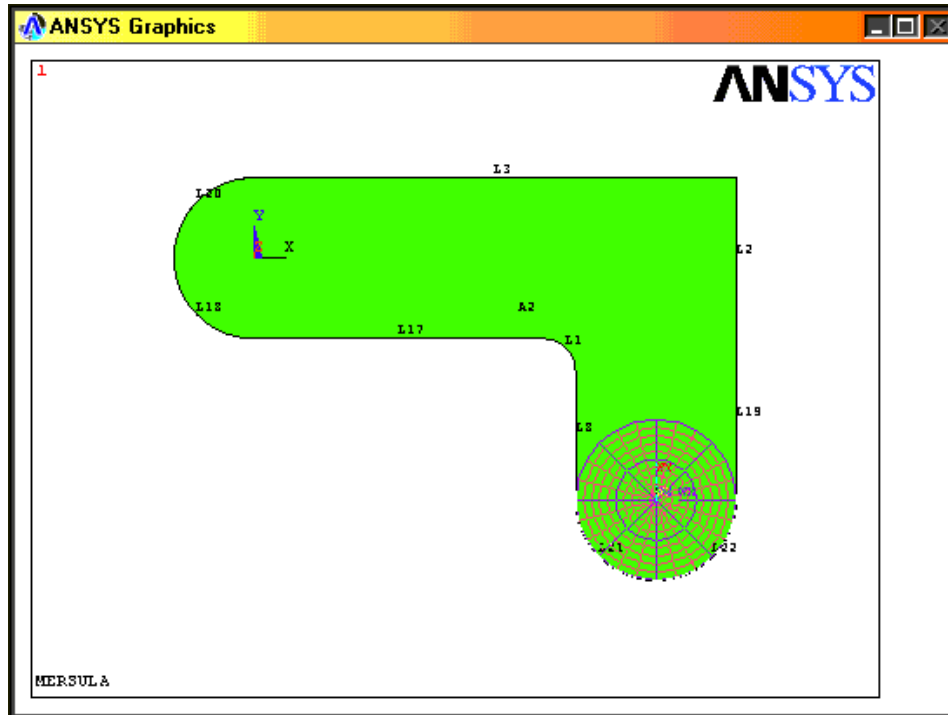


Figura 4.91 Ventana ANSYS Graphics mostrando el plano de trabajo activado.

- b. Seleccione ANSYS Main Menu > Preprocessor > -Modeling- Create > -Areas- Circle > Solid Circle +
- c. Se abrirá la ventana de dialogo *Solid Circular Area*, figura 4.92.
- d. Introducir 0 en el apartado *WP X*, 0 en el apartado *WP Y*, 0.4 en el apartado *Radius*.
- e. Seleccione *OK* para crear el primer círculo, figura 4.93, y cerrar la ventana de dialogo.

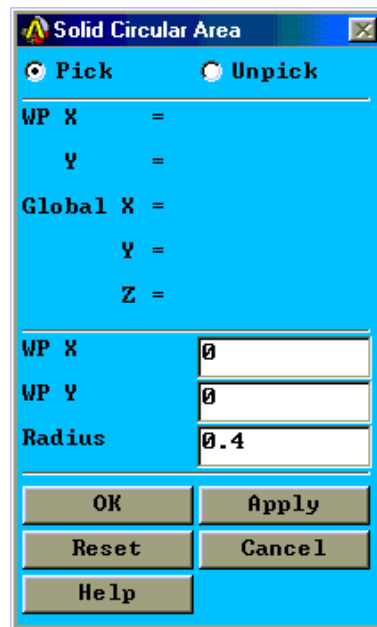


Figura 4.92 Ventana Solid Circular Area.

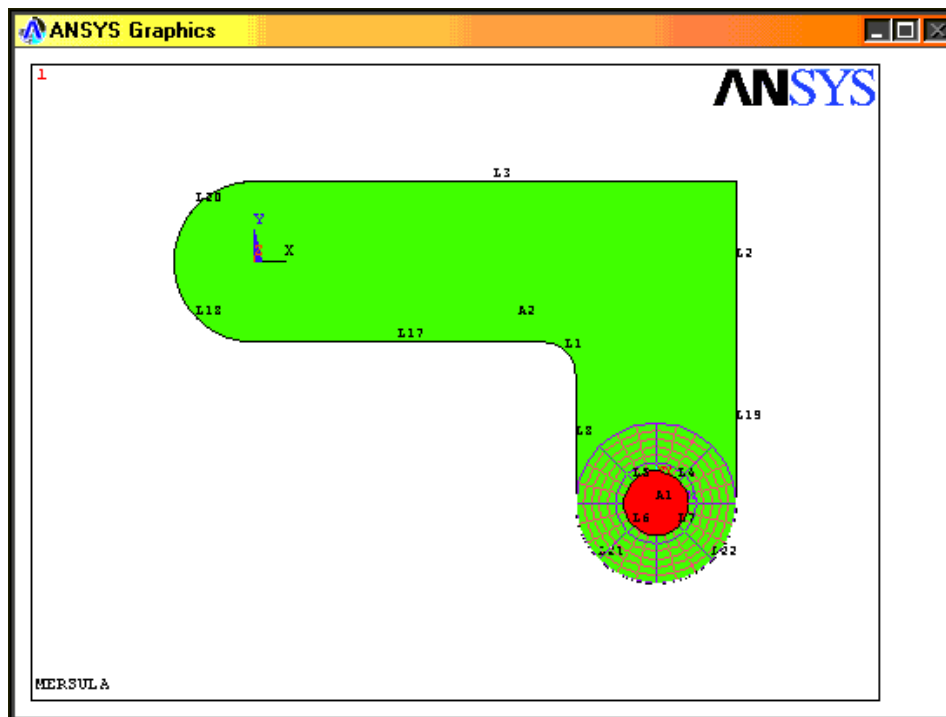


Figura 4.93 Ventana ANSYS Graphics mostrando el primer círculo interno creado.

*Mover el plano de trabajo y creación del segundo agujero para pasador.*

- a. Seleccione **Utility Menu > WorkPlane > Offset WP to > Global Origin**, figura 4.94.

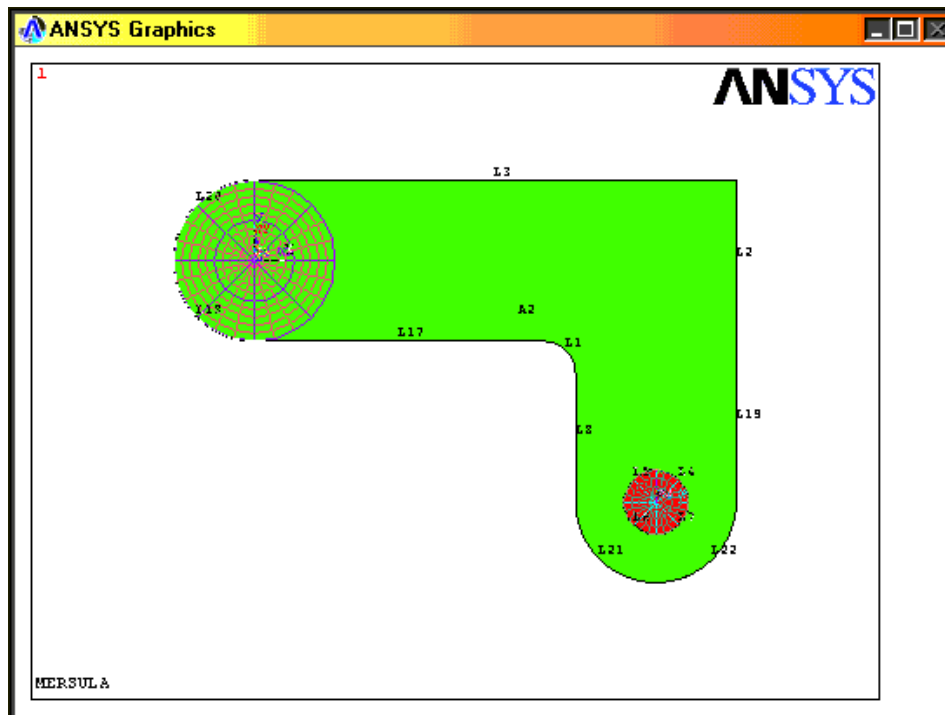


Figura 4.94 Ventana ANSYS Graphics mostrando el plano de trabajo en el origen global.

- b. Seleccione *ANSYS Main Menu > Preprocessor > -Modeling- Create > -Areas- Circle > Solid Circle +*
- c. Se abrirá la ventana de dialogo *Solid Circular Area*, figura 4.95.
- d. Introducir 0 en el apartado *WP X*, 0 en el apartado *WP Y*, 0.4 en el apartado *Radius*.
- e. Seleccione *OK* para crear el segundo círculo, figura 4.96, y cerrar la ventana de dialogo.

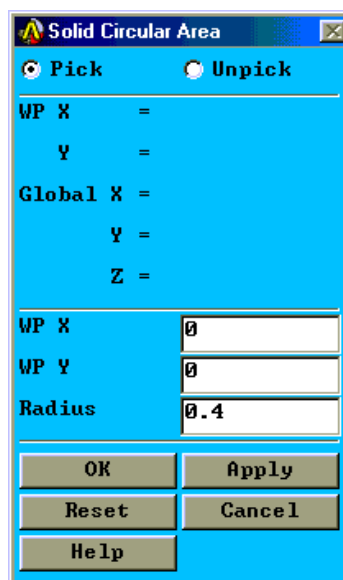


Figura 4.95 Ventana Solid Circular Area.

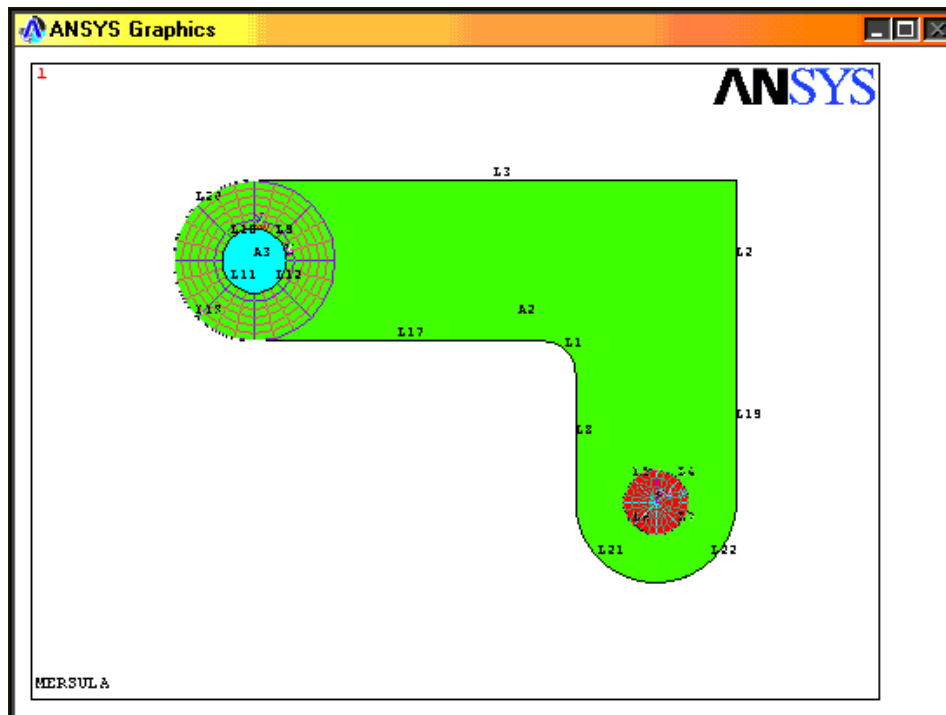


Figura 4.96 Ventana ANSYS Graphics mostrando el segundo círculo interno creado.

- f. Seleccione Utility Menu > WorkPlane > Display Working Plane (toggle off), figura 4.97.

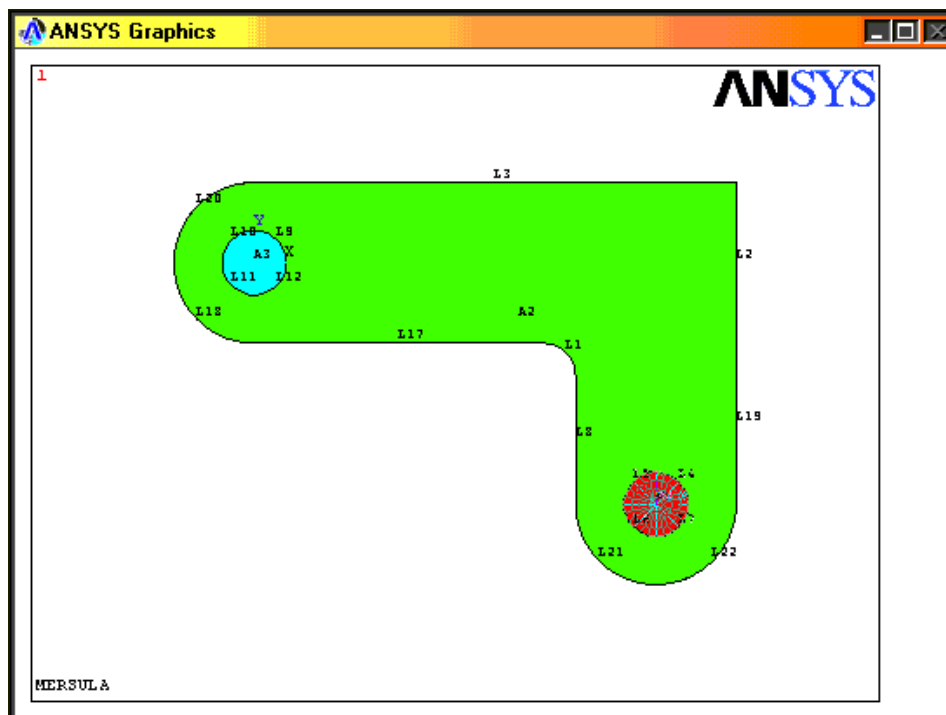


Figura 4.97 Ventana ANSYS Graphics mostrando la geometría sin plano de trabajo activado.

g. Selección Utility Menu > Plot > Replot, figura 4.98.

