



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

# UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

---

**OBTENCIÓN DE CURVAS DE FACTOR CONCENTRADOR DE  
TENSIONES PARA BARRA CILINDRICA CON RANURA  
MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS.**

***TRABAJO FINAL DEL***

**Grado en Ingeniería Mecánica**

***REALIZADO POR***

**Julián Borreguero Cerrato.**

***TUTORIZADO POR***

**Ana María Pedrosa Sánchez.**

**CURSO ACADÉMICO: 2020/2021**

## Contenido

I. MEMORIA.....	2
1.INTRODUCCIÓN .....	3
2. OBJETIVOS .....	5
3. MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS .....	8
4.DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE ANSYS .....	12
5. MODELADO EN ANSYS DE BARRA CILÍNDRICA CON CAMBIO DE DIÁMETRO.....	15
5.1 Definición del tipo de elemento.....	18
5.2 Creación del modelo geométrico. ....	21
5.3 Generación de la malla de elementos finitos. ....	25
5.4 Aplicación de las condiciones de contorno. ....	29
5.5. Solución.....	34
5.6. Obtención de los resultados. ....	35
6. VALIDACIÓN DEL CÁLCULO MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS POR COMPARACIÓN CON VALORES BIBLIOGRÁFICOS.....	41
6.1. Estudio de la influencia del tipo/ tamaño de elemento.....	43
6.2. Influencia de parámetros elásticos del material.....	45
7. OBTENCIÓN DE CURVAS DE FACTOR DE CONCENTRADOR DE TENSIONES PARA BARRA CILÍNDRICA CON RANURA MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS.....	48
7.1 Generación de la macro.....	50
7.2 Resultados del análisis .....	55
7.3 Estudio de los resultados obtenidos .....	57
8. OBTENCIÓN DE LA SUPERFICIE .....	59
8.1 SUPERFICIE CON OCTAVE.....	60
8.2 COEFICIENTE DE CORRELACIÓN.....	62
9.CONCLUSIONES.....	64
10. BIBLIOGRAFÍA .....	66
II. PLANOS .....	68
III. PLIEGO DE CONDICIONES .....	70
1. Pliego de condiciones generales.....	71
2. Pliego de condiciones particulares.....	72
IV.PRESUPUESTO .....	74

# I. MEMORIA

# 1.INTRODUCCIÓN

En componentes mecánicos es inevitable la creación de ciertas discontinuidades como chaveteros, cambios de sección, agujeros, etc. Estas discontinuidades producen un aumento local de las tensiones denominado concentrador de tensiones y, hay que prestarles una atención especial, ya que aumenta el riesgo de fallo por fatiga al favorecer el inicio de grietas en la entalla.

Para caracterizar este fenómeno, se utiliza el factor teórico concentrador de tensiones,  $K_t$ , definido como la relación entre la tensión local en la entalla y una tensión nominal, es decir,  $\sigma = K_t * \sigma_{nom}$ . En esta expresión se debe tener en cuenta que no exista fluencia, ya que el concentrador de tensiones afecta a materiales frágiles tanto a fallo estático como a fatiga. Afectando únicamente a materiales dúctiles a fatiga.

Debido a la existencia de este fenómeno y el fallo que puede provocar de manera repentina, aunque esto no significa que solo se puede producir este tipo de fallo, se han llevado a cabo unos estudios previos y la creación de forma experimental de unos diagramas en función de  $K_t$ , dependiente la pieza y forma de la discontinuidad.

Gracias a la obtención de estas gráficas, podemos llegar a diseñar piezas con diversas irregularidades en su superficie o sección transversal. De este modo, con dicho valor  $K_t$  y los límites de tensión admisibles de dicha pieza podremos adelantarnos a un posible fallo que se pueda producir por carga estática o por fatiga.

En este proyecto se va a presentar un método para obtener los distintos valores de  $K_t$  de manera distinta a un procedimiento experimental. Mediante el Método de los Elementos Finitos (MEF de aquí en adelante) obtendremos el coeficiente  $K_t$ . Para ello, utilizaremos el software Ansys® donde simularemos distintos casos con tal de poder obtener una ecuación matemática que nos proporcione cualquier valor de  $K_t$  sin necesidad de acudir a ninguna gráfica. Gracias a esto la automatización del diseño de componentes estructurales es más fácil. Por otro lado, la experimentación con probetas validaría la predicción numérica, pero no se pudo realizar a causa del confinamiento.

## 2. OBJETIVOS

El objetivo de este proyecto es tratar de conseguir un procedimiento con el cual se pueda calcular el factor concentrador de tensiones  $K_t$  sometido a un momento de carga axial para cualquier tipo de discontinuidad, sin tener que preocuparnos de que estén recogidas en referencias bibliográficas.

En este trabajo nos vamos a centrar en el estudio de un concentrador de tensiones en una barra cilíndrica con ranura cuya geometría podemos ver en la figura 2.1.

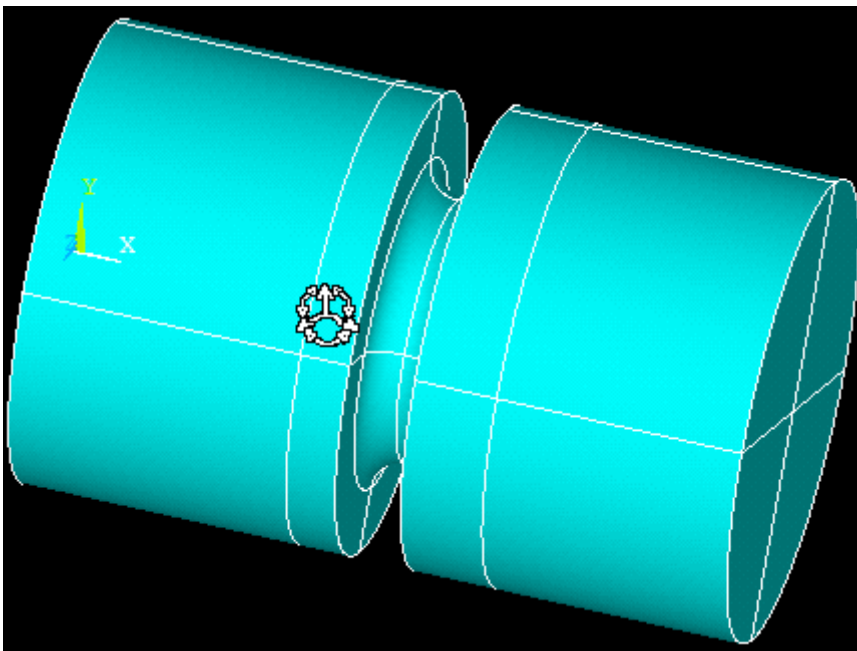


Figura 2. 1 Concentrador de tensiones con ranura.

Pero antes de ello, queremos demostrar que este procedimiento es válido y ya que no hemos podido llevar a cabo un procedimiento experimental, primero vamos a hacer una comprobación del correcto funcionamiento del software que utilizaremos.

Realizando un estudio previo del siguiente concentrador de tensiones cuya geometría es la de la figura 2.2, y del que sí que conocemos las gráficas, podremos establecer una base fiable donde apoyar nuestro futuro estudio, ya que éstas las extraemos de resultados recogidos en bibliografías.

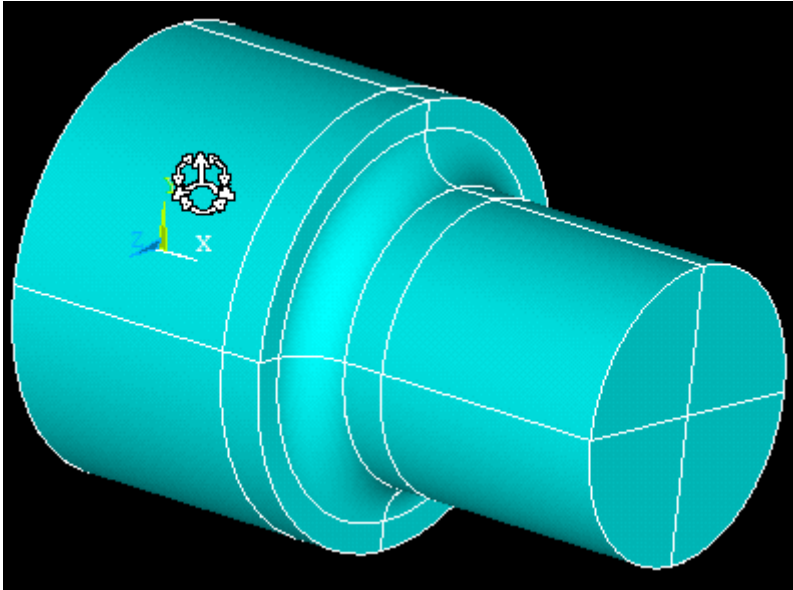


Figura 2. 2 Concentrador de tensiones con cambio de diámetro



# 3. MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

El método de los elementos finitos es un método numérico general para la aproximación de ecuaciones generales parciales muy complejas utilizadas en diversos problemas de ingeniería y física.

El MEF está pensado para ser usado en ordenadores y permite resolver ecuaciones diferenciales de un problema físico sobre geometrías complicadas.

El MEF permite obtener una solución numérica aproximada sobre un cuerpo, estructura o dominio dividiéndolo en un número elevado de subdominios denominados elementos finitos. El conjunto de elementos finitos forma una partición del dominio también denominada discretización. Dentro de cada elemento se distinguen una serie de puntos representativos llamados nodos. El conjunto de nodos se denomina malla.

## HISTORIA

El MEF fue al principio desarrollado en 1943 por Richard Courant, quien utilizó el método de Ritz de análisis numérico y minimización de las variables de cálculo para obtener soluciones aproximadas a un sistema de vibración. Poco después, un documento publicado en 1956 por M. J. Turner, R. W. Clough, H. C. Martin, y L. J. Topp estableció una definición más amplia del análisis numérico.<sup>7</sup> El documento se centró en «la rigidez y deformación de estructuras complejas». Con la llegada de los primeros ordenadores instaura el cálculo matricial de estructuras. Éste parte de la discretización de la estructura en elementos lineales tipo barra de los que se conoce su rigidez frente a los desplazamientos de sus nodos. Se plantea entonces un sistema de ecuaciones resultado de aplicar las ecuaciones de equilibrio a los nodos de la estructura.

### Uso práctico del método hacia 1950

Cuando se produce la llegada de los primeros equipos de cómputo en la década de 1950, el cálculo de estructuras se encontraba en un punto en el que los métodos de cálculo predominantes consistían en métodos iterativos (métodos de Cross y Kani) que se realizaban de manera manual y, por tanto, resultaban bastante tediosos. El cálculo de una estructura de edificación de varios pisos, por ejemplo, podía llevar varias semanas, lo cual suponía un coste sustancial de tiempo en detrimento de la posibilidad de invertir este en la optimización de la estructura.

La llegada de la computadora permitió el resurgimiento del método de los desplazamientos ya conocidos en siglos anteriores (Navier, Lagrange, Cauchy), pero que eran difíciles de aplicar dado que al final conducían a la resolución de enormes sistemas de ecuaciones inabordables desde el punto de vista manual.

### De 1960 a 1970

Cuando las aplicaciones prácticas de elementos finitos crecieron en tamaño, los requerimientos de tiempo de cálculo y memoria de los ordenadores creció. En ese punto el desarrollo de algoritmos más eficientes se volvió importante. Para

la resolución de los sistemas de ecuaciones se potencia el estudio de la adaptabilidad de los algoritmos ya conocidos (Gauss, Cholesky, Crout, Gradiente conjugado, etc.). El ahorro de tiempo es impensable y con ello el uso del método matricial se extiende. Este desarrollo se hace especialmente notable en estructuras de edificación donde la discretización de los pórticos en barras es prácticamente inmediata a partir de las vigas y los pilares.

A partir de 1980

Por último, a partir de la década de los 80, con la generalización de los ordenadores personales, se extiende el uso de los programas comerciales que se especializan en los diversos campos, instaurándose el uso de pre y postprocesadores gráficos que realizan el mallado y la representación gráfica de los resultados. Se continúa en el estudio de la aplicación del método a nuevos modelos de comportamiento (plasticidad, fractura, daño continuo, etc.) y en el análisis de los errores.

En la actualidad, dentro del campo estructural, el MEF comparte protagonismo con el método matricial, siendo muchos los programas que mezclan el análisis por ambos métodos, debido sobre todo a la mayor necesidad de memoria que requiere el análisis por elementos finitos.

#### Descripción matemática del método

El desarrollo de un algoritmo de elementos finitos para resolver un problema definido mediante ecuaciones diferenciales y condiciones de contorno requiere en general cuatro etapas:

1. El problema debe reformularse en forma variacional.
2. El dominio de variables independientes (usualmente un dominio espacial) debe dividirse mediante una partición en subdominios, llamados elementos finitos. Asociada a la partición anterior se construye un espacio vectorial de dimensión finita, llamado espacio de elementos finitos. Siendo la solución numérica aproximada obtenida por elementos finitos una combinación lineal en dicho espacio vectorial.

3. Se obtiene la proyección del problema variacional original sobre el espacio de elementos finitos obtenido de la partición. Esto da lugar a un sistema con un número de ecuaciones finito, aunque en general con un número elevado de ecuaciones incógnitas. El número de incógnitas será igual a la dimensión del espacio vectorial de elementos finitos obtenido y, en general, cuanto mayor sea dicha dimensión tanto mejor será la aproximación numérica obtenida.
  