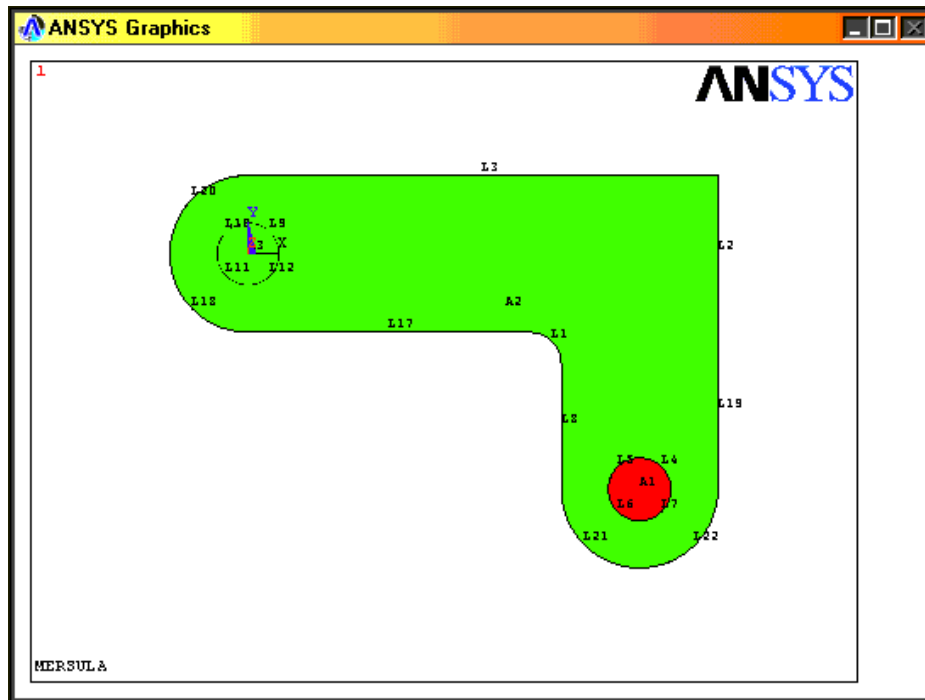


Figura 4.98 Ventana ANSYS Graphics mostrando la geometría actualizada.

h. Selección Utility Menu > Plot > Lines, figura 4.99.

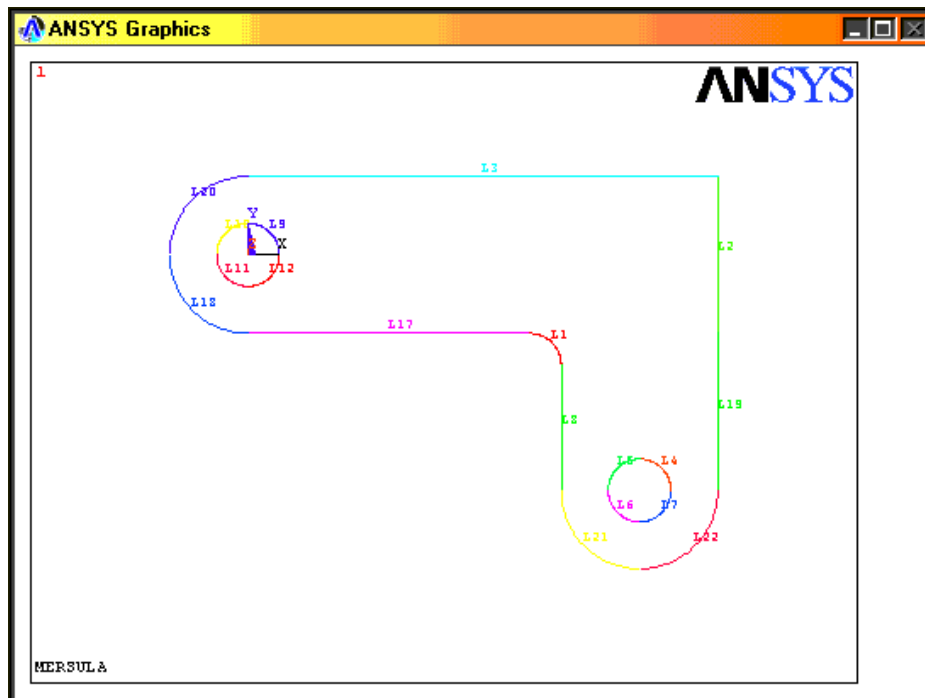


Figura 4.99 Ventana ANSYS Graphics mostrando las líneas que conforman la geometría.



- i. Salvar la base de datos que se ha creado hasta ahora en el archivo *MENSULA.db*. Para salvar la base de datos seleccione de la ventana *ANSYS Toolbar* el icono *SAVE\_DB*.

*Sustraer agujeros para pasador de la ménsula.*

- a. Seleccione **ANSYS Main Menu > Preprocessor > -Modeling- Operate > -Booleans- Subtract > Areas +**
- b. Se abrirá la ventana de dialogo *Subtract Areas*, figura 4.100.
- c. Seleccione en la ventana *ANSYS Graphics*, la ménsula como el área base de la cual se va a sustraer, figura 4.101.
- d. Seleccione *Apply* para aceptar el área base de la cual se va a sustraer.
- e. Seleccione en la ventana *ANSYS Graphics*, ambos agujeros para pasador como las áreas para sustraer, figura 4.102.
- f. Seleccione *OK* para sustraer los agujeros para pasador, figura 4.103, y cerrar la ventana de dialogo.

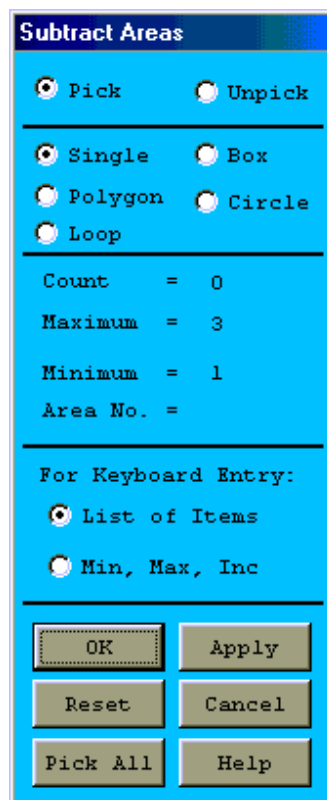


Figura 4.100 Ventana Subtract Areas.

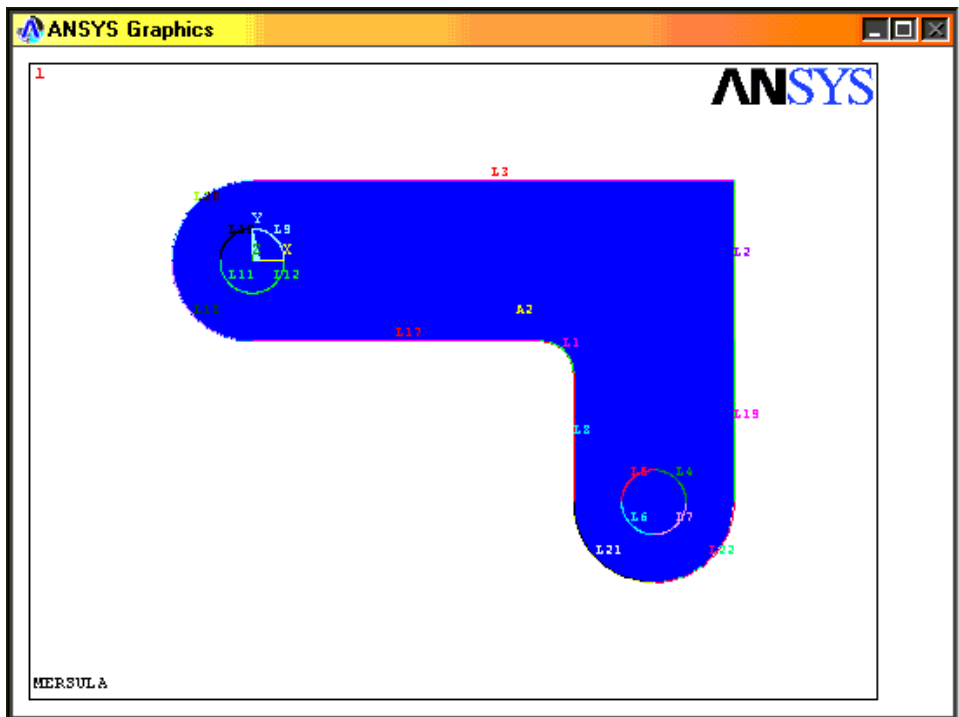


Figura 4.101 Ventana ANSYS Graphics mostrando el área base de la cual se va a sustraer.

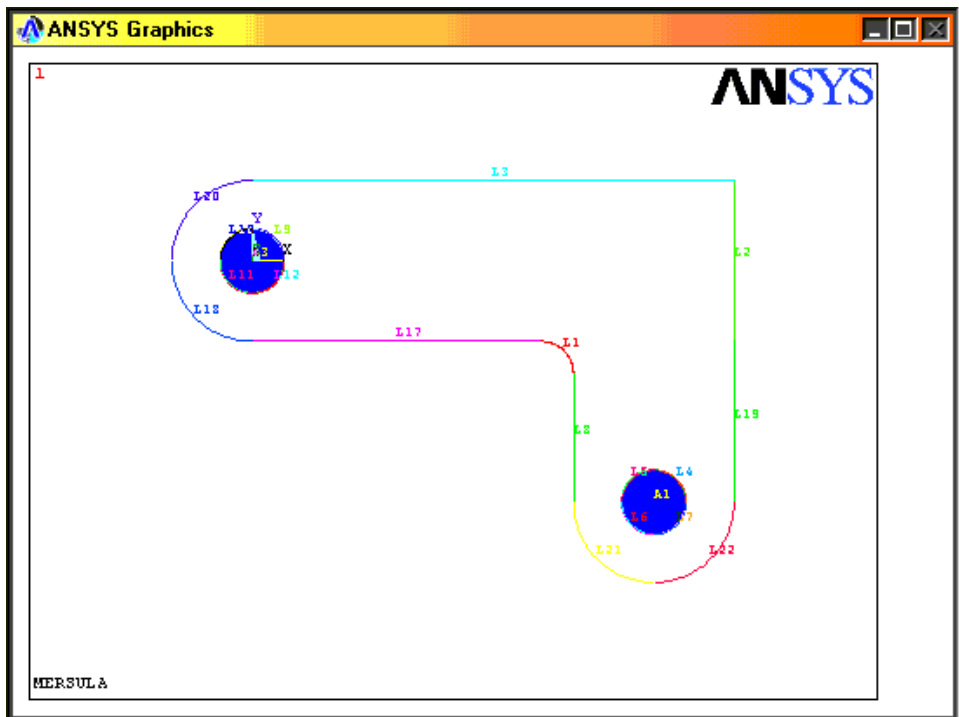


Figura 4.102 Ventana ANSYS Graphics mostrando las áreas a sustraer.

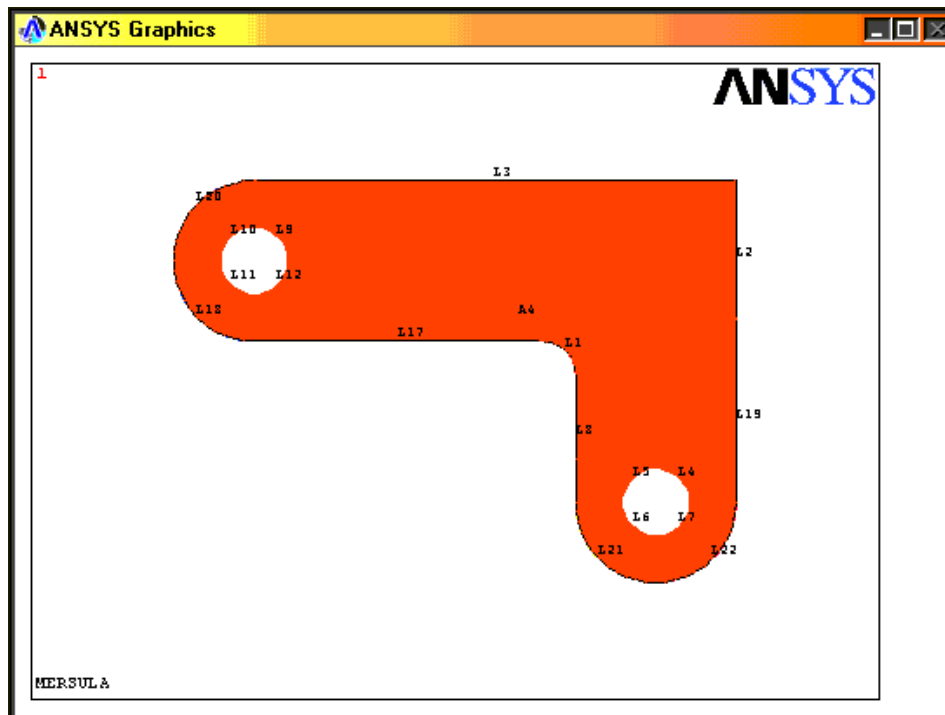


Figura 4.103 Ventana ANSYS Graphics mostrando el área final.

**Salvar la base de datos como (MODELO.db).**

- Seleccione **Utility Menu > File > Save As**
- Se abrirá la ventana de diálogo *Save DataBase*, figura 4.104.
- Introducir *MODELO.db* en el apartado *Save Database to*.
- Seleccione *OK* para salvar y cerrar la ventana de dialogo.

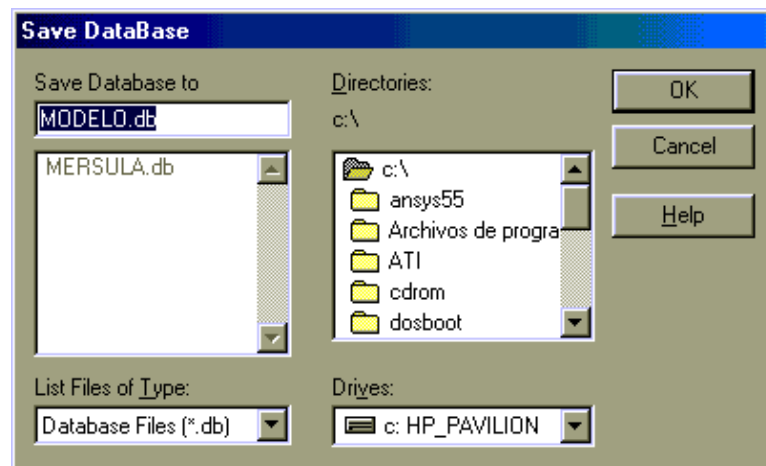


Figura 4.104 Ventana Save DataBase.

**Definir propiedades del material.**

- g. Seleccione ANSYS Main Menu > Preprocessor > Material Props > -Constant- Isotropic...
- h. Se abrirá la ventana de dialogo *Isotropic Material Properties*, figura 4.105.
- i. Seleccione *OK* para definir el material *1*.