4. El último paso es el cálculo numérico de la solución del sistema de ecuaciones.

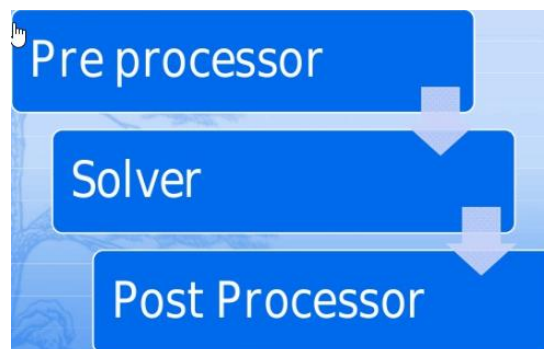
Los pasos anteriores permiten construir un problema de cálculo diferencial en un problema de álgebra lineal. Dicho problema en general se plantea sobre un espacio vectorial de dimensión no-finita, pero que puede resolverse aproximadamente encontrando una proyección sobre un subespacio de dimensión finita, y por tanto con un número finito de ecuaciones (aunque en general el número de ecuaciones será elevado típicamente de miles o incluso centenares de miles). La discretización en elementos finitos ayuda a construir un algoritmo de proyección sencillo, logrando además que la solución por el método de elementos finitos sea generalmente exacta en un conjunto finito de puntos. Estos puntos coinciden usualmente con los vértices de los elementos finitos o puntos destacados de los mismos. Para la resolución concreta del enorme sistema de ecuaciones algebraicas en general pueden usarse los métodos convencionales del álgebra lineal en espacios de dimensión finita.

# 4.DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE ANSYS

Para realizar este trabajo hemos optado por usar el software Ansys® para la realización del método de los elementos finitos. Este programa se suele utilizar en el ámbito de la ingeniería para la realización del diseño de diferentes productos como su posterior estudio. Gracias a este programa podemos prever cómo funcionará el producto en un entorno real mediante la simulación.

Para la realización de nuestro proyecto, solo vamos a utilizar una parte de este extenso programa, ya que nosotros solo vamos a hacer un estudio estático de nuestro proyecto, pero se puede utilizar tanto para el estudio termodinámico, de fluidos, o acústico entre otros.

El software está dividido en tres bloques: preprocesador, procesador y post-procesador. En el preprocesador nos encontramos las herramientas necesarias para la construcción de la geometría, el mallado y la aplicación de las condiciones de contorno. El procesador lo usaremos para realizar la simulación de la pieza mediante el método de los elementos finitos. Por último, el post-procesador nos servirá para analizar los resultados obtenidos y realizar un estudio mediante la visualización de diferentes graficas o tablas.



En primer lugar, hemos realizado el estudio de una pieza de la que ya sabemos cuáles son sus datos bibliográficos, para dar validez al estudio del proyecto que realizaremos más adelante. Para ello, hemos seguido los siguientes pasos, aplicables a cualquier estudio mediante el método de los elementos finitos:

- Preprocesador: aquí definiremos la geometría de la pieza, un correcto mallado para obtener unos resultados precisos y la aplicación de las condiciones de contorno:
  - Definir el tipo de elemento y el material de la pieza.
  - Definir la geometría de la pieza
  - Crear el volumen a partir de la geometría en 2D.

- Mallas la pieza a un tamaño adecuado.
- Aplicar las condiciones de contorno. (Restricciones de movimiento y cargas)
- Procesador: En este apartado también se pueden aplicar las condiciones de contorno, pero como nosotros ya lo hemos hecho antes, lo utilizaremos para que el programa realice la simulación y nos dé la solución de los elementos finitos.
  - Resolución del problema.
- Post- procesador: Para finalizar, lo que haremos será el estudio de la solución que nos da el programa. Podemos obtener distintos resultados según que necesitemos:
  - Obtención del error.
  - Visualización del diagrama de tensiones resultante.

A continuación, vamos a explicar cada uno de los diferentes apartados paso a paso.

# 5. MODELADO EN ANSYS DE BARRA CILÍNDRICA CON CAMBIO DE DIÁMETRO.



Como hemos dicho anteriormente, nuestro proyecto se va a centrar en la obtención de la ecuación característica a través del modelado de una barra cilíndrica con ranura mediante el MEF con el software Ansys®. Pero antes de ello, vamos a demostrar que el trabajo que más tarde realizaremos tiene una base sólida donde sostenerse y por eso, primero vamos a demostrar que el software con el que vamos a trabajar es fiable y por ello compararemos los datos bibliográficos que sí que tenemos de esta geometría con los que vamos a obtener con el software.

A continuación, vamos a explicar el funcionamiento del software con el que hemos trabajado, a la vez que obtenemos los datos de la geometría comentada, para dar validez a los cálculos que luego realizaremos para obtener la ecuación característica.

El modelado constará de los siguientes pasos:

- 5.1 Definir el tipo de elemento y material.
- 5.2 Definir el modelo geométrico.
- 5.3 Generación de la malla de los elementos finitos.
- 5.4 Aplicación de las condiciones de contorno.
- 5.5 Solución.
- 5.6 Obtención de los resultados.

Primero vamos a estudiar el problema planteado, es decir, la geometría de la pieza, para poder parametrizarla y meterla en el programa fácilmente.

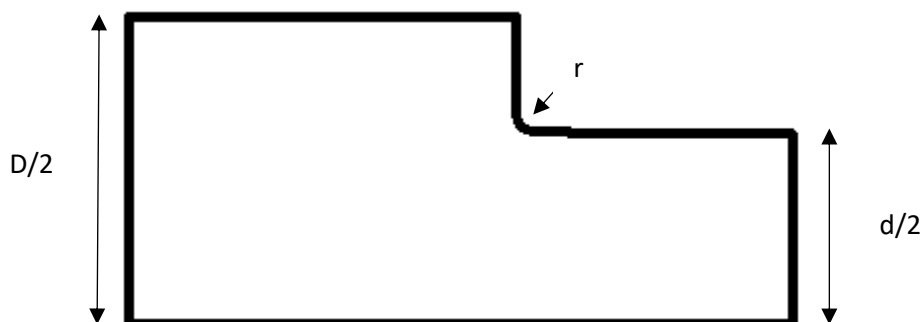


Figura 5. 1 Concentrador de tensiones a estudiar.

Como vemos, nuestro modelo geométrico está definido por tres parámetros: diámetro mayor  $D$ , diámetro menor  $d$  y el radio de la curvatura de la entalla  $r$ .

En las gráficas con las que vamos a comparar los resultados que obtendremos, los datos están introducidos con las relaciones siguientes: diámetro mayor frente a diámetro menor ( $D/d$ ), diámetro menor frente a radio ( $r/d$ ).

Una vez tengamos las relaciones con las que trabajar, podemos empezar a trabajar con el programa Ansys®, mediante la aplicación Ansys® Mechanical Product Launcher, con lo que nos saldrá la siguiente figura:

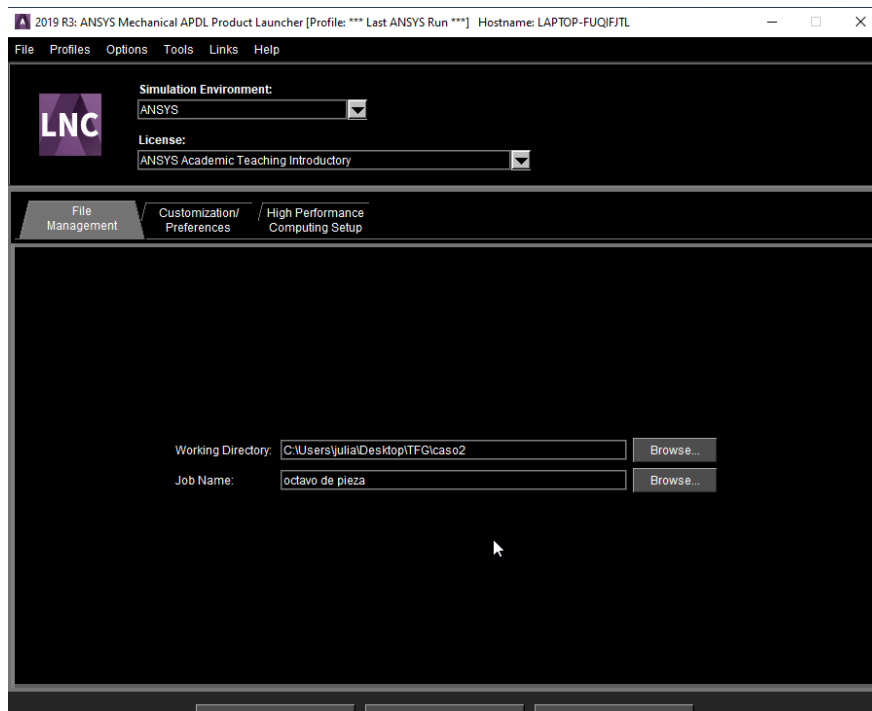


Figura 5. 2. Ventana de ejecución Ansys.

Una vez elijamos donde guardar nuestro proyecto en el apartado Working Directory y le pongamos un nombre en Job Name, podemos comenzar a ejecutar el programa clicando “Run”. Nos aparecerá la ventana principal para trabajar en Ansys. Ver figura 5.3.

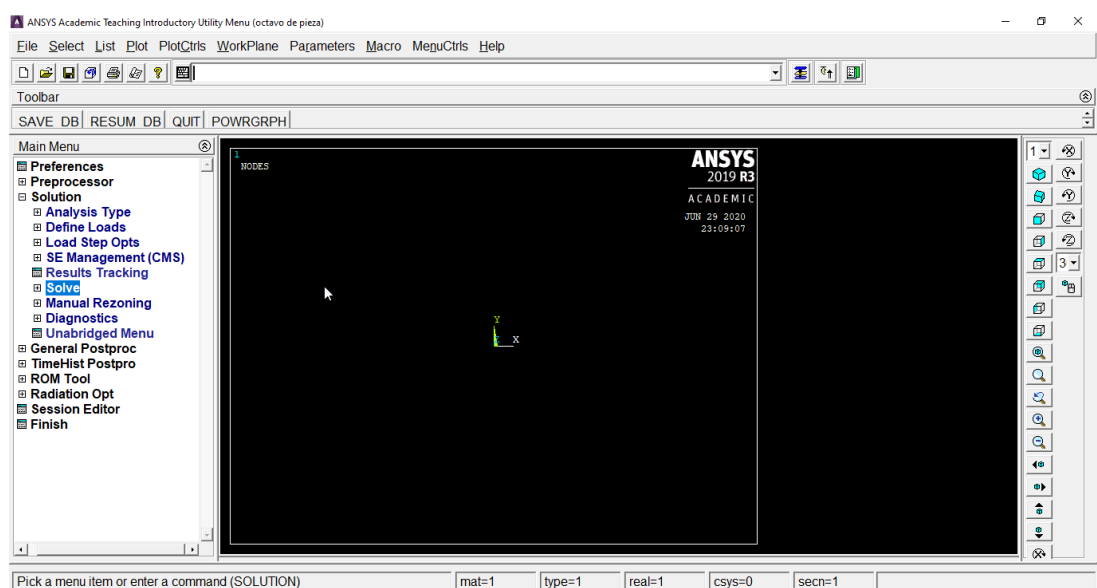


Figura 5. 3 Ventana principal Ansys.

## 5.1 Definición del tipo de elemento.

Lo primero que haremos será definir el tipo de problema que vamos a estudiar, para ello iremos a Main menú > Preferences.

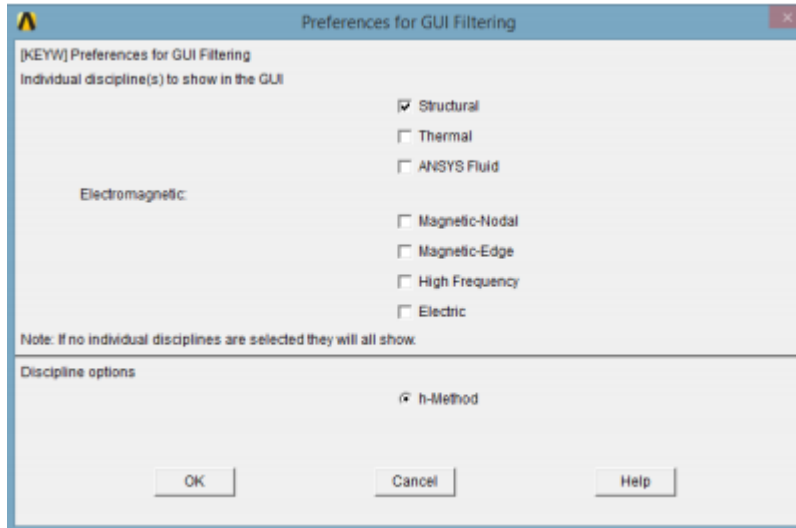


Figura 5.4 Menú de preferencias.

Elegiremos la opción Structural y h-method. Con ello lo que hacemos es filtrar la interfaz gráfica. Una vez seleccionado esto, le damos al botón OK y se cierra este cuadro de diálogo.

Ahora abriremos el preprocesador clicando Preprocessor. En primer lugar, debemos elegir el tipo de elemento con el que vamos a trabajar. Para ello, seleccionamos Element type > Add/Edit/Delete.

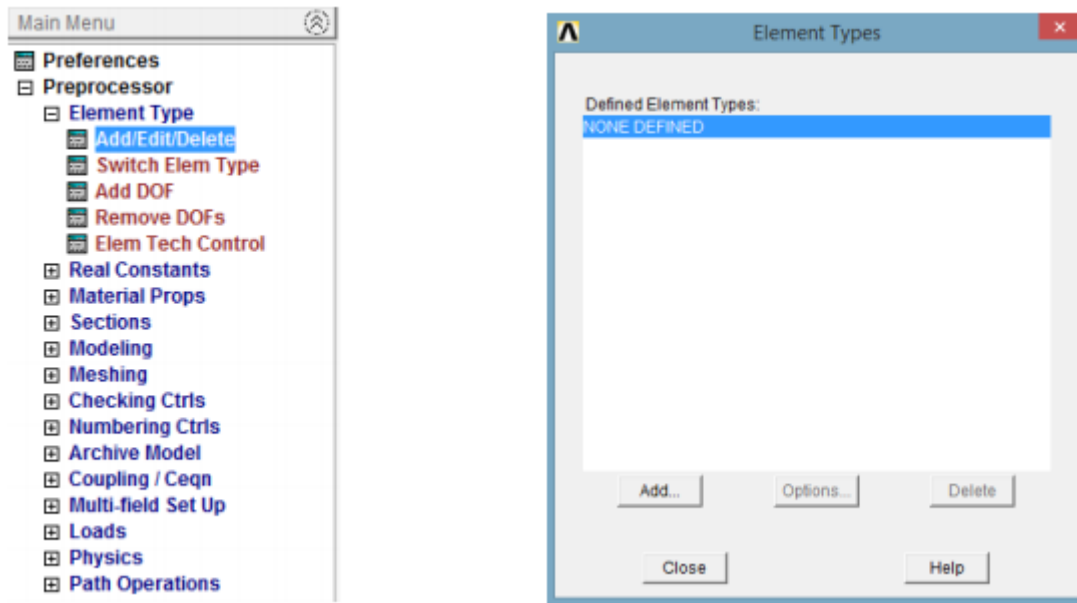


Figura 5.5 Ventanas de selección tipo de elemento.