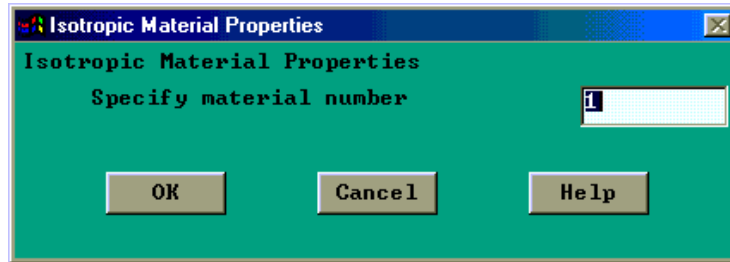


Figura 4.105 Ventana Isotropic Material Properties.

- j. Se abrirá la ventana de dialogo *Isotropic Material Properties*, figura 4.106.
- k. Introducir *30E6* en el apartado *Young's modulus EX* e introducir *0.27* en el apartado *Poisson's ratio <minor> NUXY*.
- l. Seleccione *OK* para aceptar las propiedades y cerrar la ventana de dialogo.

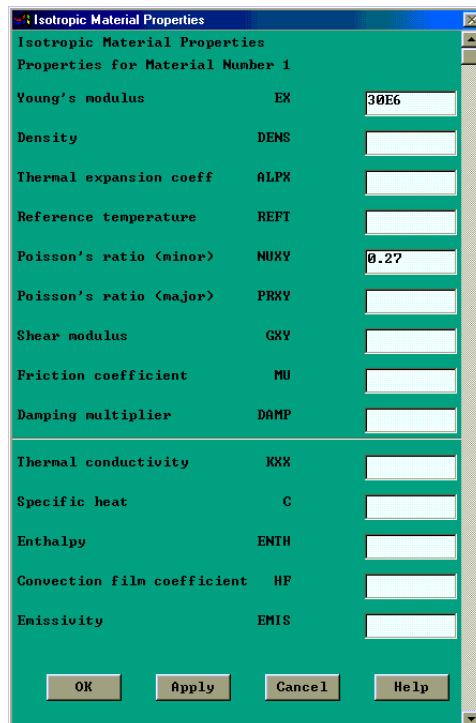


Figura 4.106 Ventana Isotropic Material Properties.

**Seleccionar preferencias.**

- e. Seleccione **ANSYS Main Menu > Preferences...**
- f. Se abrirá la ventana de dialogo *Preferences for GUI Filtering*, figura 4.107.
- g. Seleccione la opción *Structural* en el apartado *Individual discipline(s) to show in the GUI*. Dejar las otras opciones tal como están.
- h. Seleccione *OK* para aceptar y cerrar la ventana de dialogo.

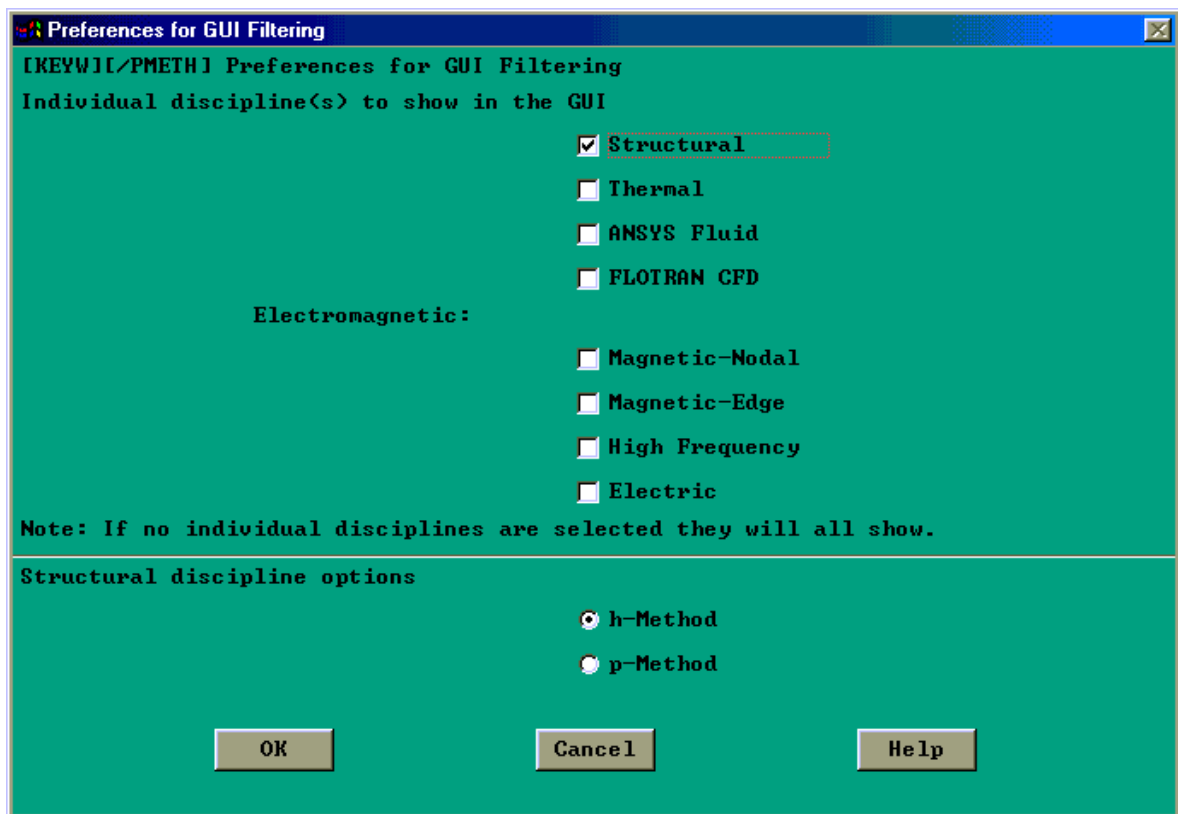


Figura 4.107 Ventana Preferences for GUI Filtering.

**Definir tipo de elemento y sus opciones.**

- l. Seleccione **ANSYS Main Menu > Preprocessor > Element Type > Add/Edit/Delete...**
- m. Se abrirá la ventana de dialogo *Element Types*, figura 4.108.
- n. Seleccione *Add...* para definir el tipo de elemento.

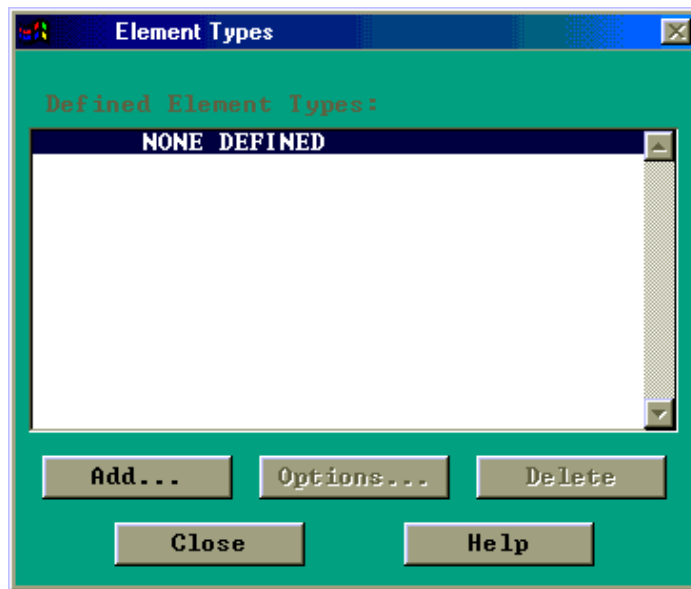


Figura 4.108 Ventana Element Types.

- o. Se abrirá la ventana de dialogo *Library of Element Types*, figura 4.109.
- p. Seleccione del apartado *Library of Element Types* la opción *Structural Solid* y *Quad 8node 82*.
- q. Seleccione *OK* para aceptar el tipo de elemento y cerrar la ventana de dialogo.

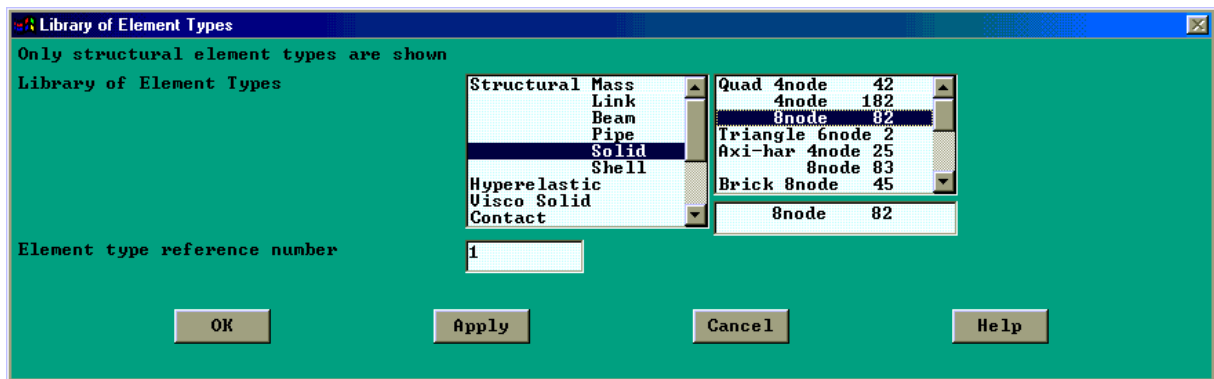


Figura 4.109 Ventana Library of Element Types.

- r. Se abrirá la ventana de dialogo *Element Types*, figura 4.110.
- s. Seleccione *Options...* para definir las opciones para el elemento PLANE82.

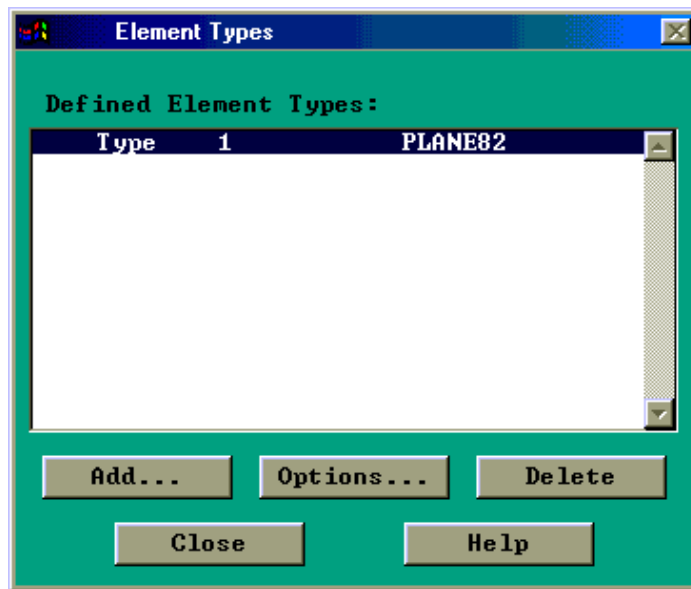


Figura 4.110 Ventana Element Types.

- t. Se abrirá la ventana de dialogo *PLANE 82 element type options*, figura 4.111.
- u. Seleccione del apartado *Element behavior (comportamiento del elemento)* K3 la opción *Plane Stress with Thickness (Plane strs w/thk)*.
- v. Seleccione *OK* para aceptar las opciones y cerrar la ventana de dialogo.

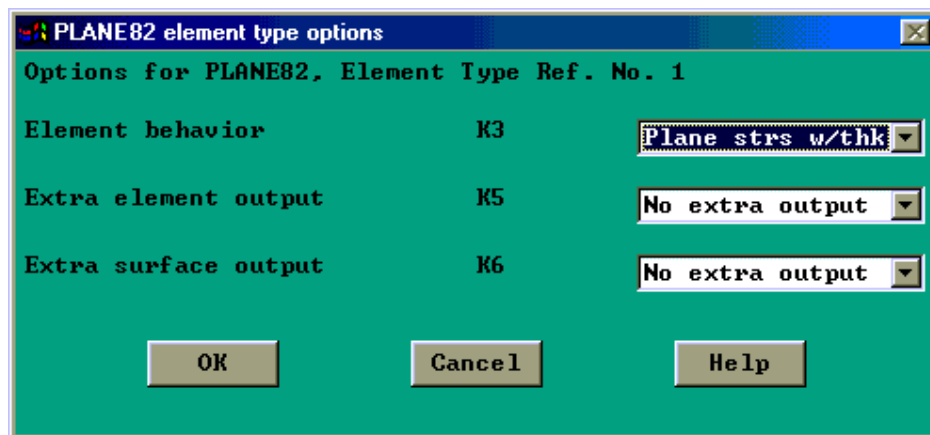


Figura 4.111 Ventana PLANE82 element type options.

***Definir constantes reales.***

- k. Seleccione *ANSYS Main Menu > Preprocessor > Real Constants...*
- l. Se abrirá la ventana de dialogo *Real Constants*, figura 4.112.
- m. Seleccione *Add...* para añadir un conjunto de constantes reales.

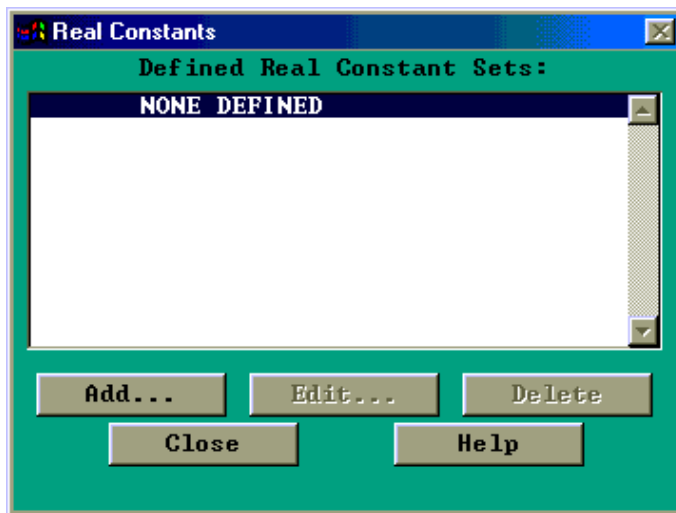


Figura 4.112 Ventana Real Constants.

- n. Se abrirá la ventana de dialogo *Element Type for Real Constants*, figura 4.113.
- o. Seleccione *Type 1 PLANE82* mediante presionar *OK*.