En este momento, clicaremos en Add y seleccionaremos como veremos en la figura 5.1.3, el tipo de elemento más adecuado para nuestro estudio. Elegiremos el elemento solid 20 node 186.

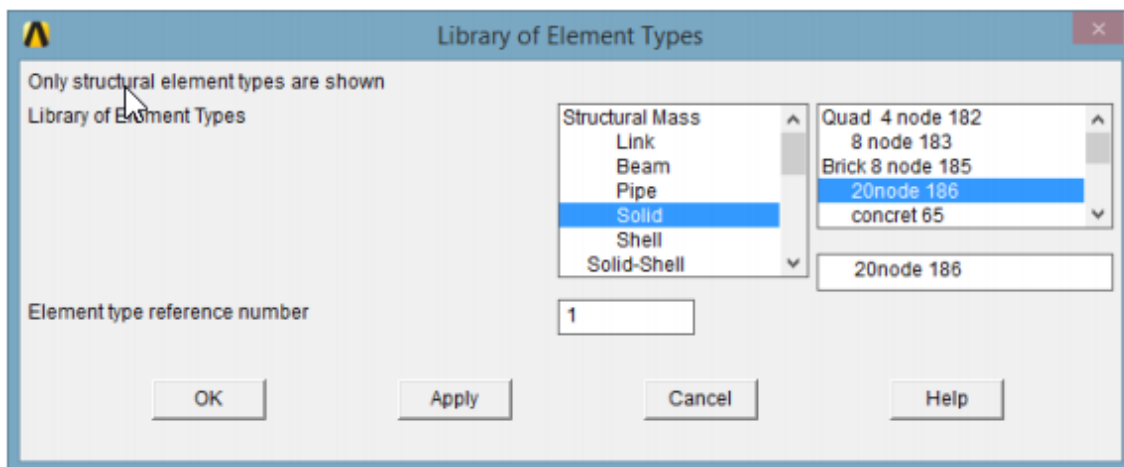


Figura 5.6 Selección tipo de elemento.

Después de esto, pasaremos a definir las propiedades del material, en nuestro caso, trabajamos con piezas de acero. Para ello, seleccionaremos dentro del preprocesador las siguientes opciones: Material Props > Material Models. Una vez se nos abra el cuadro de diálogo seguiremos con: Structural > Lineal > Elastic > Isotropic.

Nos aparecerán los siguientes cuadros de diálogo donde introduciremos el módulo de Young y el coeficiente de Poisson del acero.

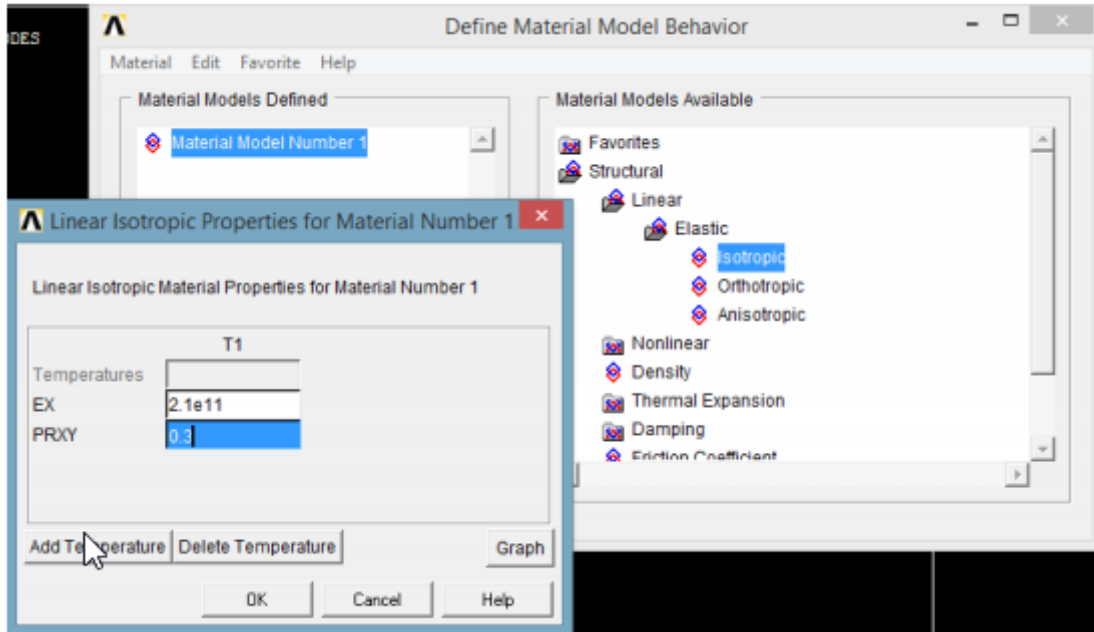


Figura 5.7. Ventana para introducir las propiedades del material.

## 5.2 Creación del modelo geométrico.

El modelo geométrico lo vamos a definir mediante puntos (Keypoints) los cuales definiremos por sus coordenadas X e Y. Estos puntos los vamos a definir en función de los parámetros D, d y r.

KEYPOINT	COORDENADAS	
	Número	X
1	0	0
2	$d - D/8$	0
3	$d + D/8 + 2r$	0
4	$2d + 2r$	0
5	0	$D/2$
6	$d - D/8$	$D/2$
7	d	$D/2$
8	$d + 2r$	$d/2$
9	$d + D/8 + 2r$	$d/2$
10	$2d + 2r$	$d/2$

Tabla 5.1. Tabla de coordenadas de Keypoints.

El siguiente paso será crear los Keypoints en el espacio de trabajo de Ansys. Para ello, seleccionaremos dentro del preprocesador las siguientes opciones:

Modeling > Create > Keypoints > In active Cs. Aquí, introduciremos cada Keypoint en orden clicando el botón "Apply". Una vez introduzcamos el ultimo Keypoint, pulsaremos OK.

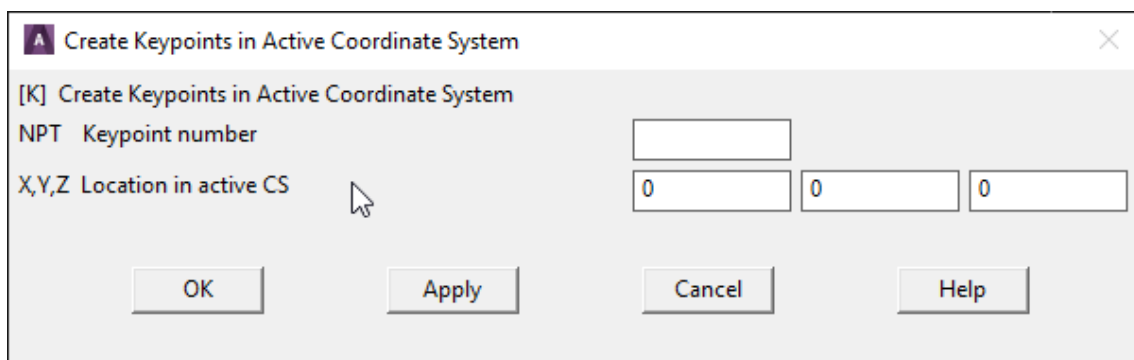


Figura 5.8. Ventana para introducir Keypoints.

Como vemos, la coordenada Z la dejamos siempre nula porque lo que hacemos es una figura en 2D a la que luego le daremos volumen.

Una vez introducidos los Keypoints, nos quedará la siguiente pantalla de trabajo:

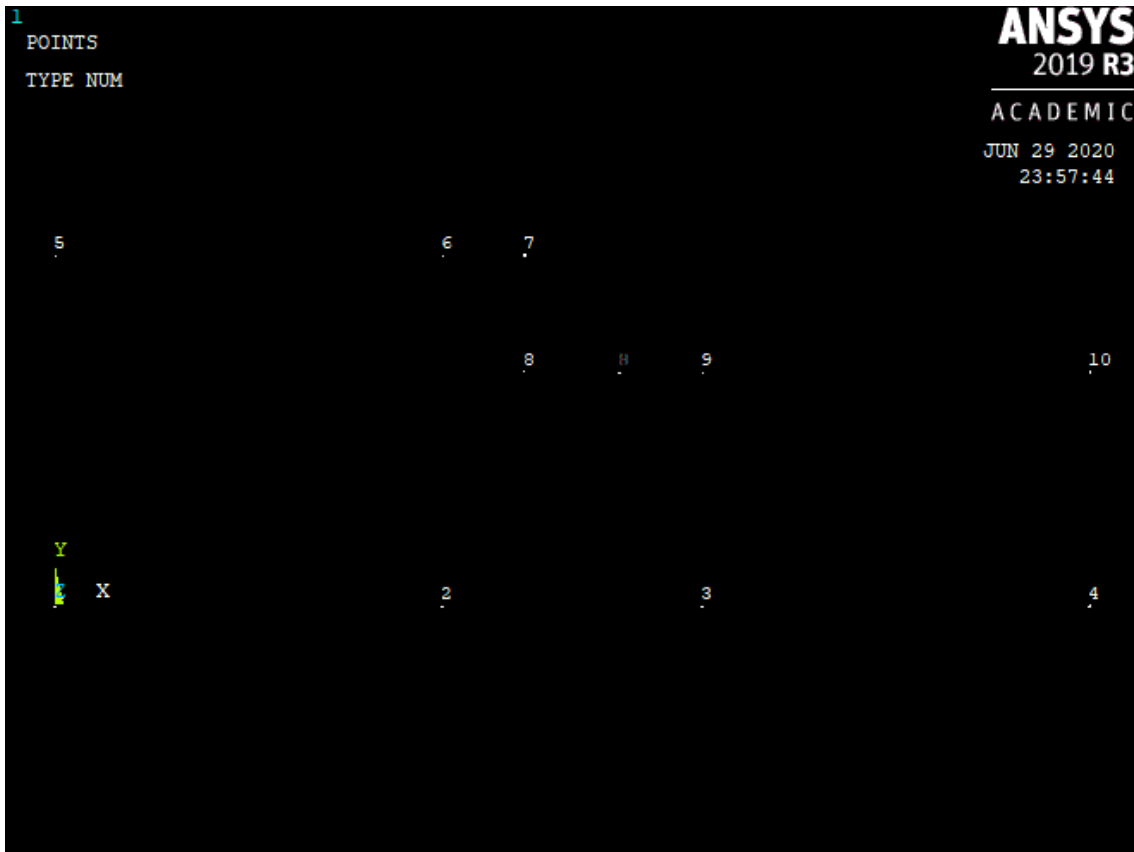


Figura 5.9. Keypoints

Ahora definiremos las líneas que unirán los anteriores Keypoints , obtendremos diferentes áreas que utilizaremos posteriormente para darle volumen a la figura.

Para ello, seguiremos los siguientes pasos en el preprocesador:

Modeling > Create > Lines > Straight Line. Hay que decir que hemos creado tres áreas diferentes uniendo los keypoints 2-6 y 3-9 para que, posteriormente, el mallado tenga mejor precisión.

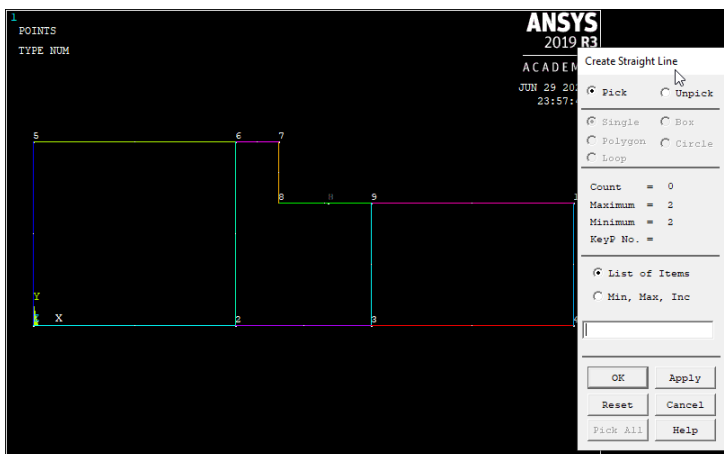


Figura 5.10. Creación de líneas.

Para la creación del radio de curvatura de la entalla seguiremos los siguientes pasos:

Modeling > Create > Lines > Splines > By lines. Se nos abrirá el siguiente cuadro de dialogo, donde seleccionaremos las líneas donde se sitúa el arco e introduciremos el radio de curvatura para obtener la siguiente figura en la pantalla de trabajo.

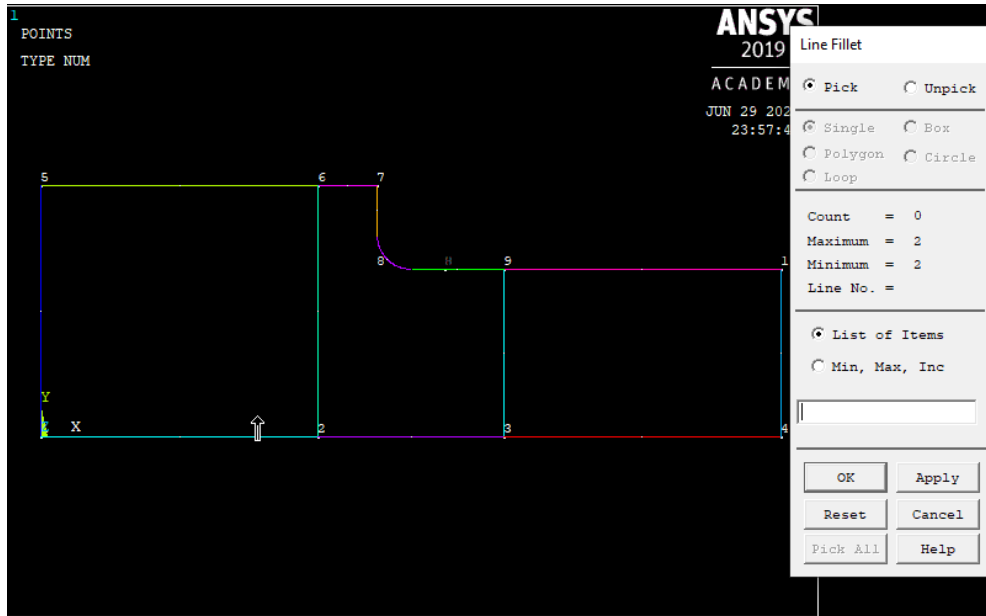


Figura 5.11. Creación arco de la entalla.

Después de esto, seguiremos con la generación de las áreas. Para ello, entraremos en el preprocesador y seguiremos los siguientes pasos: Modeling > Create > Areas > By lines. Cuando hayamos hecho esto, se nos abrirá una ventana en la que elegiremos las líneas las cuales componen cada área y clicaremos en “Apply”. Una vez hayamos creado las tres distintas áreas pulsaremos OK y cerraremos la ventana.

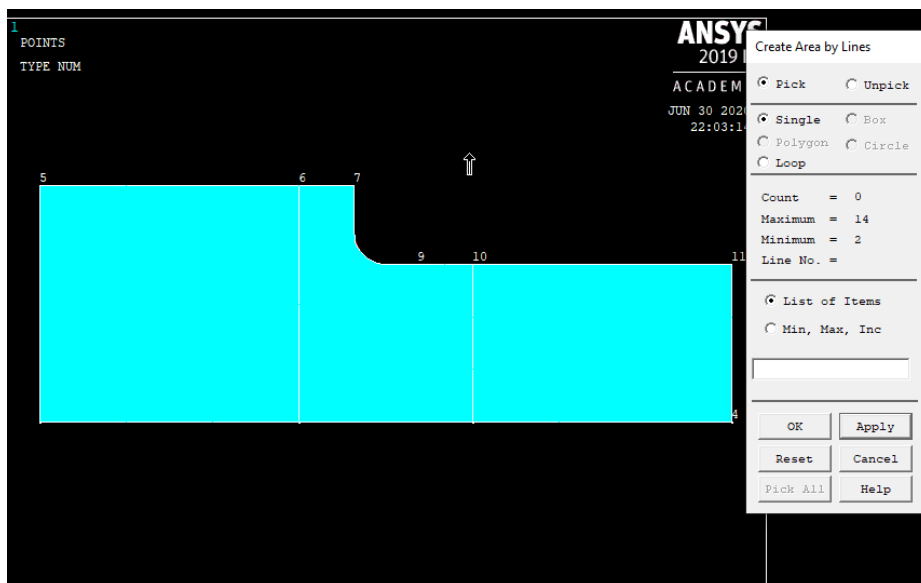


Figura 5.12. Creación de áreas.



Por último, para terminar con la geometría de la pieza, nos faltaría darle volumen. Para ello lo que vamos a realizar es una extrusión de las áreas. Para ello seguiremos los siguientes pasos:

Modeling > Operate > Extrude > Areas > About axis. Hecho esto, se nos abrirá otro cuadro de diálogo donde deberemos escoger las áreas y los puntos para crear el volumen. Hay que decir que los puntos escogidos (1 y 4) deben ser en el orden correcto ya que se trata de un vector de posición.

Como vemos en la figura 5.13, sólo hemos creado la mitad del volumen ya que esta pieza es geometría respecto al eje Z y nos facilita el posterior mallado de la pieza.

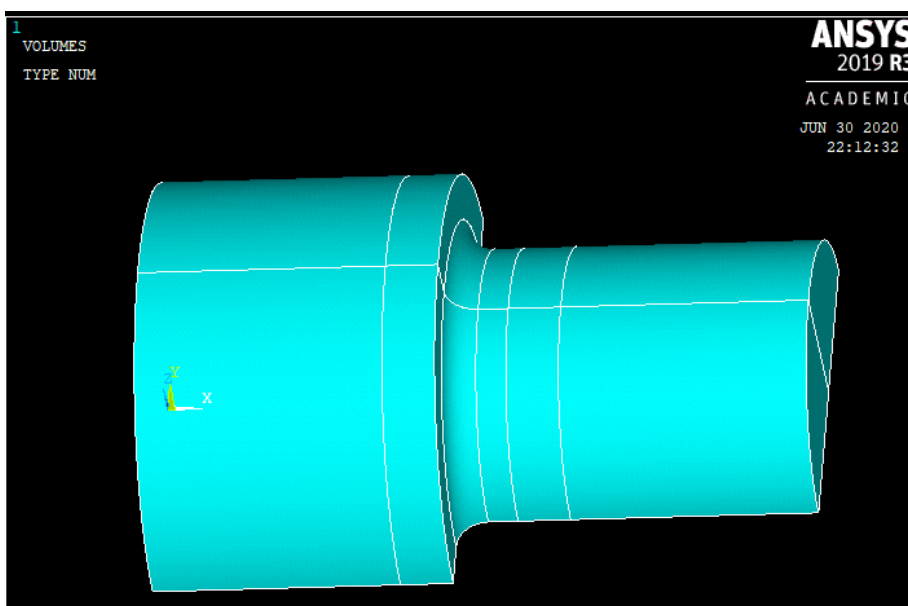


Figura 5.13. Creación del volumen.

### 5.3 Generación de la malla de elementos finitos.

En este momento vamos a empezar a crear el mallado de la pieza, necesario para poder resolver posteriormente mediante el Método de los elementos finitos y que intentaremos ajustar al máximo para tener una solución lo mas precisa posible. Existen diferentes versiones del software Ansys®, en nuestro caso trabajamos con la versión estudiante. Este detalle es importante ya que nos limita la creación de la malla a 32000 nodos, número que se supera fácilmente si nos excedemos con el ajuste del tamaño y nos puede llevar a error. Para garantizar una precisión suficiente en el análisis de los resultados, llevaremos a cabo la comprobación mediante Norma energética que mas tarde explicaremos y en la que deberíamos obtener un error menor del 5% para considerar los resultados aceptables.

Por todo esto, debemos prestar una atención especial en este apartado para conseguir un tamaño de elemento pequeño con el que conseguir una precisión suficiente, pero que no exceda ese limite de 32000 nodos disponibles en esta versión.

Una vez hechas estas aclaraciones, nos disponemos a comenzar con el mallado de la pieza. El software Ansys® tiene disponible el mallado automático, y luego nos permite definir un tamaño de elemento específico para puntos, líneas o áreas, los elementos mas relevantes de nuestra pieza.

De este modo, accederemos al preprocesador y seguiremos los siguientes pasos para comenzar con el mallado de nuestra pieza:

Preprocessor > Meshing > Mesh Tool.

Se nos abrirá el siguiente cuadro de diálogo:

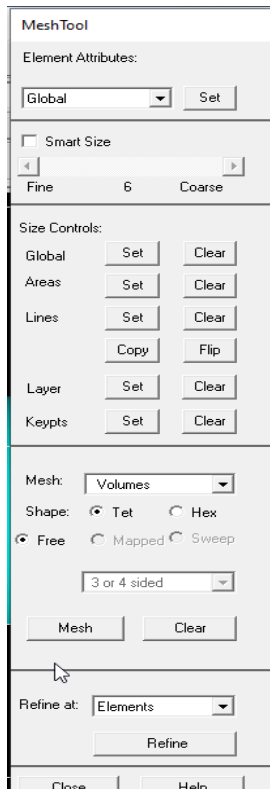


Figura 5.14. Cuadro de diálogo Mesh tool.

En este cuadro podemos observar en el apartado size controls los elementos que podemos definir de manera individual: Keypoints, layer, lines, áreas. En primer lugar, elegiremos la opción Smart size (mallado automático) para el mallado global de la pieza. Aquí elegiremos el refinamiento de menor tamaño para obtener mayor precisión. A continuación, definiremos un tamaño de mallado específico en las líneas donde se produce el cambio de diámetro, es decir, donde encontramos el concentrador de tensiones. Para ello, pulsaremos dentro de size controls > lines > set. Se nos abrirá un cuadro de dialogo para elegir las líneas deseadas y darle el tamaño específico.

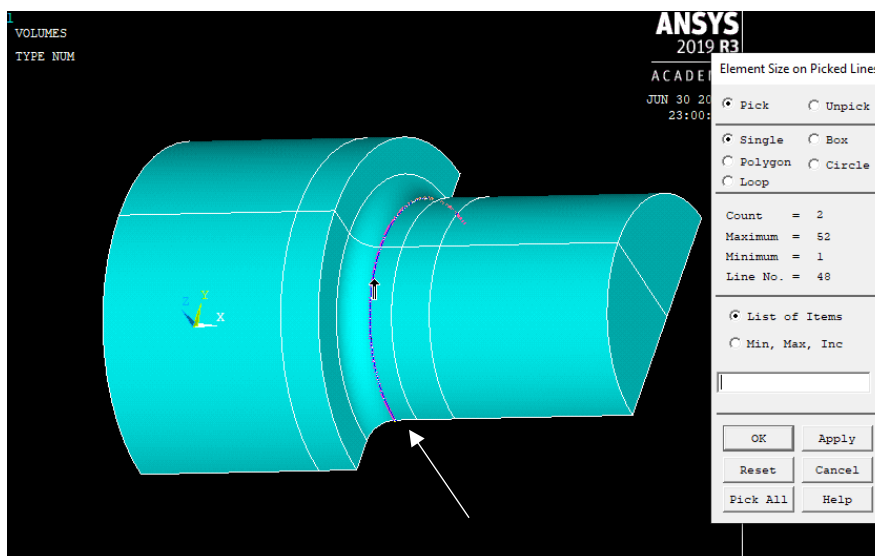


Figura 5.14. Elección de líneas específicas para mallar.

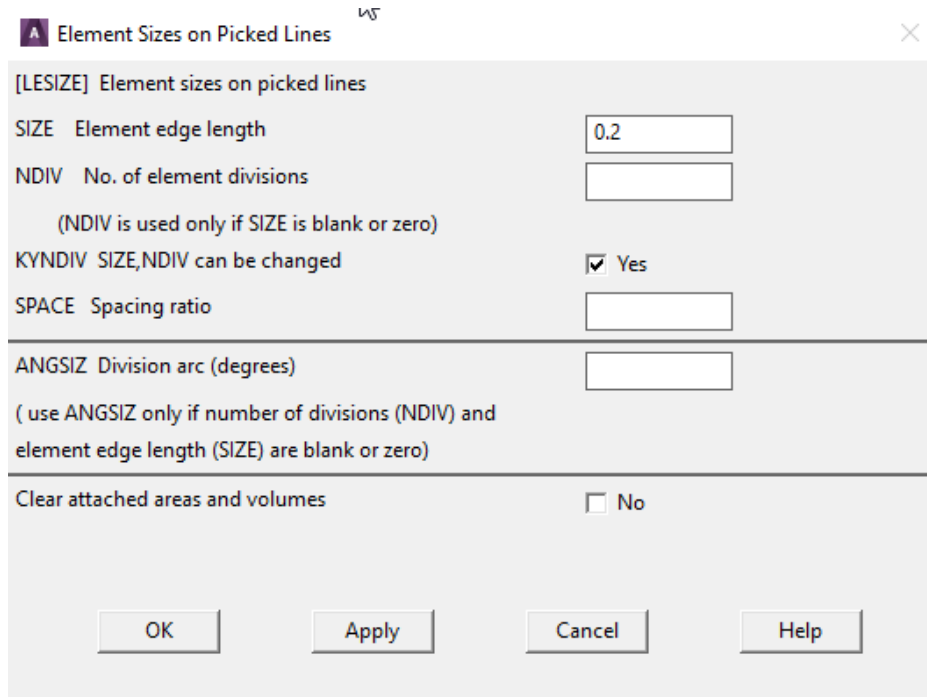


Figura 5.15. Cuadro de diálogo para dar un tamaño al elemento.

Después de diversas pruebas, hemos llegado a la conclusión de que con darle un tamaño de elemento a las líneas seleccionadas de un valor igual a  $r/5$  (seguimos trabajando en función de los parámetros), obtenemos una precisión en el mallado más que aceptable.

Una vez introducidos todos estos valores volveremos a seleccionar Preprocessor > Meshing > Mesh Tool, seleccionaremos la opción de Mesh: “Volumes” y haremos clic en Mesh. Seleccionaremos toda la pieza, le daremos a OK y tendremos la pieza perfectamente mallada con los tamaños deseados.