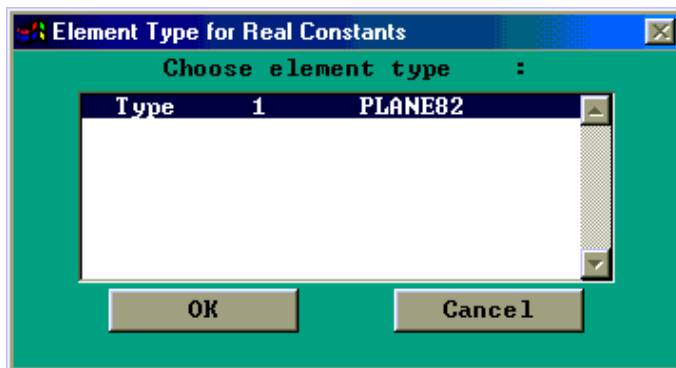


Figura 4.113 Ventana Element Type for Real Constants.

- p. Se abrirá la ventana de dialogo *Real Constant Set Number 1, for PLANE82*; figura 4.114.
- q. Introducir *0.5* en el apartado *Thickness (espesor) THK*.
- r. Seleccione *OK* para aceptar la constante y cerrar la ventana de dialogo.



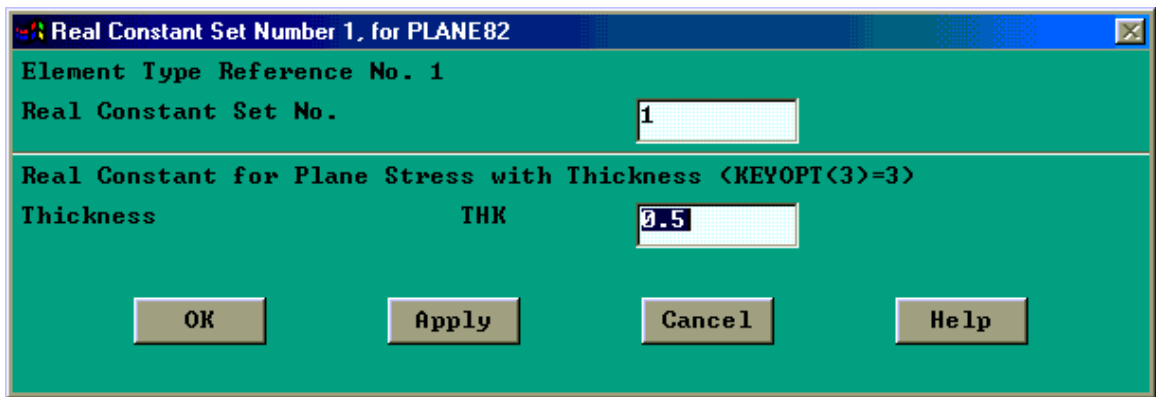


Figura 4.114 Ventana Real Constant Set Number 1, for PLANE82.

- s. Se abrirá la ventana de dialogo *Real Constants*, figura 4.115.
- t. Seleccione *Close* para cerrar la ventana *Real Constants*.

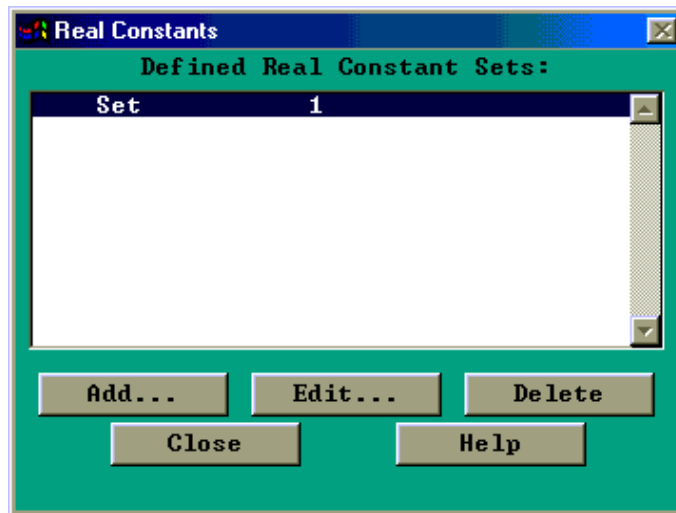


Figura 4.115 Ventana Real Constants.

***Mallar el área.***

- i. Seleccione *ANSYS Main Menu > Preprocessor > MeshTool...*
- j. Se abrirá la ventana de dialogo *MeshTool*, figura 4.116.
- k. Seleccione el icono *Set* en el apartado *Size Controls: Global*.

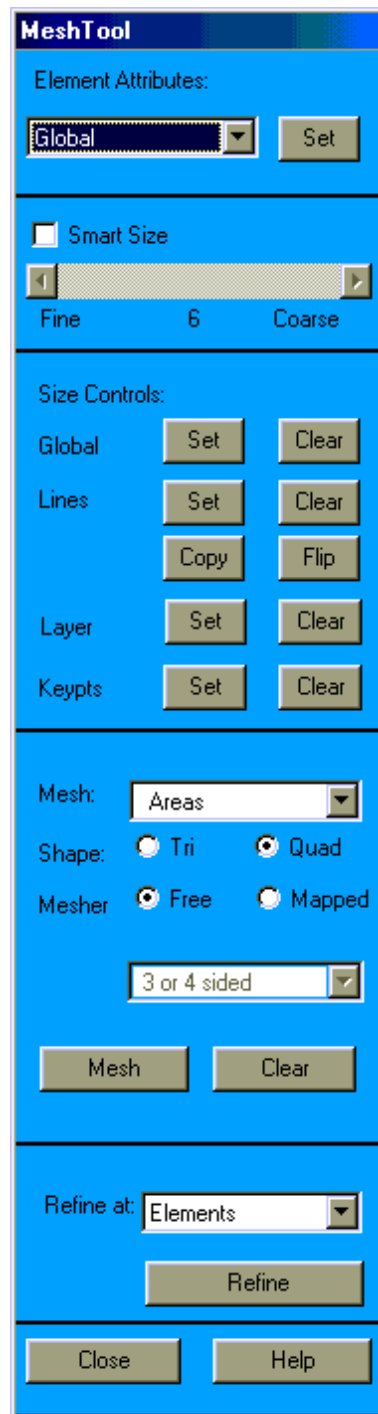


Figura 4.116 Ventana MeshTool.

- l. Se abrirá la ventana de diálogo *Global Element Sizes*, figura 4.117.
- m. Introducir *0.5* en el apartado *SIZE Element edge length*.
- n. Seleccione *OK* para aceptar los cambios solicitados y cerrar la ventana de dialogo.

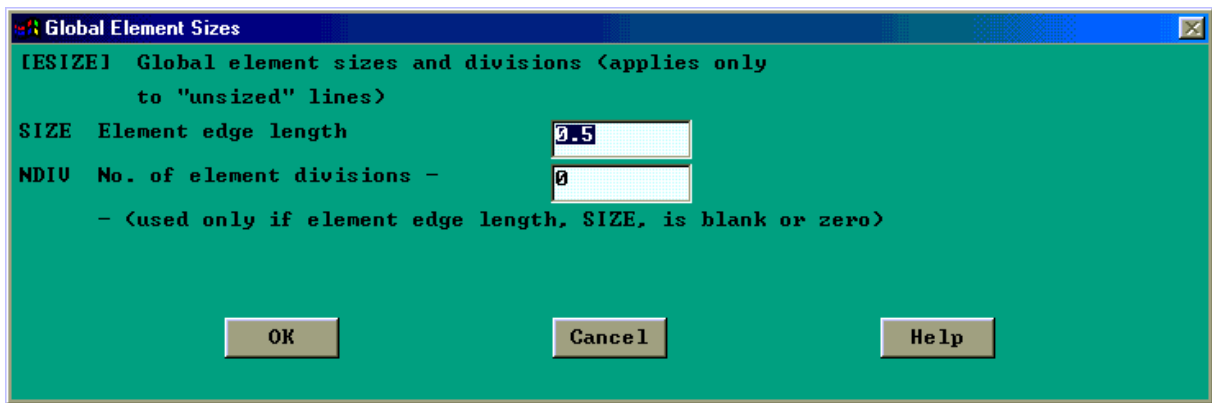


Figura 4.117 Ventana Global Element Sizes.

- o. Verifique en la ventana *MeshTool* las opciones: *Areas* en el apartado *Mesh*, *Quad* en el apartado *Shape*, *Free* en el apartado *Meshes*.
- p. Seleccione en la ventana *MeshTool* el icono *Mesh*.
- q. Se abrirá la ventana de dialogo *Mesh Areas*, figura 4.118.
- r. Seleccione *Pick All* para mallar el área, figura 4.119, y cerrar la ventana de dialogo.

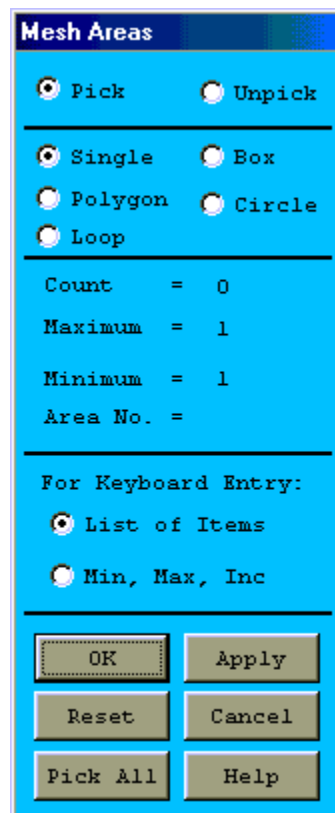


Figura 4.118 Ventana Mesh Areas.

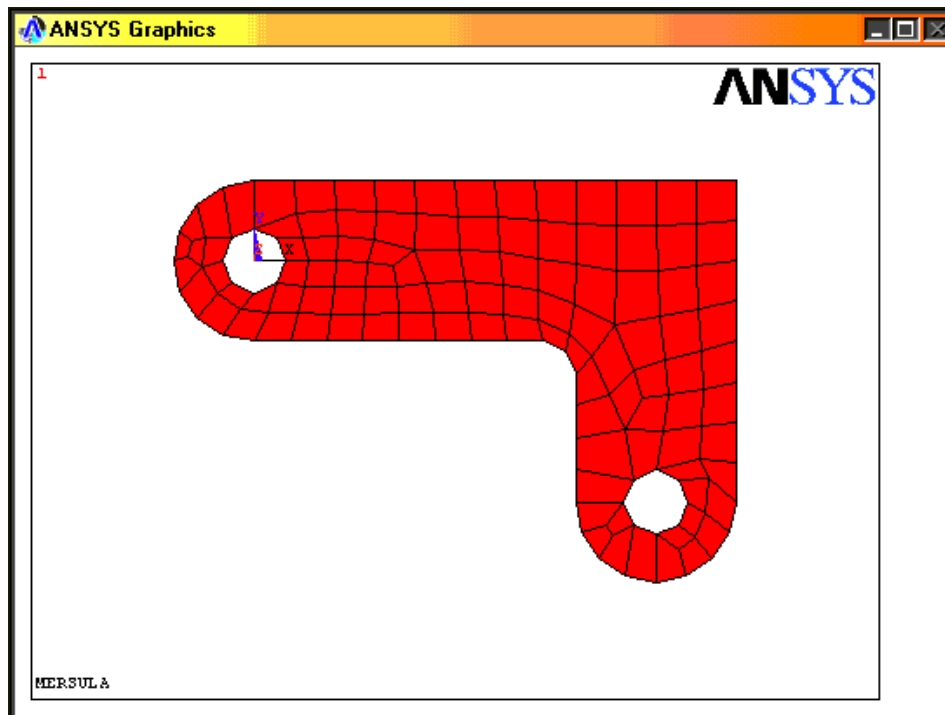


Figura 4.119 Ventana ANSYS Graphics mostrando el área mallada.

**Salvar la base de datos como (MALLA.db).**

- e. Seleccione **Utility Menu > File > Save as...**
- f. Se abrirá la ventana de dialogo *Save DataBase*, figura 4.120.
- g. Introducir *MALLA.db* en el apartado *Save Database to*.
- h. Seleccione *OK* para salvar el archivo y cerrar la ventana de dialogo.

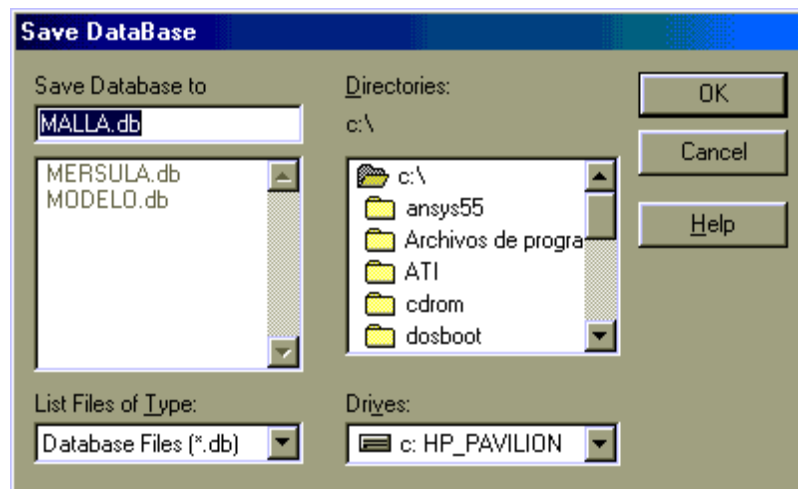


Figura 4.120 Ventana Save DataBase.

#### 4.2.4. SOLUCIÓN

*Aplicar restricciones de desplazamiento.*

- q. Seleccione *ANSYS Main Menu > Solution > -Loads- Apply > -Structural- Displacement > On Lines +*
- r. Se abrirá la ventana de dialogo *Apply U,ROT on Lines*, figura 4.121.

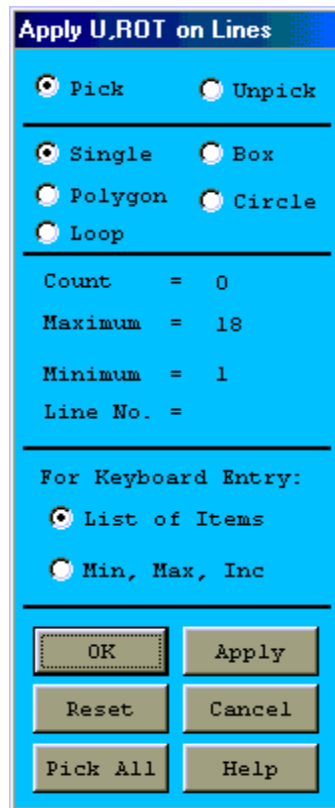


Figura 4.121 Ventana Apply U,ROT on Lines.