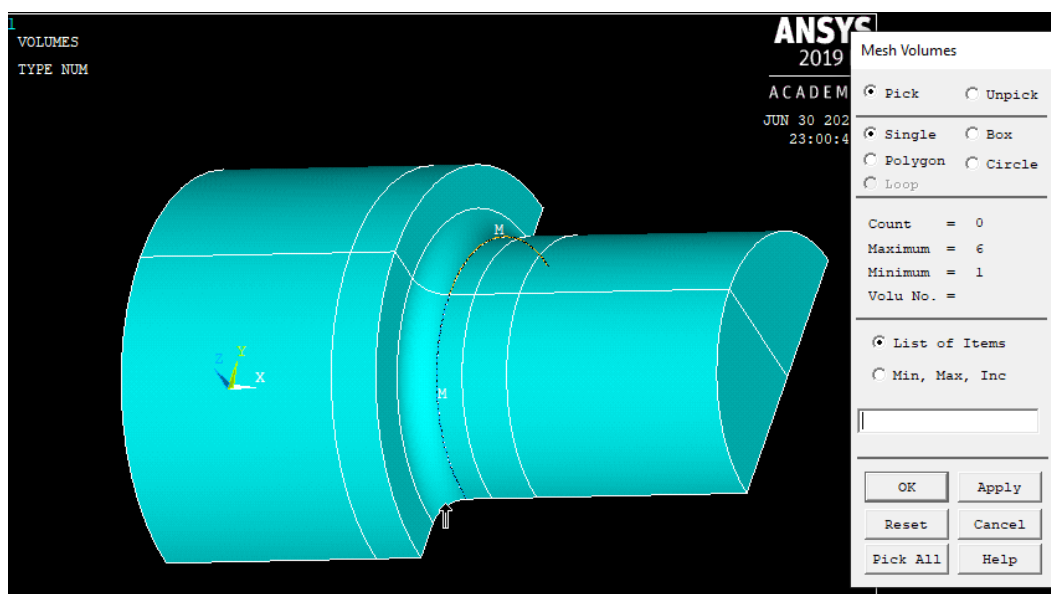


Figura 5.16. Cuadro de diálogo para selección de mallado.

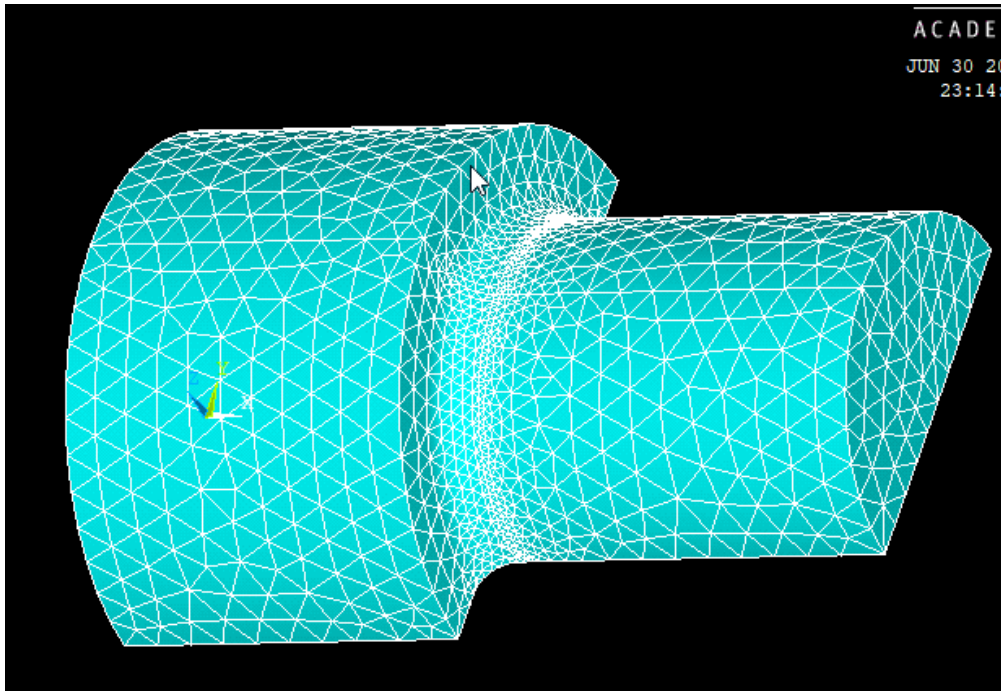


Figura 5.17. Pieza mallada.

## 5.4 Aplicación de las condiciones de contorno.

La última parte antes de pasar a resolver la pieza mediante el método de los elementos finitos, es imponer las condiciones de contorno que afectan al componente. Estas condiciones, pueden imponerse sobre el modelo sólido o sobre el modelo de elementos finitos. La primera opción nos simplifica el trabajo ya que no es necesario volver a introducir las condiciones de contorno si se cambia el mallado. Posteriormente, habrá que transferir estas condiciones al modelo de elementos finitos para resolver el problema.

En esta pieza vamos a aplicar las siguientes condiciones de contorno; en primer lugar, las condiciones de desplazamiento. Para ello, seguiremos los siguientes pasos dentro del preprocesador: Loads > Define Loads > Apply > Structural > Displacement > On áreas.

Las condiciones de desplazamiento que debemos imponer una vez se nos abra el cuadro de diálogo (figura 5.18) son: Desplazamiento nulo en dirección del eje X (Condición de empotramiento de la pieza) sobre las áreas con un tamaño igual a D (ver figura 5.19).

Como dijimos anteriormente, hemos aplicado una condición de simetría para simplificar la resolución de la pieza, por lo que debemos restringir el desplazamiento de la base en la dirección del eje Z (ver figura 5.20).

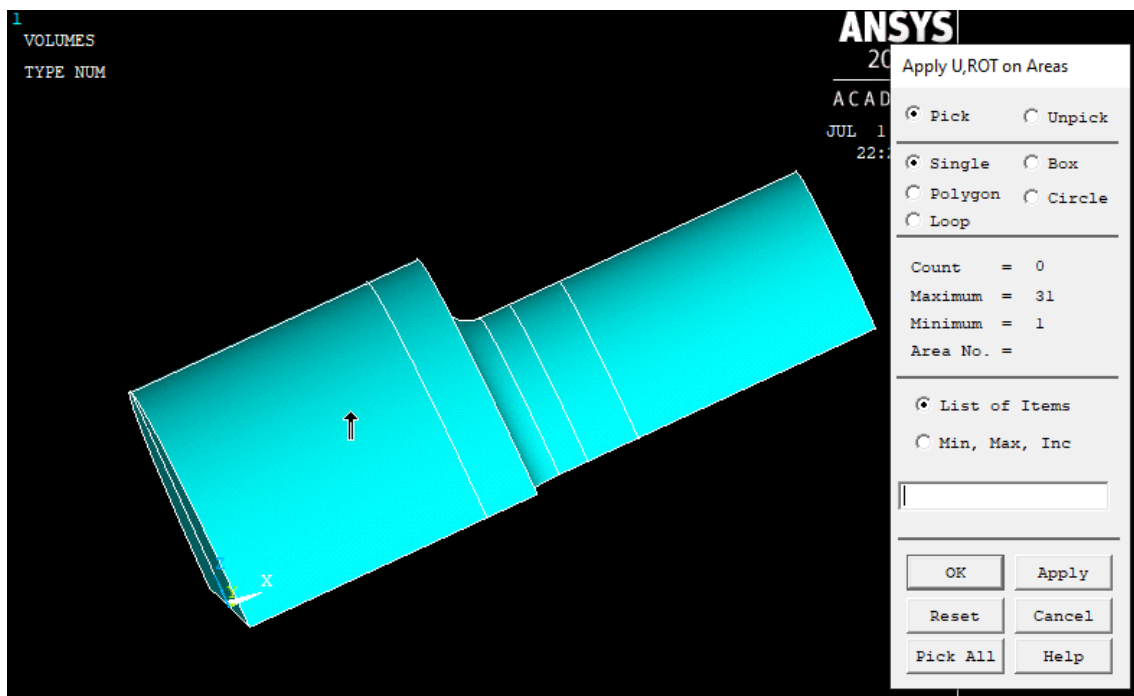


Figura 5.18 Ventana para configurar la restricción de desplazamientos.

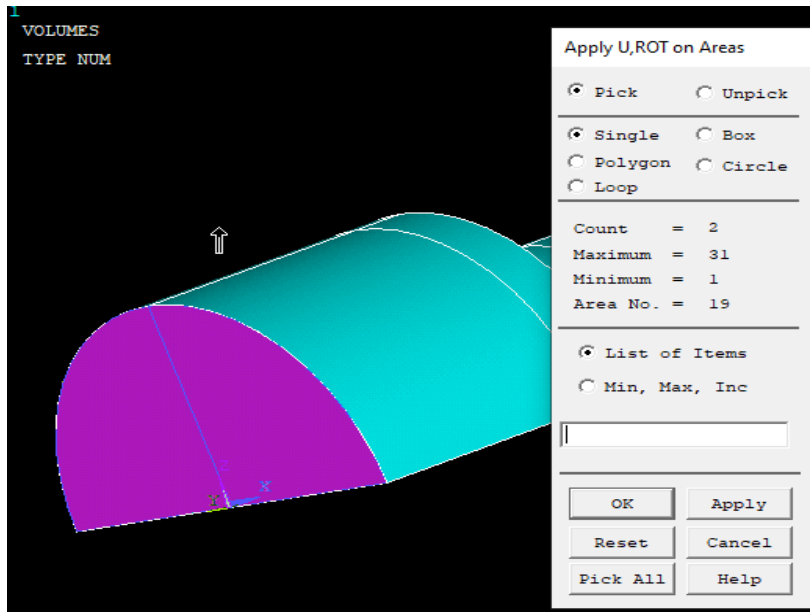


Figura 5.19. Condición de empotramiento de la pieza.

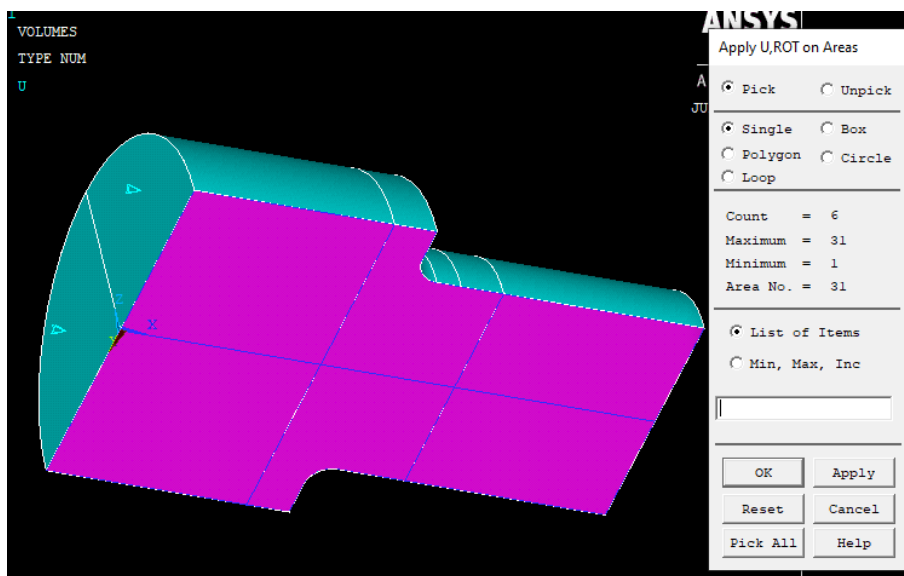


Figura 5.20. Condición de simetría de la pieza.

Por último, para que podamos resolver el problema, debemos restringir posibles movimientos del sólido rígido. Para ello, deberemos aplicar una restricción en la dirección del eje Y en el keypoint situado en el origen de coordenadas.

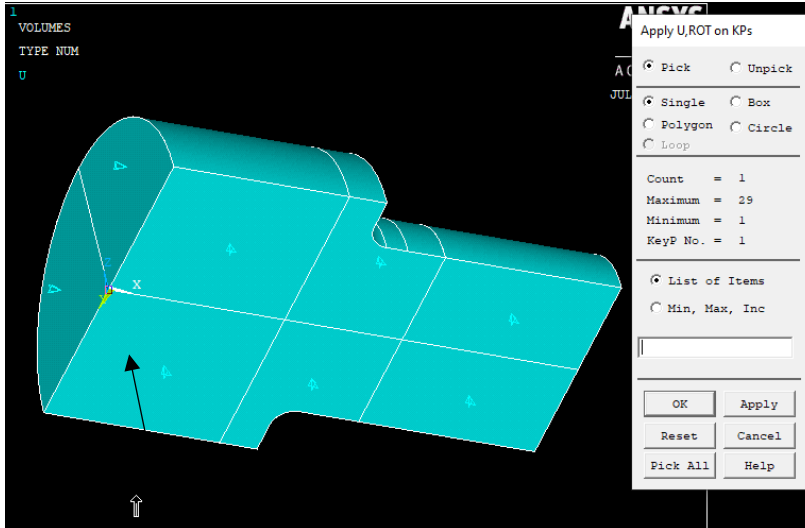


Figura 5.20. Restricción de movimiento del sólido rígido.

Con esto, ya tendríamos aplicadas las condiciones de desplazamiento. Ahora pasaremos a aplicar la presión necesaria para resolver el problema. En nuestro caso, vamos a aplicar una presión en toda el área de menor diámetro, en dirección del eje X. Esto lo haremos mediante los siguientes pasos: Loads > Define Loads > Apply > Structural > Pressure > On áreas. Una vez se nos abra la ventana de trabajo, seleccionaremos las áreas anteriormente nombradas y aplicaremos una presión de 100 MPa. Para ello, Ansys® considera las presiones de tracción como en nuestro caso negativas.

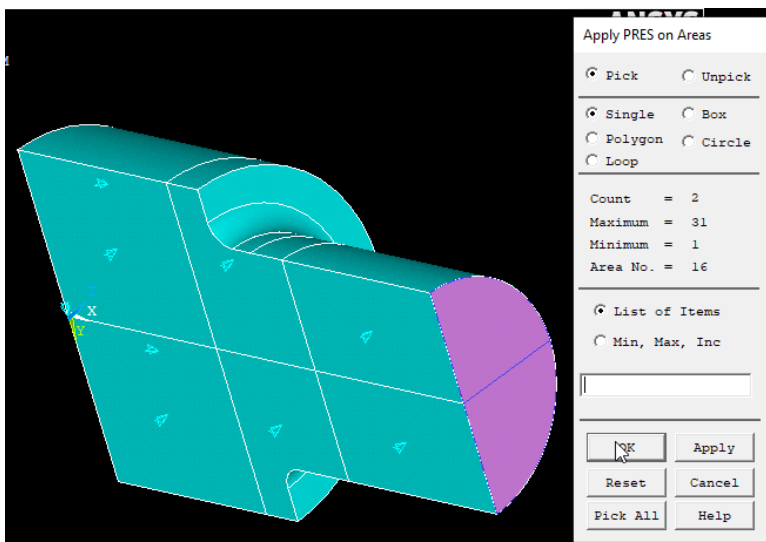


Figura 5.21. Selección de áreas donde aplicar la presión.