- s. Seleccione en la ventana *ANSYS Graphics*, las cuatro líneas alrededor del agujero para pasador superior izquierdo (*L10, L9, L11, L12*), figura 4.122.

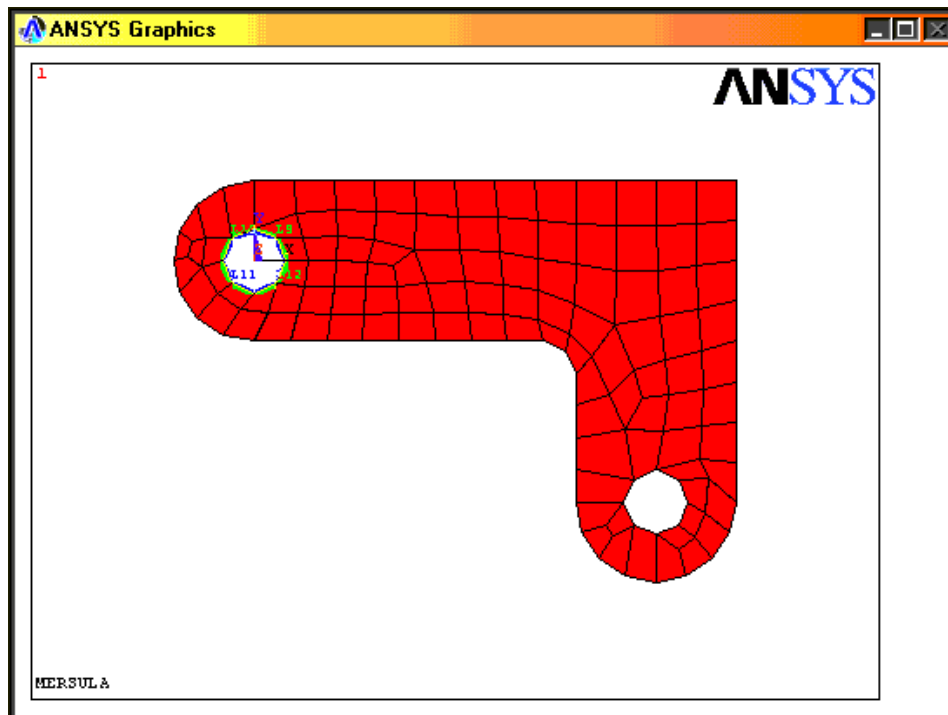


Figura 4.122 Ventana ANSYS Graphics mostrando las líneas seleccionadas.

- t. Seleccione *OK* para definir la restricción en las líneas seleccionadas.
- u. Se abrirá la ventana de dialogo *Apply U,ROT on Lines*, figura 4.123.
- v. Seleccione *All DOF* en el apartado *Lab2 DOFs to be constrained*.
- w. Introducir *0* en el apartado *VALUE Displacement value*.
- x. Seleccione *OK* para aplicar las restricciones, figura 4.124, y cerrar la ventana de diálogo.

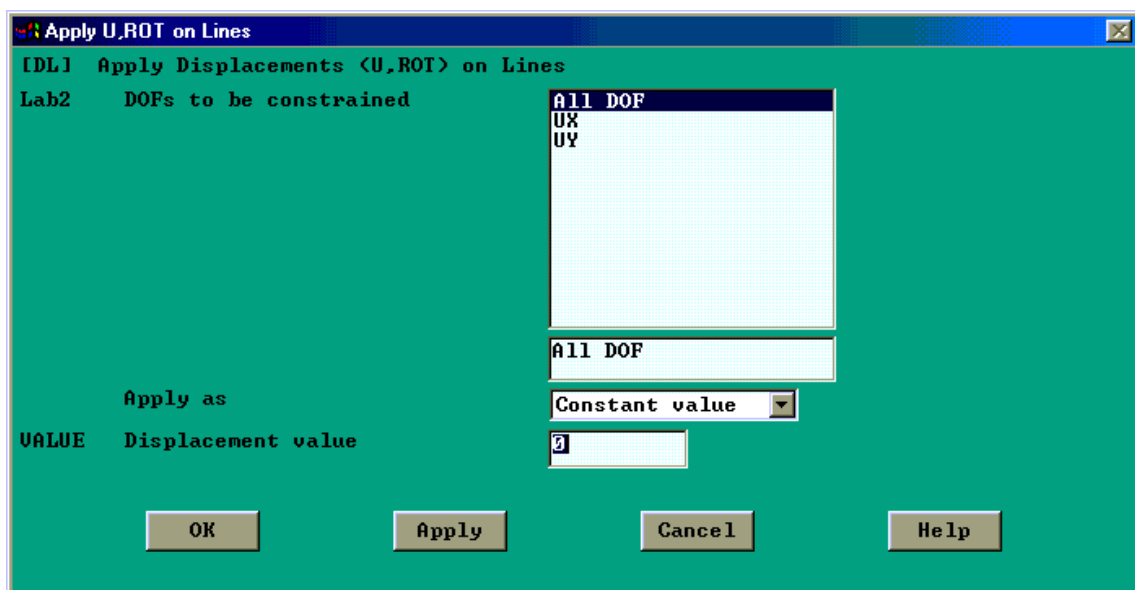


Figura 4.123 Ventana Apply U,ROT on Lines.

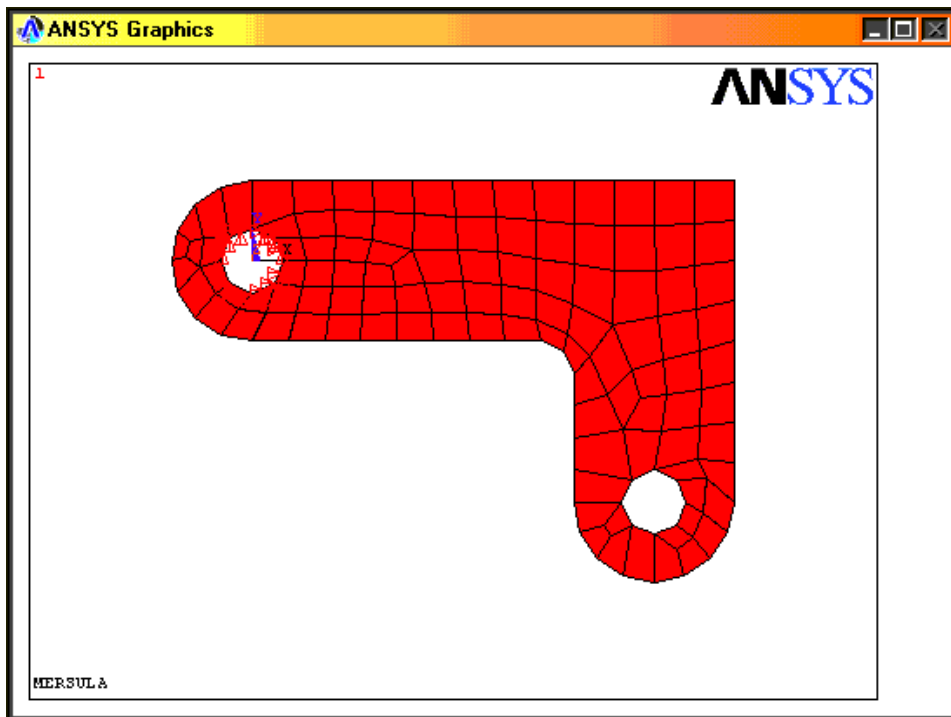


Figura 4.124 Ventana ANSYS Graphics mostrando las restricciones aplicadas.

y. Seleccione **Utility Menu > Plot > Lines**, figura 4.125.

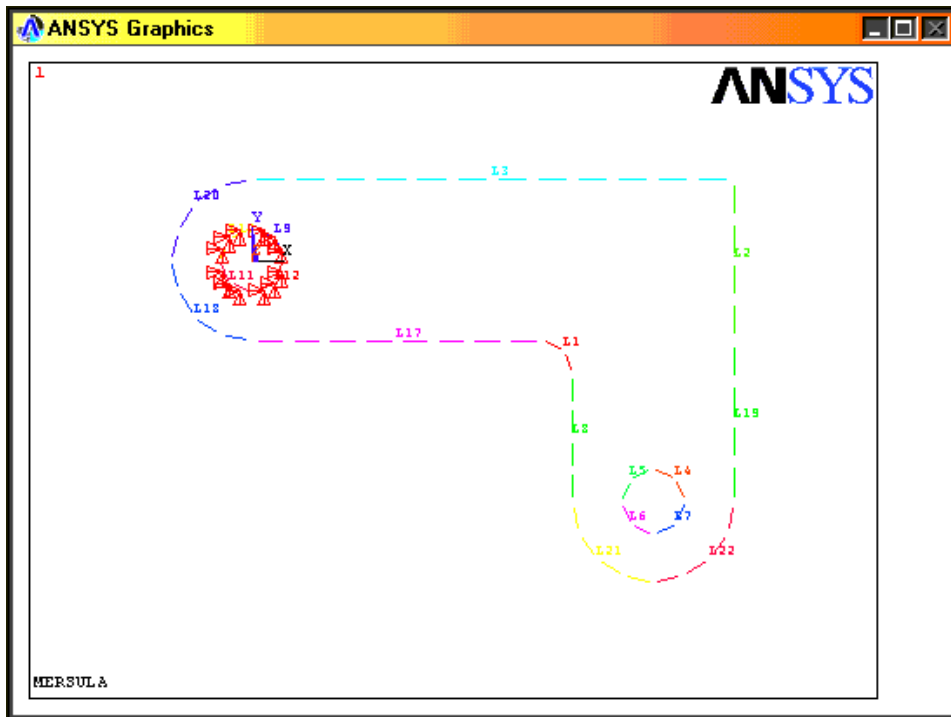


Figura 4.125 Ventana ANSYS Graphics mostrando las líneas de la geometría.

- z. Salvar la base de datos que se ha creado hasta ahora en el archivo *MALLA.db*. Para salvar la base de datos seleccione de la ventana *ANSYS Toolbar* el icono *SAVE\_DB*, figura 4.126.

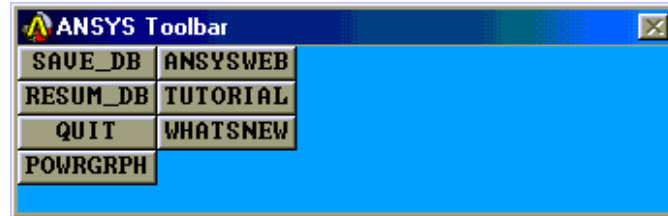


Figura 4.126 Ventana ANSYS Toolbar.

***Aplicar la carga de presión.***

- j. Seleccione *ANSYS Main Menu > Solution > -Loads- Apply > -Structural- Pressure > On Lines +*
- k. Se abrirá la ventana de dialogo *Apply PRES on Lines*, figura 4.127.

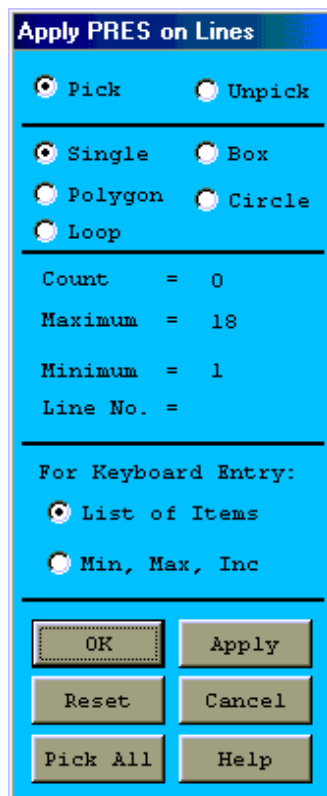


Figura 4.127 Ventana Apply PRES on Lines.



- l. Seleccione en la ventana *ANSYS Graphics*, la línea (*L6*) del agujero para pasador inferior derecho, figura 4.128.

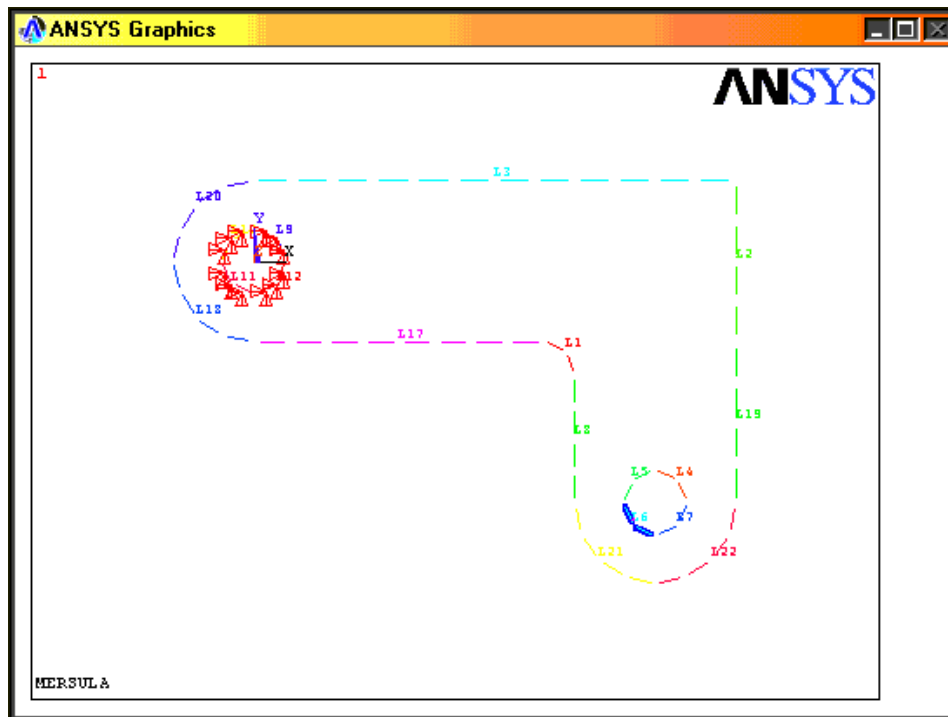


Figura 4.128 Ventana ANSYS Graphics mostrando la línea seleccionada.

- m. Seleccione *OK* para definir la fuerza en el nodo seleccionado.
- n. Se abrirá la ventana de dialogo *Apply PRES on Lines*, figura 4.129.
- o. Introduzca *50* en el apartado *VALUE Load PRES value*. Introduzca *500* en el apartado *Value*.
- p. Seleccione *Apply* para aplicar la carga de presión, figura 4.130, y cerrar la ventana de diálogo.