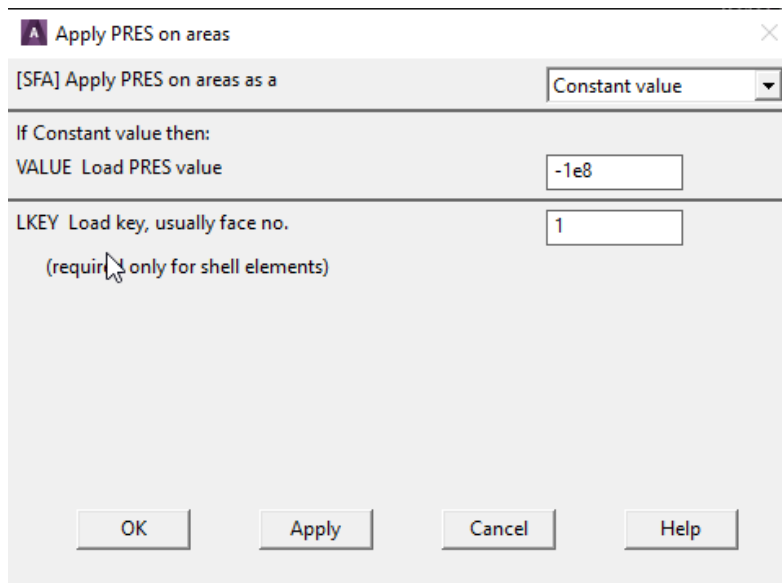


Figura 5.22. Aplicación de la presión deseada.

De esta forma, ya quedan aplicadas las condiciones de contorno en el modelo geométrico. Para que Ansys® pueda resolver el problema, debemos transferir estas condiciones al modelo de elementos finitos. Para ello, debemos abrir Loads > Define Loads > Operate > Transfer to FE > All Solids Lds. Una vez seleccionemos esta opción, se nos abrirá un cuadro de diálogo que nos avisará de que se van a transferir las condiciones al modelo de elementos finitos. Le damos clic a “OK” y ya estarán definidos el modelo sólido y el modelo de los elementos finitos.

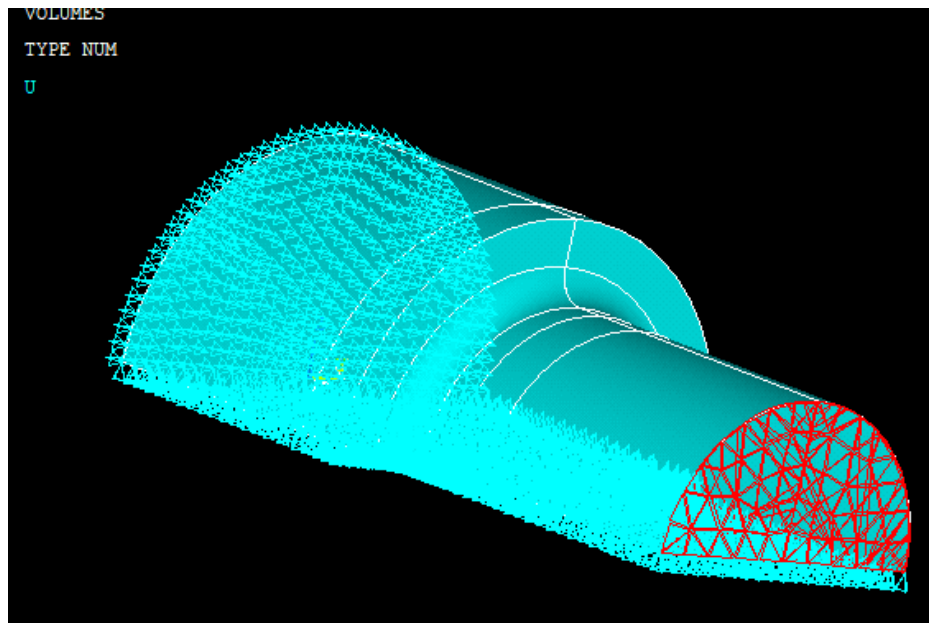


Figura 5.23. Condiciones de contorno aplicadas sobre el modelo de elementos finitos.

Con esto, ya podemos dar por finalizado el trabajo con el bloque del preprocesador. Clicaremos en Preprocessor para cerrar este módulo y abriremos el siguiente; Solution, para pasar a la resolución del problema.

### 5.5. Solución.

Una vez introducidas las condiciones de contorno del caso de carga a estudiar, pasaremos al cálculo de la solución. Para ello seleccionaremos la herramienta Solution > Solve > Current LS File en el menú principal, Main Menu.

Una vez pulsemos sobre este comando, se producirá la resolución del problema. El tiempo puede variar dependiendo del archivo y una vez finalice nos saltará el siguiente cuadro de diálogo confirmándonos que la solución se ha completado.



Figura 5.24. Aviso de que el cálculo ha terminado.

### 5.6. Obtención de los resultados.

Una vez resuelto el caso de carga mediante el método de los elementos finitos con Ansys® nos encargamos de analizar los resultados con la ayuda del postprocesador del programa.

Es importante que comprobemos que el error que hemos obtenido al realizar nuestro estudio no supere un 5% para dar como válido el análisis. Para ello, desactivaremos **POWERGRPH**, clicando en la barra superior con este nombre.

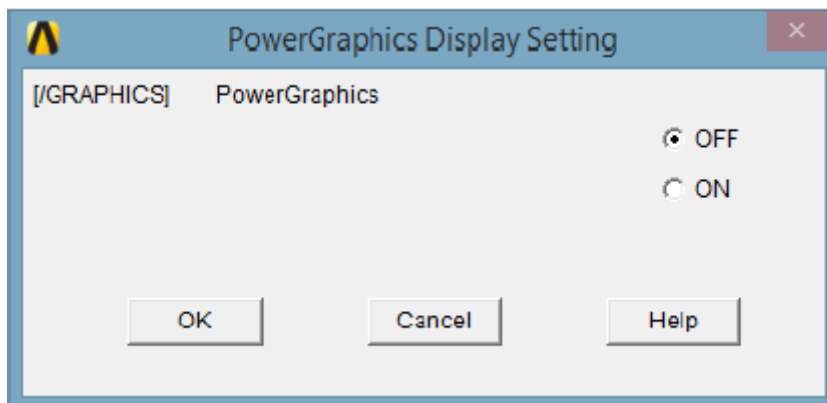


Figura 5.25. Ventana para desactivar powergrph.

Después de desactivar ese comando, escribiremos en la barra de herramientas de GENERAL POSTPROC, el comando PRERR el cual nos devuelve el valor del error en tanto por cien, en una ventana como la siguiente.

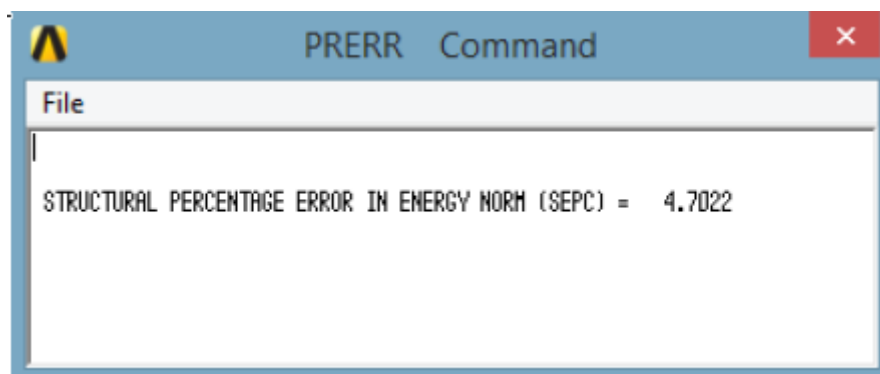


Figura 5.26. Ventana PRERR con el error.

Una vez hemos visto que el error de nuestro análisis es válido para continuar con el estudio, nos metemos a analizar los resultados. Para ello, vamos a entrar en

GENERAL POSTPROC > PLOT RESULTS > CONTOUR PLOT > NODAL SOLUTION. Donde podremos ver las tensiones máximas mediante diferentes criterios. Una vez se nos abra la ventana siguiente, elegiremos la opción STRESS.

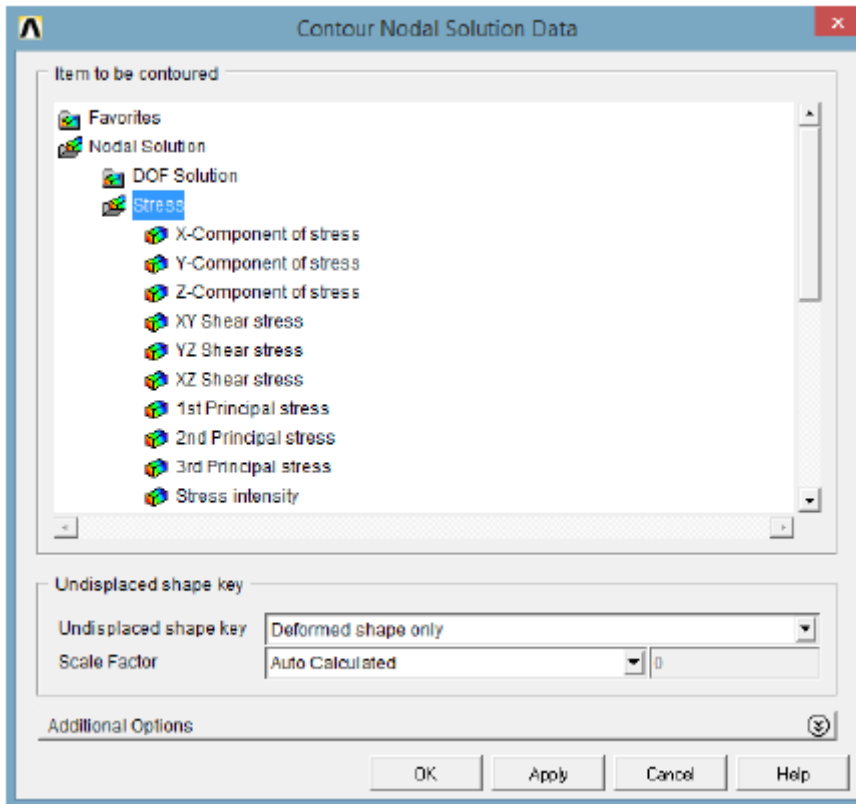


Figura 5.27. Ventana para la elección de la solución de contorno.

Una vez estamos dentro de esa opción, iremos viendo individualmente cada uno de los criterios de análisis.

Estos criterios son: Von Mises, Tresca, Tensiones Principales y Tensiones en X.

A continuación, se observa en cada una de las figuras la resolución obtenida con el programa con cada uno de los criterios de análisis y con lo que podemos afirmar que el trabajo que vamos a realizar después para una pieza con diferente morfología está bien sostenida por este trabajo previo.

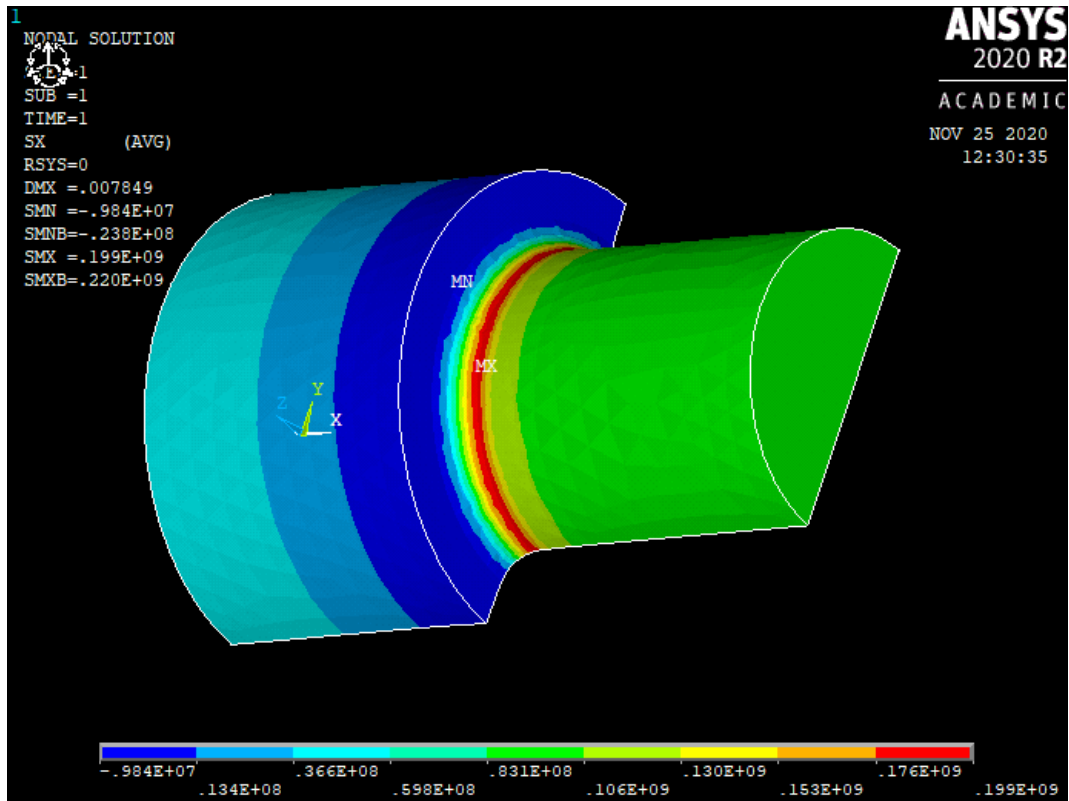


Figura 5.28. Campo de tensiones por el criterio de Tensiones en X.