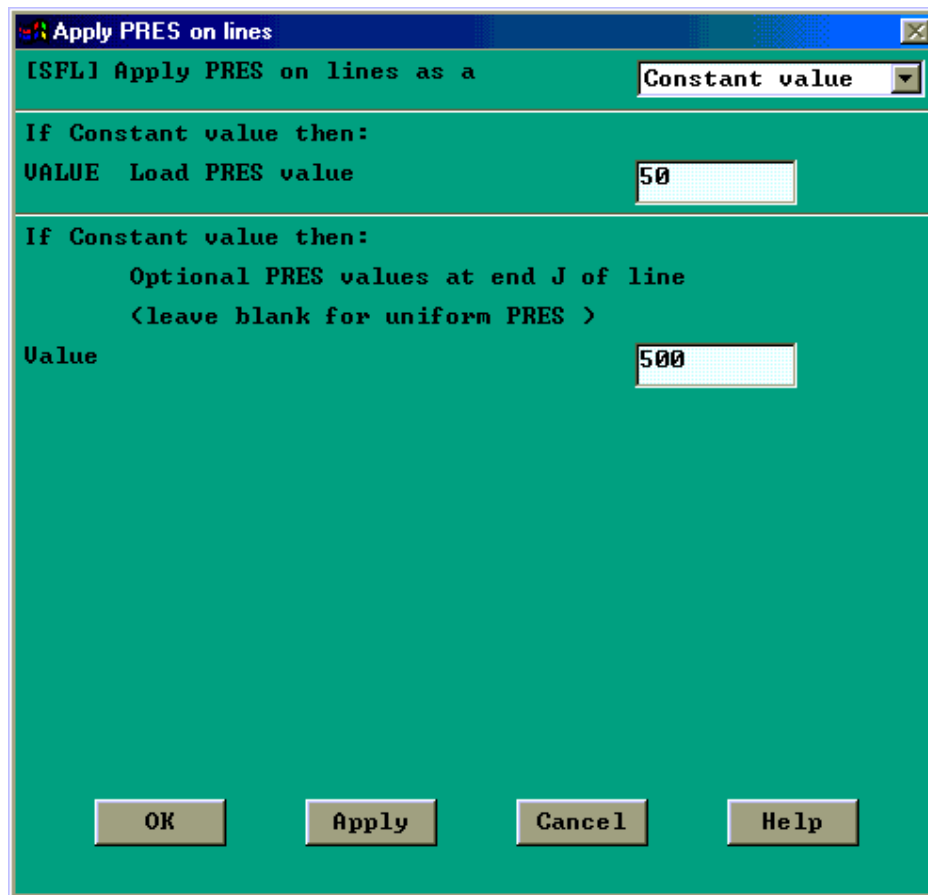


Figura 4.129 Ventana Apply PRES on Lines.

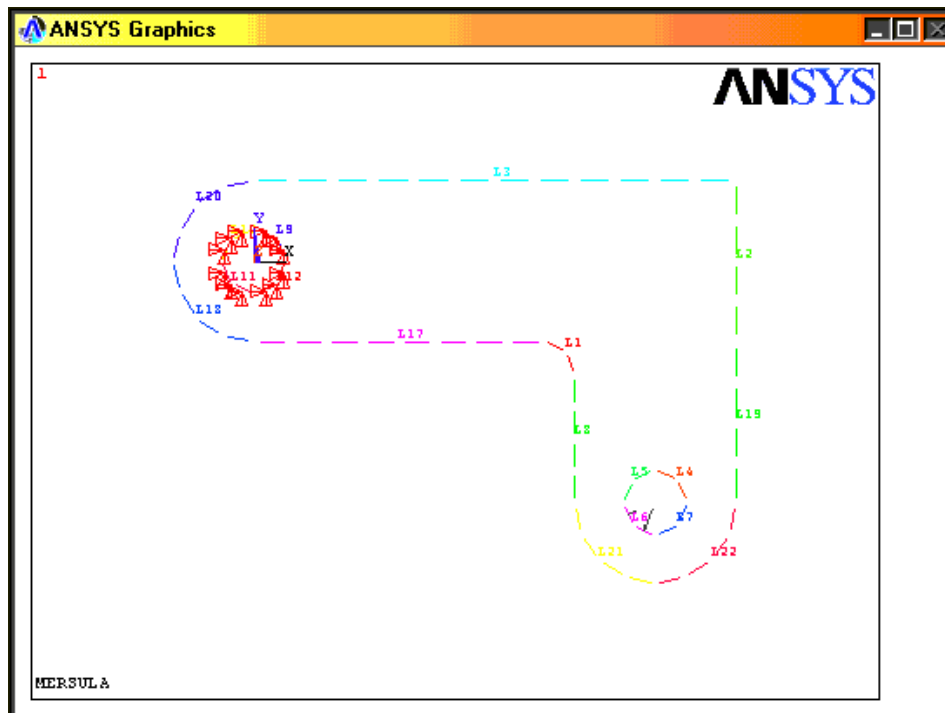


Figura 4.130 Ventana ANSYS Graphics mostrando la carga de presión aplicada.

- q. Seleccione en la ventana *ANSYS Graphics*, la línea (*L7*) del agujero para pasador inferior derecho, figura 4.131.
- r. Se abrirá la ventana de dialogo *Apply PRES on Lines*, figura 4.132.
- s. Introduzca *500* en el apartado *VALUE Load PRES value*. Introduzca *50* en el apartado *Value*.
- t. Seleccione *OK* para aplicar la carga de presión, figura 4.133, y cerrar la ventana.

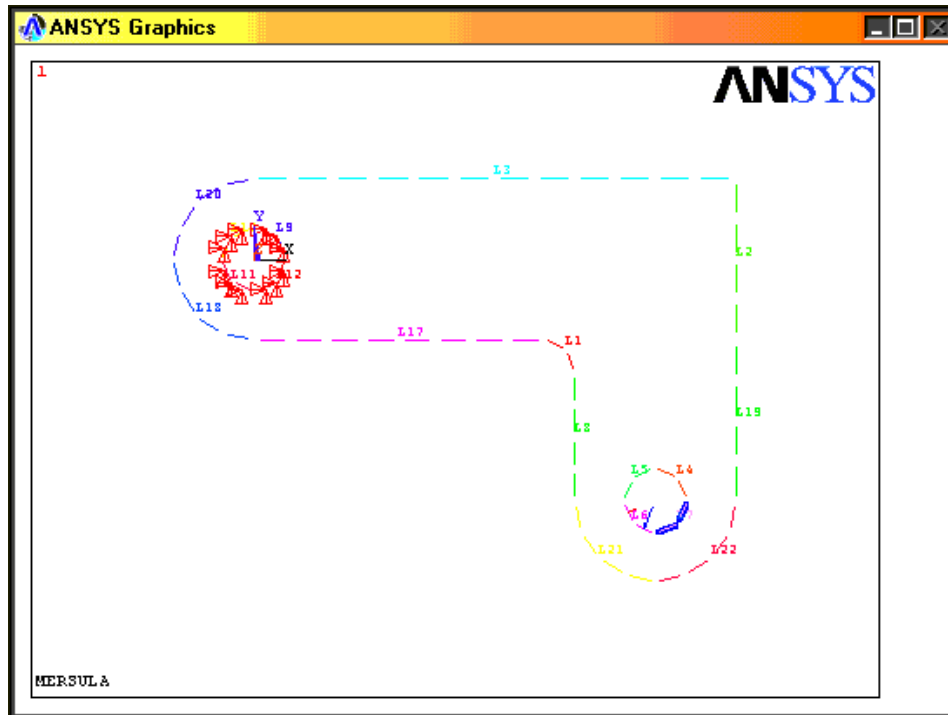


Figura 4.131 Ventana ANSYS Graphics mostrando la línea seleccionada.

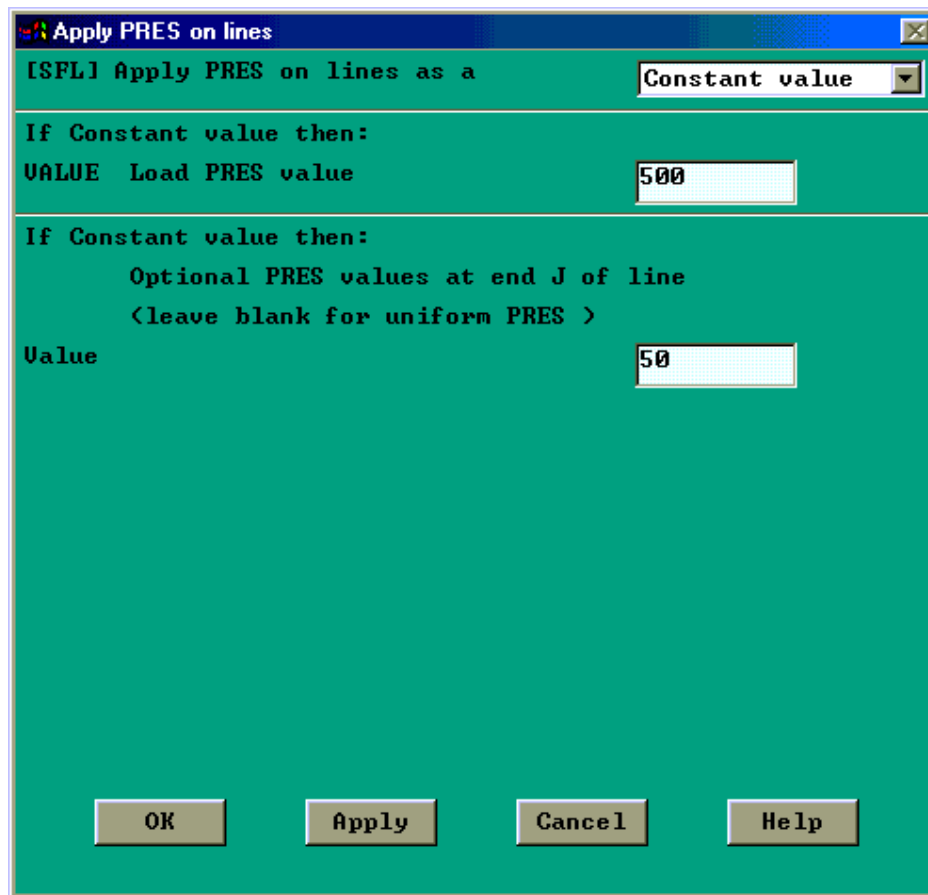


Figura 4.132 Ventana Apply PRES on Lines.

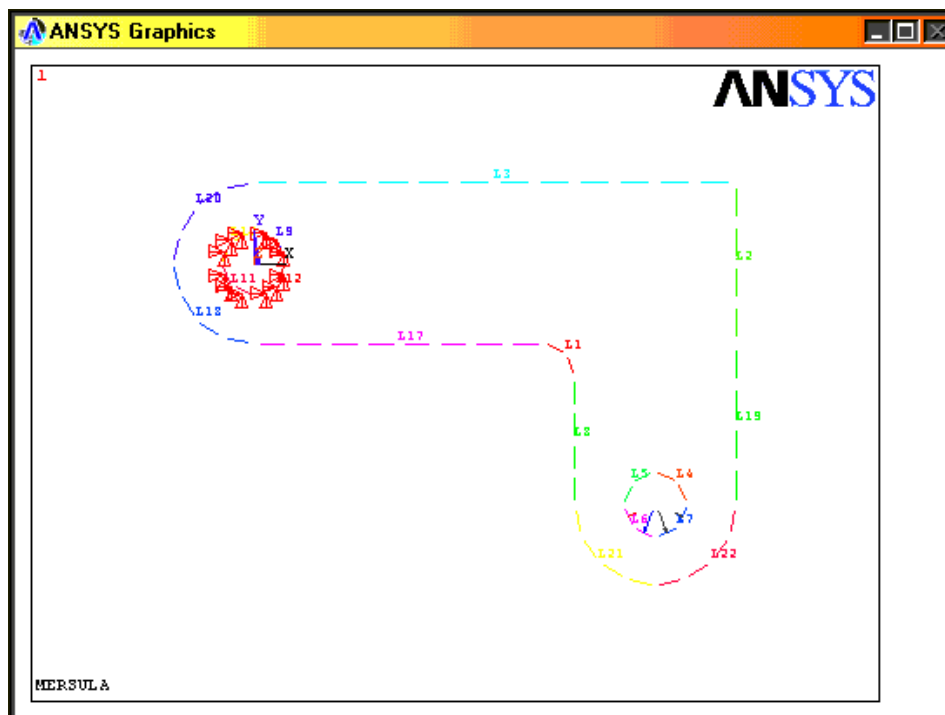


Figura 4.133 Ventana ANSYS Graphics mostrando la carga de presión aplicada.

- u. Salvar la base de datos que se ha creado hasta ahora en el archivo *MALLA.db*. Para salvar la base de datos seleccione de la ventana *ANSYS Toolbar* el icono *SAVE\_DB*.

**Resolver.**

- h. Seleccione *ANSYS Main Menu > Solution > -Solve- Current LS*
- i. Se abrirá la ventana de dialogo */STAT Command*, figura 4.134.
- j. Cierre la ventana */STAT Command*, después de revisar la información contenida en ella.

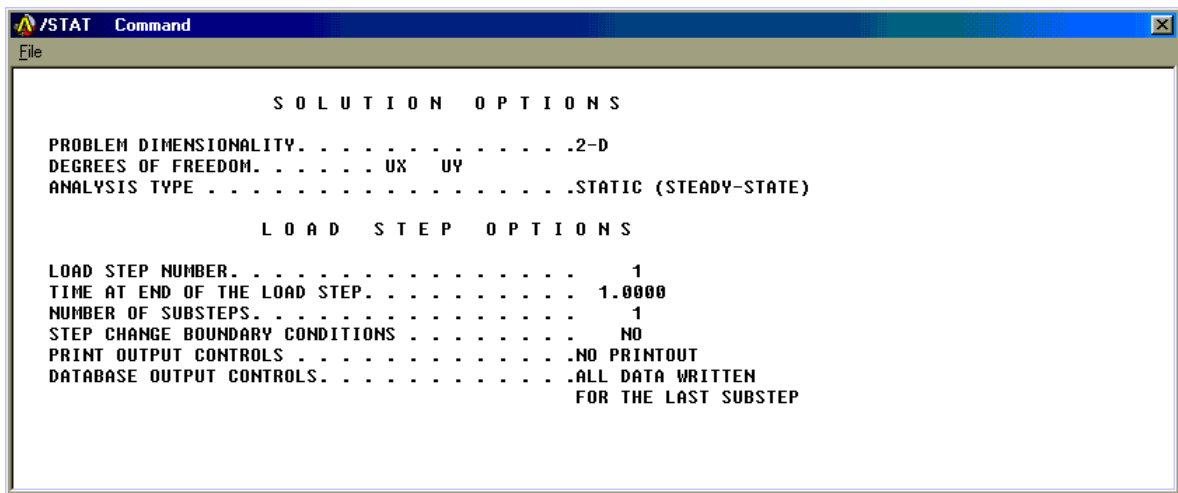


Figura 4.134 Ventana /STAT Command.