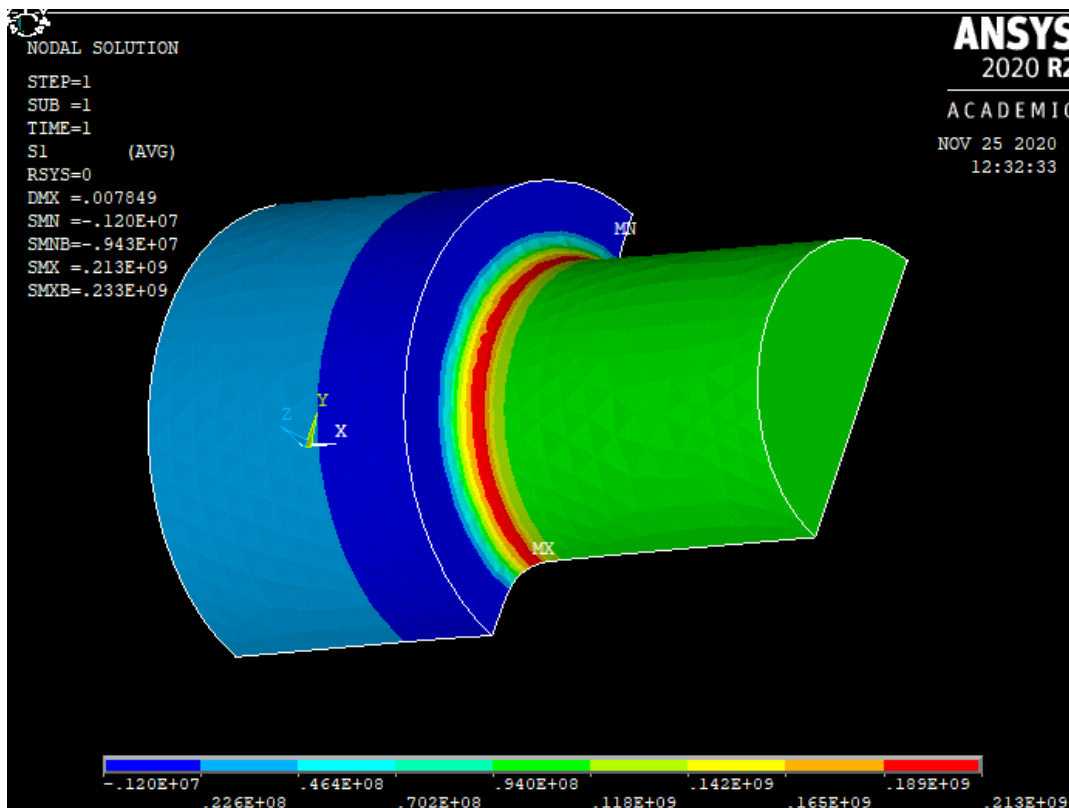


Figura 5.29. Campo de tensiones por el criterio de primera tensión principal en X.

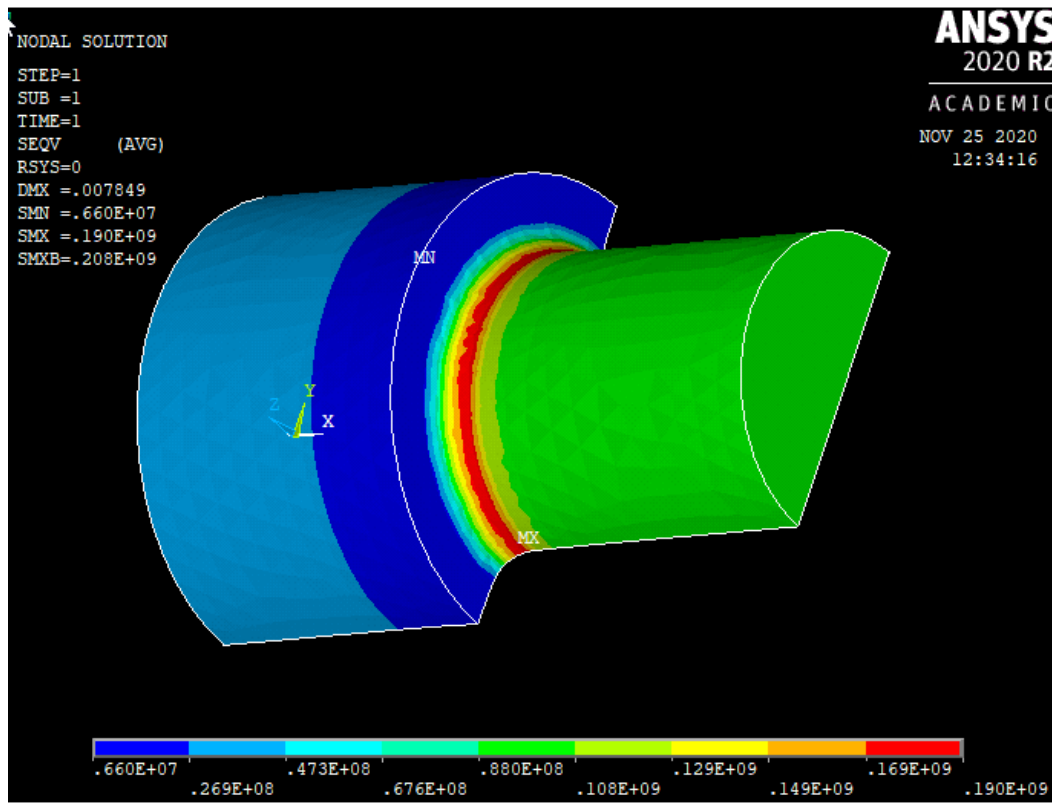


Figura 5.30. Campo de tensiones por el criterio de Von Mises.

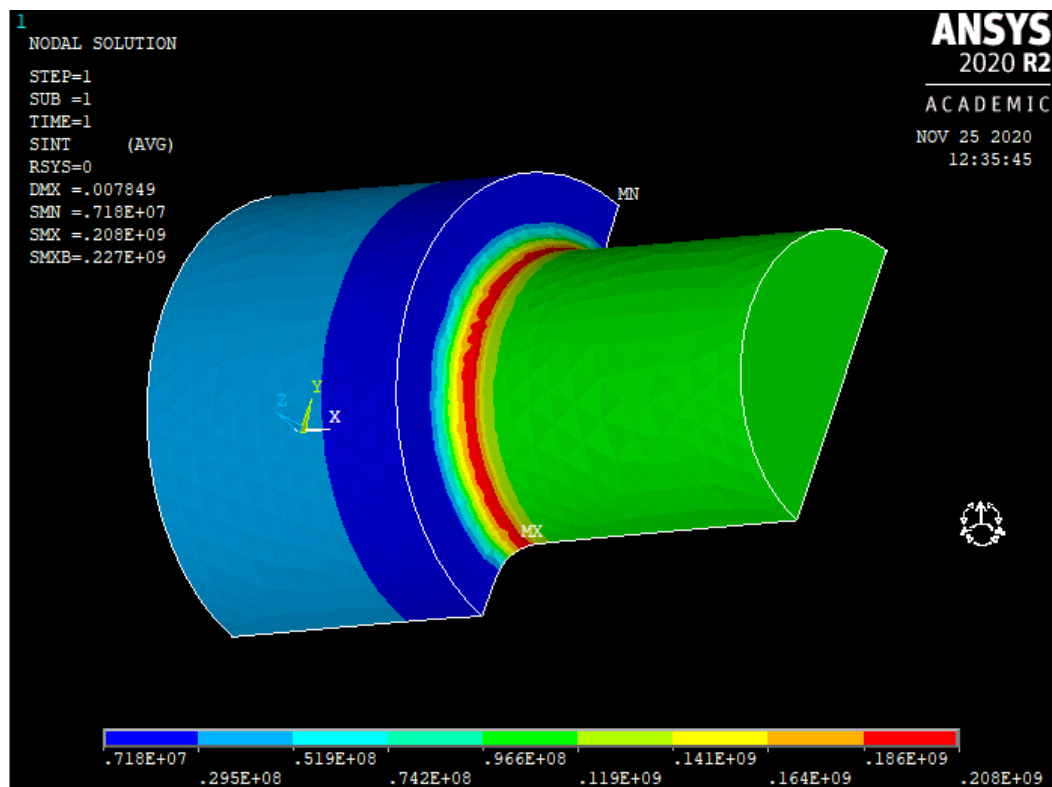


Figura 5.31.. Campo de tensiones por el criterio de Tresca.

A continuación, los datos obtenidos los utilizamos para crearnos una gráfica en Microsoft Excel con diferentes tamaños de D/d y de esta manera sacar las curvas que más se aproximen a las gráficas teóricas y así, poder dar como bueno este estudio previo al nuestro.

Después de cambiar los datos de relación r/d a los siguientes: 0.05,0.10, 0.12, 0.15, 0.17, 0.2, 0.25, 0.3. Y variando los valores D/d a 1.5, 1.1, 1.05, y 1.02 con un valor de d=0,1 hemos obtenido la siguiente tabla:

d(m)	D/d	r/d	pnom	pmax	Kt= pmax/pnom*(Dd^2)
0,1	1,5	0,3	100	334	1,484444444
0,1	1,5	0,25	100	342	1,5200
0,1	1,5	0,2	100	355	1,577777778
0,1	1,5	0,15	100	370	1,644444444
0,1	1,5	0,12	100	398	1,768888889
0,1	1,5	0,1	100	434	1,928888889
0,1	1,5	0,07	100	481	2,137777778
0,1	1,5	0,05	100	543	2,413333333
d(m)	D/d	r/d	pnom	pmax	Kt= pmax/pnom*(Dd^2)
0,1	1,15	0,3	100	181	1,368620038
0,1	1,15	0,25	100	187	1,413988658
0,1	1,15	0,2	100	193	1,459357278
0,1	1,15	0,15	100	200	1,512287335
0,1	1,15	0,12	100	206	1,557655955
0,1	1,15	0,1	100	214	1,618147448
0,1	1,15	0,07	100	225	1,701323251
0,1	1,15	0,05	100	240	1,814744802
d(m)	D/d	r/d	pnom	pmax	Kt= pmax/pnom*(Dd^2)
0,1	1,05	0,3	100	140	1,26984127
0,1	1,05	0,25	100	144	1,306122449
0,1	1,05	0,2	100	150	1,360544218
0,1	1,05	0,15	100	155	1,405895692
0,1	1,05	0,12	100	162	1,469387755
0,1	1,05	0,1	100	170	1,541950113
0,1	1,05	0,07	100	177	1,605442177
0,1	1,05	0,05	100	190	1,723356009
d(m)	D/d	r/d	pnom	pmax	Kt= pmax/pnom*(Dd^2)
0,1	1,02	0,3	100	124	1,192
0,1	1,02	0,25	100	125	1,201
0,1	1,02	0,2	100	128	1,230
0,1	1,02	0,15	100	133	1,278
0,1	1,02	0,12	100	136	1,307
0,1	1,02	0,1	100	142	1,365
0,1	1,02	0,07	100	148	1,423
0,1	1,02	0,05	100	155	1,490

Figura 5.32. Valores de Kt obtenidos mediante tensiones principales.



Esta tabla corresponde al criterio de las tensiones principales, ya que después de comparar datos hemos visto que es la curva que mejor se ajusta a la gráfica teórica de nuestro estudio.

Finalmente, hemos graficado estos datos, haciendo una comparativa con la gráfica teórica y podemos dar como válido el estudio ya que nos sale una gráfica bastante parecida a la teórica como vemos en la siguiente figura:

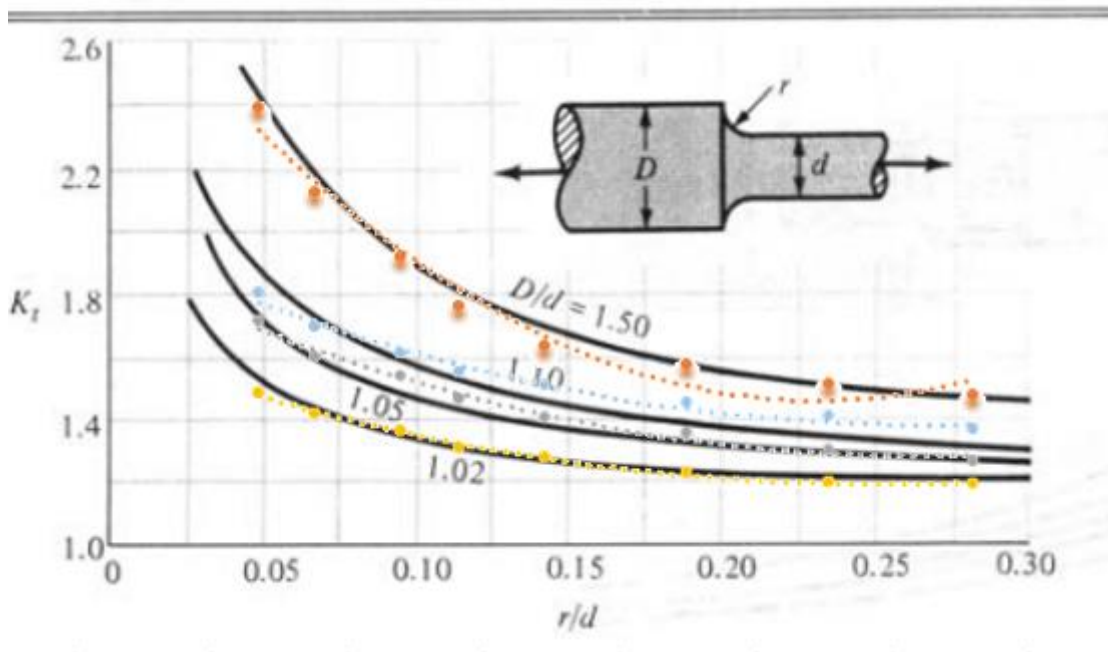


Figura 5.33. Comparación gráfica  $K_t$  con el criterio de tensiones principales.

# 6. VALIDACIÓN DEL CÁLCULO MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS POR COMPARACIÓN CON VALORES BIBLIOGRÁFICOS.