- k. Se abrirá la ventana de dialogo *Solve Current Load Step*, figura 4.135.
- l. Seleccione *OK* para comenzar a resolver el modelo en el paso actual de carga.

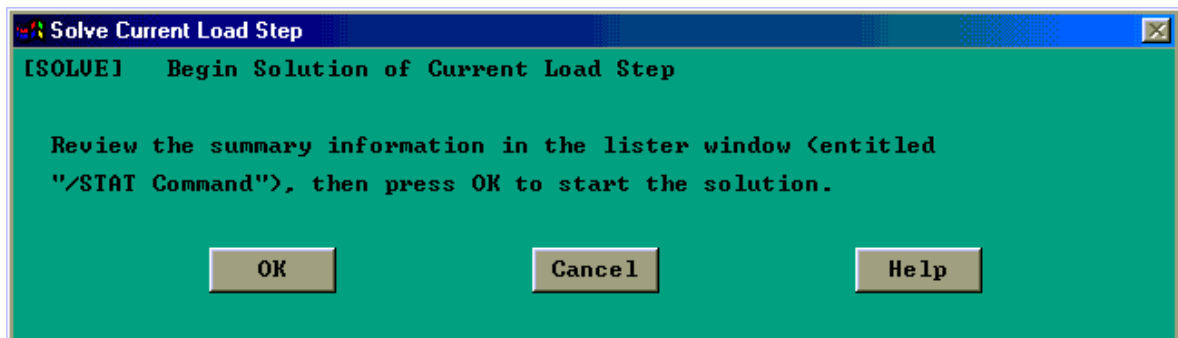


Figura 4.135 Ventana Solve Current Load Step.

- m. Se abrirá la ventana de dialogo *Information*, figura 4.136.

- n. Seleccione *Close* para cerrar la ventana de información cuando la solución este hecha (*Solution is done!*). En la ventana *ANSYS Graphics*, se visualiza la geometría actual al realizar la solución, figura 4.137.

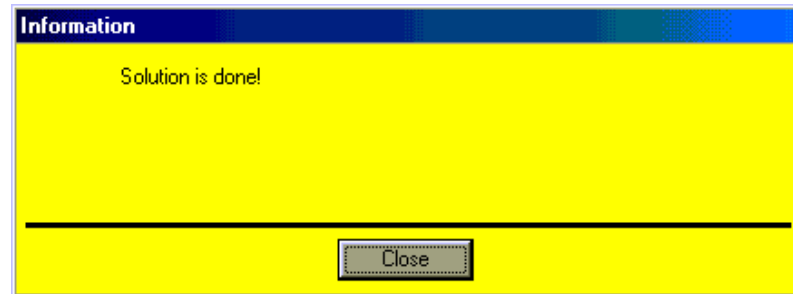


Figura 4.136 Ventana Information.

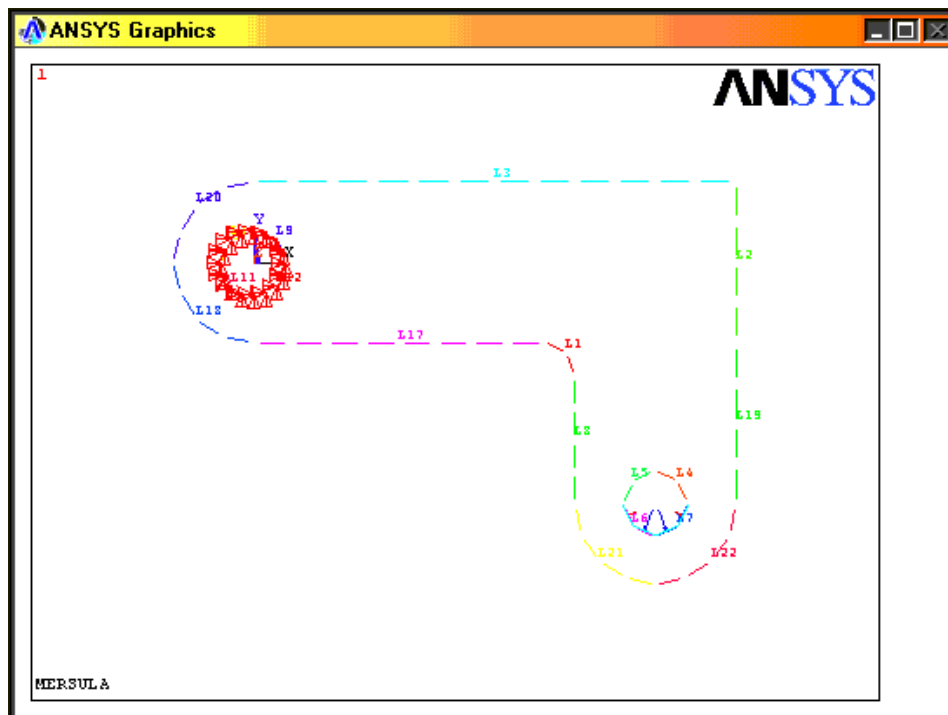


Figura 4.137 Ventana ANSYS Graphics mostrando la geometría actual.

#### 4.2.5. POSTPROCESO

*Leer resultados en el postprocesador general.*

- b. Seleccione *ANSYS Main Menu > General Postproc > -Read Results- First Set*

**Plotear la forma deformada.**

- g. Seleccione ***ANSYS Main Menu > General Postproc > Plot Results > Deformed Shape...***
- h. Se abrirá la ventana de dialogo *Plot Deformed Shape*, figura 4.138.
- i. Seleccione *Def + undeformed* en el apartado *KUND Items to be plotted*.
- j. Seleccione *OK* para plotear y cerrar la ventana.

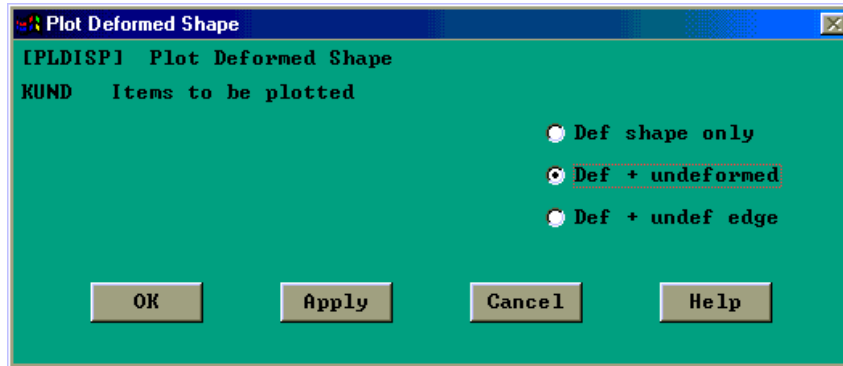


Figura 4.138 Ventana Plot Deformed Shape.

- k. Un gráfico del contorno de la forma deformada se puede ver en la ventana *ANSYS Graphics*, figura 4.139.

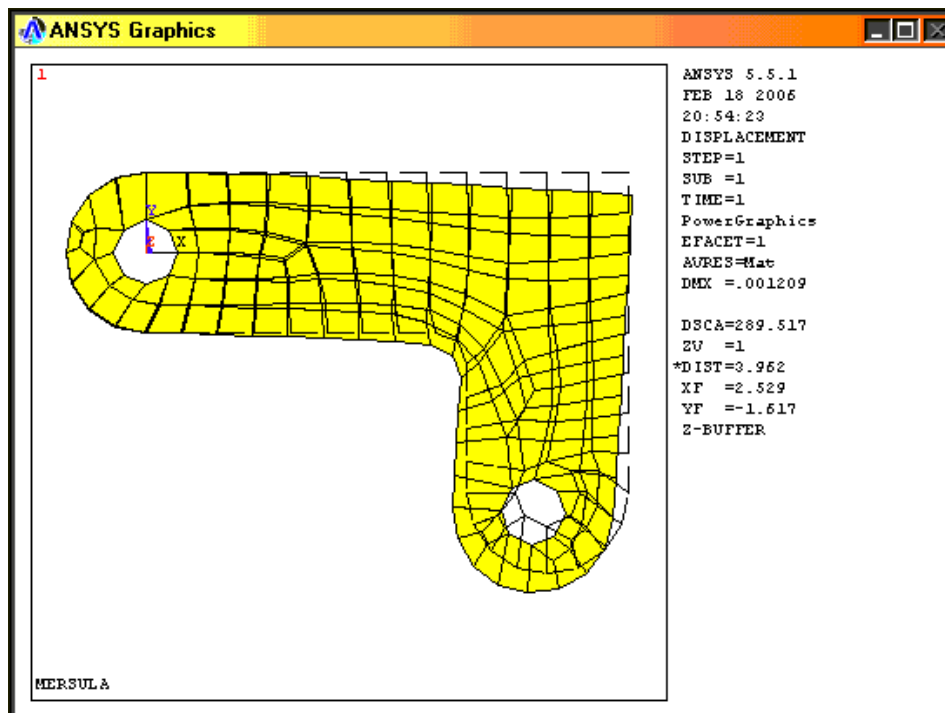


Figura 4.139 Ventana ANSYS Graphics mostrando el gráfico del contorno de la forma deformada.

- l. Seleccione **Utility Menu > PlotCtrls > Animate > Deformed Shape...**
- m. Se abrirá la ventana de dialogo *Animate Deformed Shape*, figura 4.140.
- n. Seleccione *Def + undeformed* en el apartado *KUND Items to be plotted*.
- o. Seleccione *OK* para animar y cerrar la ventana.

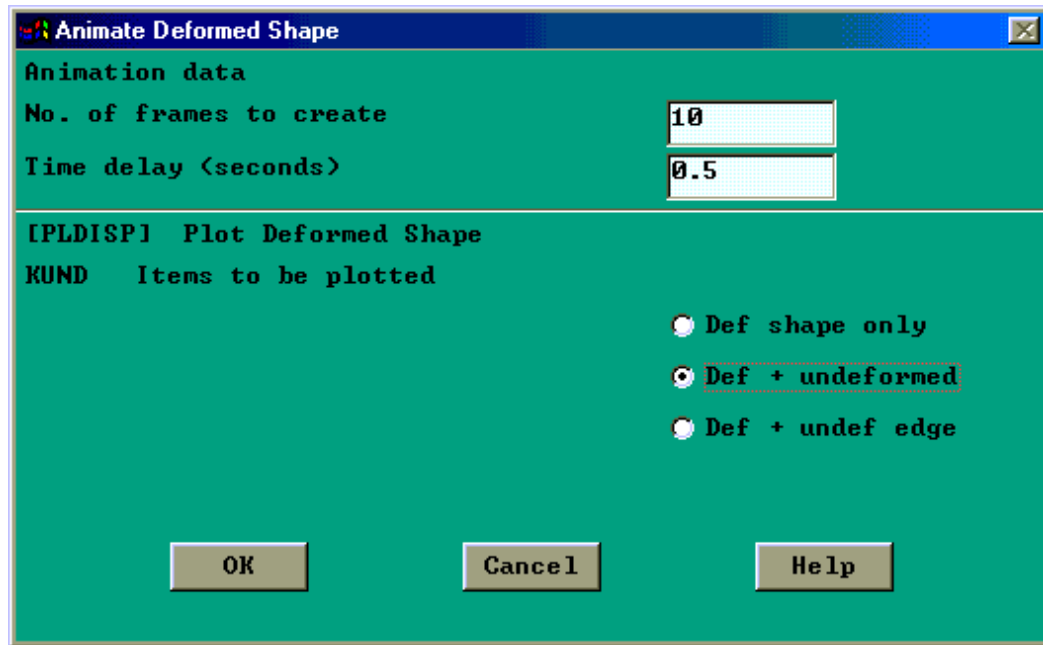


Figura 4.140 Ventana Animate Deformed Shape.

***Plotear el esfuerzo equivalente von Mises.***

- a. Seleccione **ANSYS Main Menu > General Postproc > Plot Results > -Contour Plot-Nodal Solu...**
- b. Se abrirá la ventana de dialogo *Contour Nodal Solution Data*, figura 4.141.
- c. Seleccionar *Stress y von Mises SEQV* en el apartado *Item,Comp Item to be contoured*.
- d. Seleccione *Def shape only* en el apartado *KUND Items to be plotted*.
- e. Seleccione *OK* para plotear y cerrar la ventana.



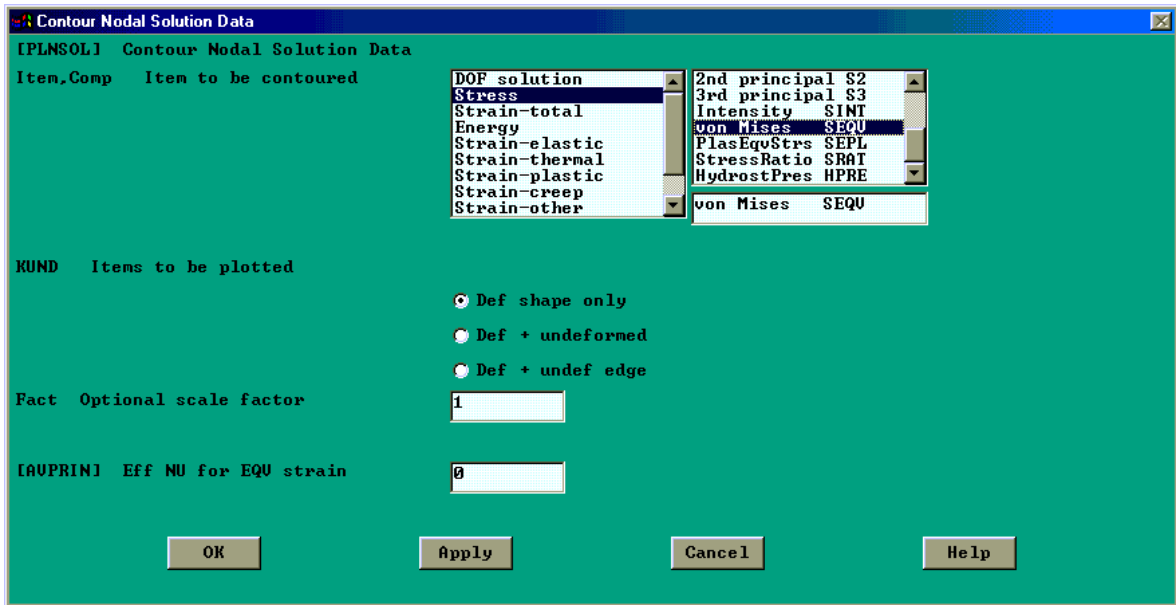


Figura 4.141 Ventana Contour Nodal Solution Data.

- f. Un gráfico a colores que muestra el esfuerzo equivalente von Mises se puede ver en la ventana *ANSYS Graphics*, figura 4.142.

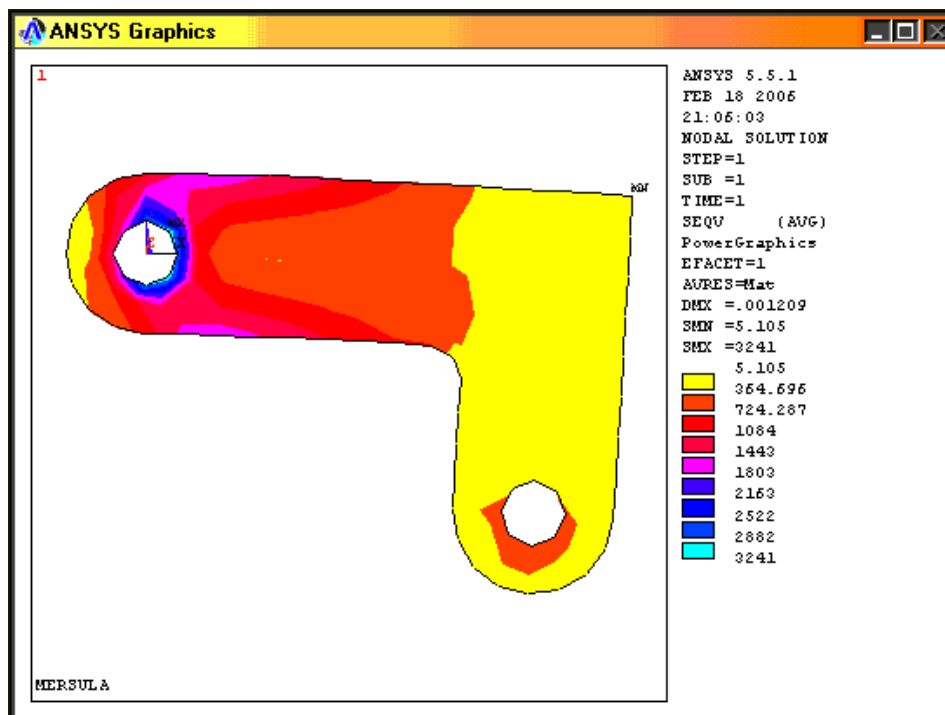


Figura 4.142 Ventana ANSYS Graphics mostrando un gráfico a colores del esfuerzo equivalente von Mises.

- g. Seleccione ***Utility Menu > PlotCtrls > Animate > Deformed Results...***
- h. Se abrirá la ventana de dialogo *Animate Nodal Solution Data*, figura 4.143.

- i. Seleccione *Stress* y *von Mises SEQU* en el apartado *Item,Comp Item to be contoured*.
- j. Seleccione *OK* para animar y cerrar la ventana.

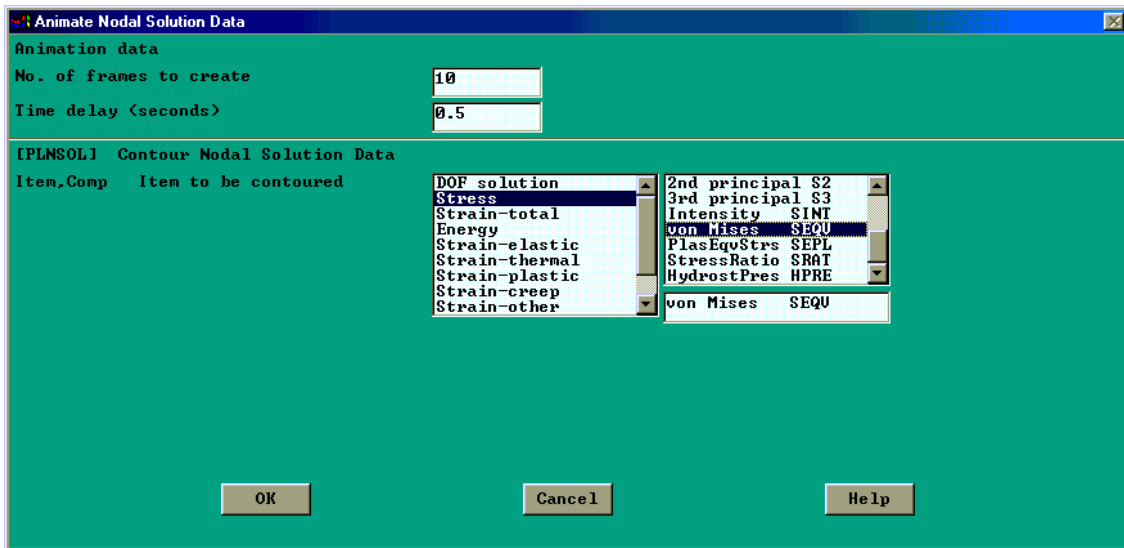


Figura 4.143 Ventana Animate Nodal Solution Data

**Listar las reacciones.**

- g. Seleccione *ANSYS Main Menu > General Postproc > List Results > Reaction Solu...*
- h. Se abrirá la ventana de dialogo *List Reaction Solution*, figura 4.144.
- i. Seleccione *All items* en el apartado *Lab Item to be listed*.
- j. Seleccione *OK* para listar y cerrar la ventana.

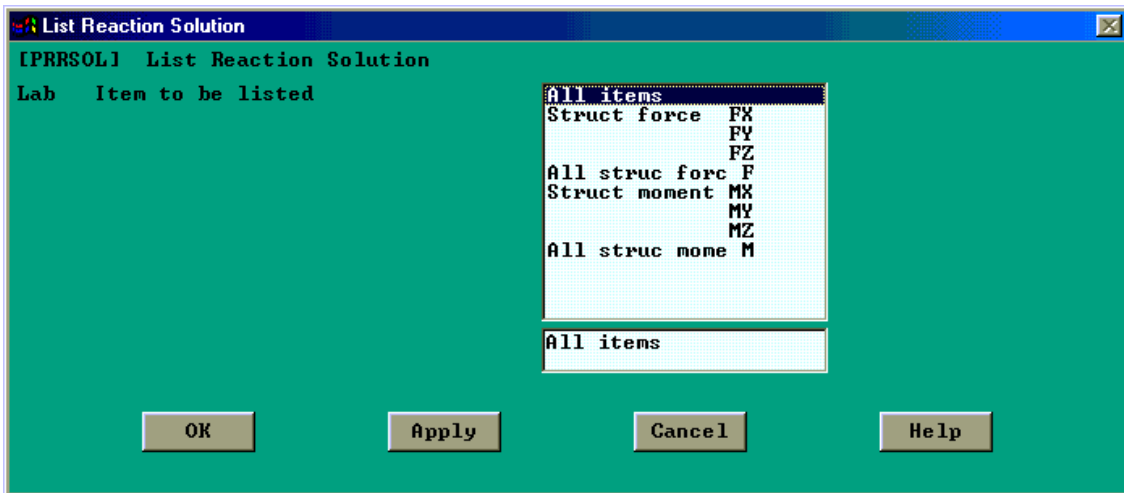


Figura 4.144 Ventana List Reaction Solution.

- k. Se abrirá la ventana de dialogo *PRRSOL Command*, figura 4.145.
- l. Revise los datos y cierre la ventana.

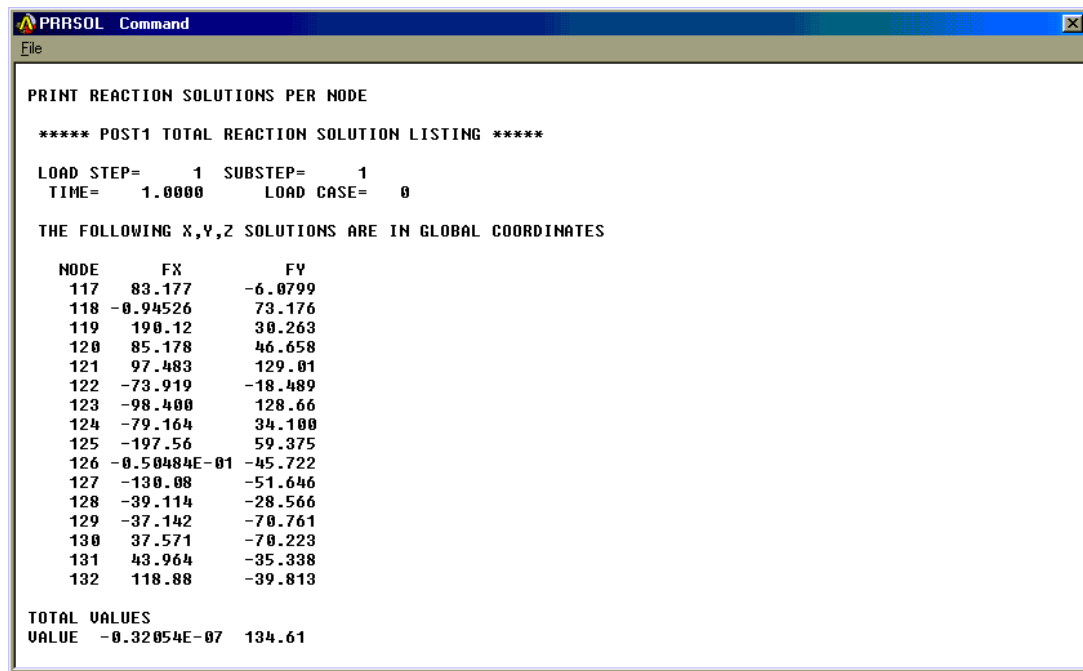


Figura 4.145 Ventana PRRSOL Command.

#### 4.2.6. SALIR DE ANSYS

- e. Seleccione *Utility Menu > File > Exit*
- f. Se abrirá la ventana de dialogo *Exit from ANSYS*, figura 4.146.
- g. Seleccione *Quit – No Save!* en el apartado *–Exit from ANSYS–*.
- h. Seleccione *OK* para salir de ANSYS.

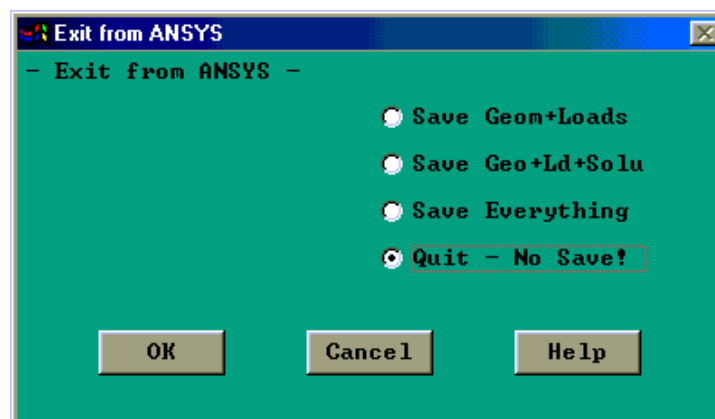


Figura 4.146 Ventana Exit from ANSYS.

## CONCLUSIONES

Después del desarrollo de este trabajo, se pueden establecer las conclusiones siguientes:

1. El método del elemento finito es una herramienta vital dentro de la vida diaria de un ingeniero, por ello es necesario tener conocimiento básico de paquetería relacionada con la técnica FEM.
2. Todo análisis por el método del elemento finito involucra tres pasos: preproceso, solución y postproceso; ANSYS V. 5.5 opera de forma modal, es decir, no se puede adelantar un paso sin realizar el que lo precede.
3. ANSYS V. 5.5 es un software muy completo, sin embargo, sólo fue posible aplicar el software en ejemplos 2-D con espesor como constante real. Debido a que la creación de un modelo 3-D en ANSYS es muy complicado, se recomienda el modelado 3-D en programas CAD como *Pro Engineer*, *Unigraphics*, *Catia*, e importarlos posteriormente.
4. Se cumplieron los objetivos planteados al mostrar los conocimientos básicos para poder hacer uso del software ANSYS V. 5.5.
5. Se proporcionó una herramienta didáctica más como complemento de la formación del Ingeniero Mecánico Electricista que le permitirá su actualización en esta área de conocimiento.

El software ANSYS V. 5.5 tiene muchas aplicaciones en el diseño de ingeniería y en la fabricación, ya que posee aplicaciones específicas en un sistema integrado, que van desde el concepto del diseño hasta la fase de las pruebas y la validación. Cabe mencionar que dicho software es utilizado por las empresas más grandes y poderosas en el ámbito del diseño de alta calidad, por ejemplo: Volvo, General Electric, Toyota; por mencionar sólo algunas.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Introducción al estudio del elemento finito en ingeniería  
Tirupathi R. Chandrupatla & Ashok D. Belegundu  
Prentice Hall. México. Segunda Edición. 1999
2. Programming the Finite Element Method  
I.M. Smith and D.V. Griffiths  
John Wiley & Sons. Great Britain. Second Edition. 1988
3. Finite Element Analysis from concepts to applications  
David S. Burnett  
Addison – Wesley Publishing Company. U.S.A. 1987
4. Finite Element Analysis and Applications  
R. Wait & A.R. Mitchell  
John Wiley & Sons. Great Britain. 1985
5. Applied Finite Element Analysis  
Larry J. Segerlind  
John Wiley and Sons. U.S.A. Second Edition. 1984
6. Apuntes del curso “Introducción al método del elemento finito (ANSYS)”  
M.I. Juan Antonio Asencio & M.C. Héctor Adrián Quiroz  
F.E.S. – Cuautitlán. México. 2005
7. <http://www.ansys.com>
8. <http://www.grupossc.com>
9. [http://www3.sympatico.ca/peter\\_budgell/home.html](http://www3.sympatico.ca/peter_budgell/home.html)
10. [http://dattaraj\\_rao.tripod.com/FEM/](http://dattaraj_rao.tripod.com/FEM/)

11. <http://www.finite-element-method.info/>
12. <http://www.freefem.org/>
13. <http://www.efunda.com/home.cfm>
14. <http://www.demecanica.com/TeoriaEst/TeoriaEst.htm>