Para terminar con el estudio de nuestro elemento teórico, pues no hemos de olvidar que el objetivo de este trabajo es obtener las curvas del factor de concentrador de tensiones para una barra circular con ranura, hemos llevado a cabo unos cuantos estudios más con el programa de Ansys®, a fin de complementar todo lo hecho anteriormente y dar más validez a este trabajo.

En primer lugar, hemos estudiado como influencia el tipo de elemento y el tamaño que elegimos en Ansys® a la hora de crear la malla de elementos finitos.

Por último, hemos estudiado cómo se comporta nuestro elemento en caso de que fuese de otro material como aluminio u otro ficticio.

## 6.1. Estudio de la influencia del tipo/ tamaño de elemento.

Según el tipo de elemento utilizado para el mallado de nuestro objeto, podemos observar que nos ofrece un resultado más o menos exacto.

- Con un tipo de elemento tetraédrico y un tamaño de elemento de R/5 obtenemos unos datos muy buenos en concordancia con los datos bibliográficos.

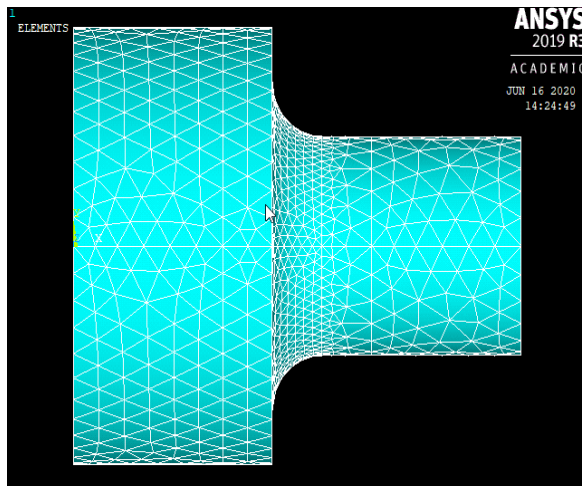


Figura 6. 1 Mallado con elemento tetraédrico.

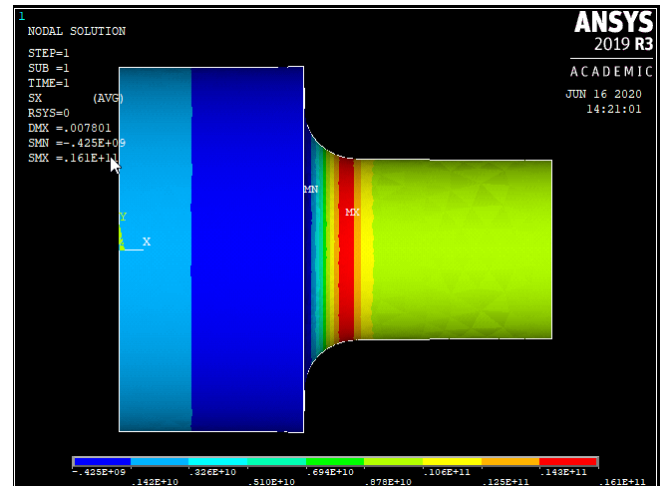


Figura 6. 2. Tensiones obtenidas con mallado tetraédrico.

- Por otra parte, vemos que, al aumentar el tamaño del elemento de manera muy brusca, los datos empiezan a diferir notablemente de los datos bibliográficos. Para cuantificar el error de discretización se ha de usar una magnitud que resulte útil, en lo que respecta a la definición de procedimientos, que permitan la reducción de dicho error. En general se busca cuantificar dicho error mediante una norma, que permita definirlo en base a un escalar. Una magnitud habitualmente utilizada es la norma energética. Con el uso de esta norma, observamos que el error obtenido es muy alto.

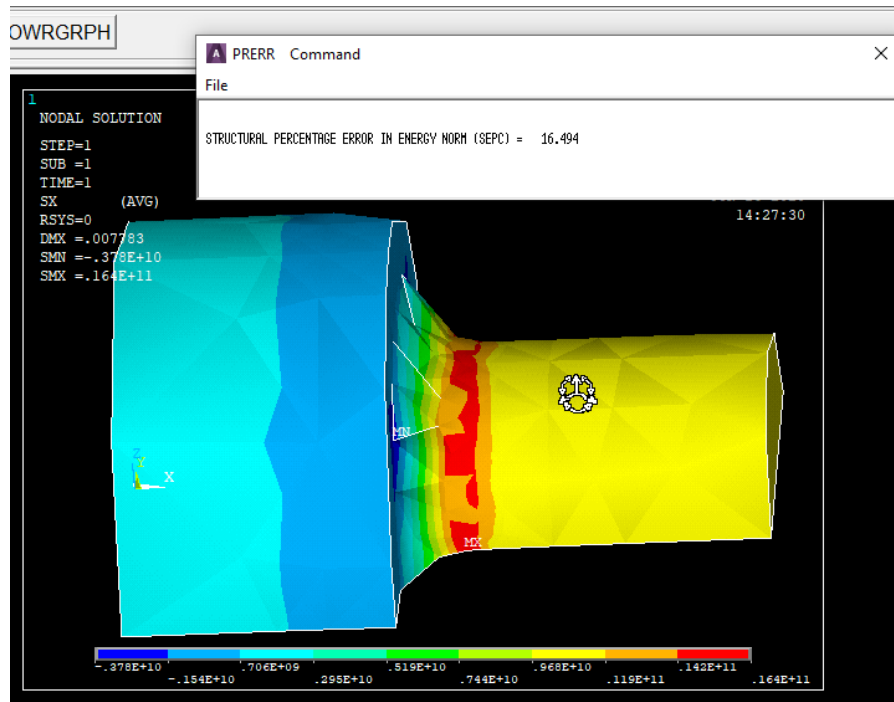


Figura 6. 3. Tensiones obtenidas con un tamaño de elemento muy grande.

Finalmente, si realizamos el cambio del tipo de elemento obtenemos unos resultados bastante buenos, en concordancia con los datos teóricos y que, además, comprobándolos mediante el error de la norma energética, podríamos decir que nos resultan válidos.

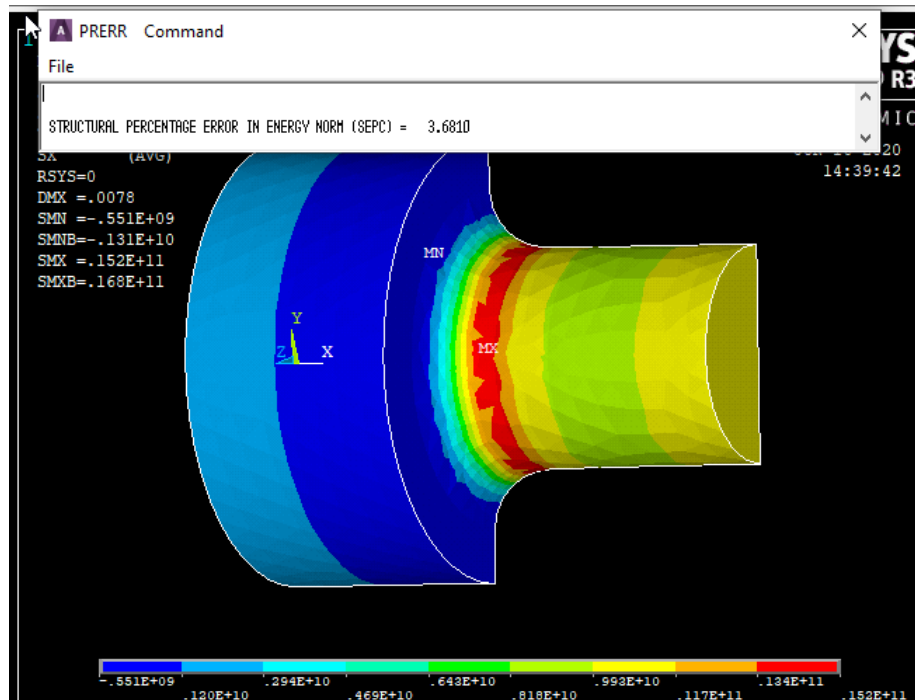


Figura 6. 4. Tensiones obtenidas mediante un mallado triangular.

## 6.2. Influencia de parámetros elásticos del material.

Para seguir aportando información a nuestro trabajo y de manera que tengamos unos datos fiables en los que apoyar nuestro futuro objeto de estudio, hemos realizado la comprobación de como varia  $K_t$  en función de los parámetros del material.

Primero hemos cambiado los datos elásticos del acero por los del aluminio, y hemos obtenido los siguientes resultados:

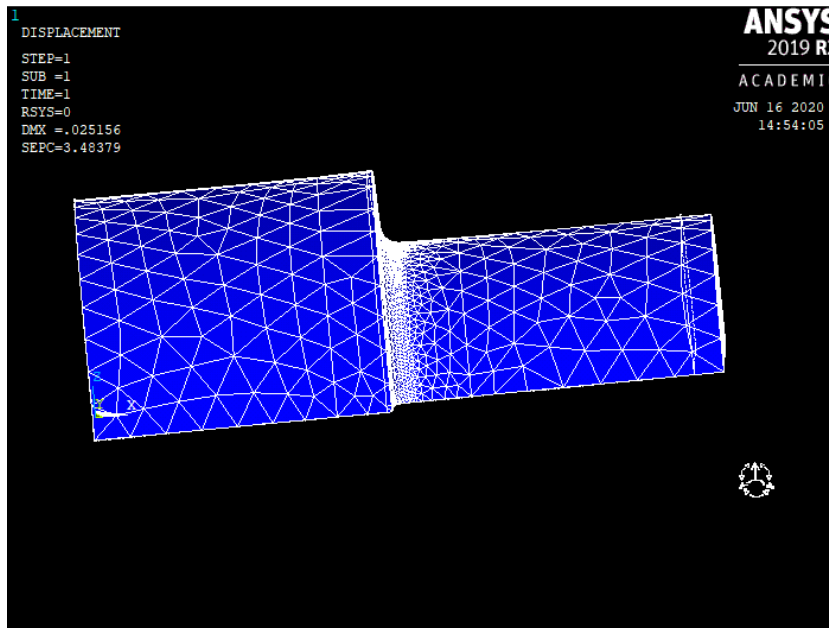


Figura 6. 5 Deformada del objeto con las características del aluminio.

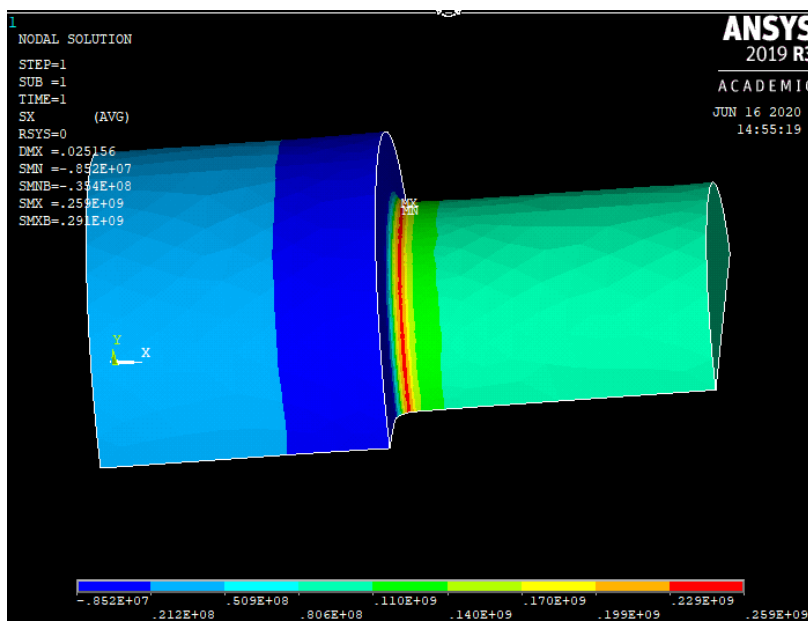


Figura 6. 6. Tensiones obtenidas con características del aluminio.

Después de esto, hemos cambiado los parámetros elásticos del material, por unos totalmente ficticios ( $E=100\text{Pa}$ ;  $\nu=0,1$ ), donde el módulo de Poisson es muy diferente, para ver si esto afecta a la obtención de  $K_t$ .

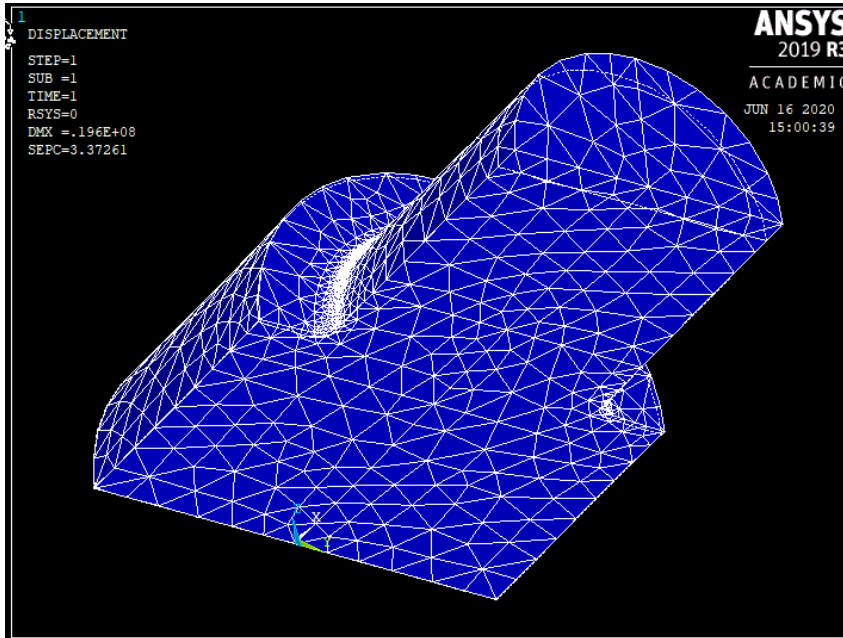


Figura 6. 7Deformada del objeto con las características de un material ficticio.

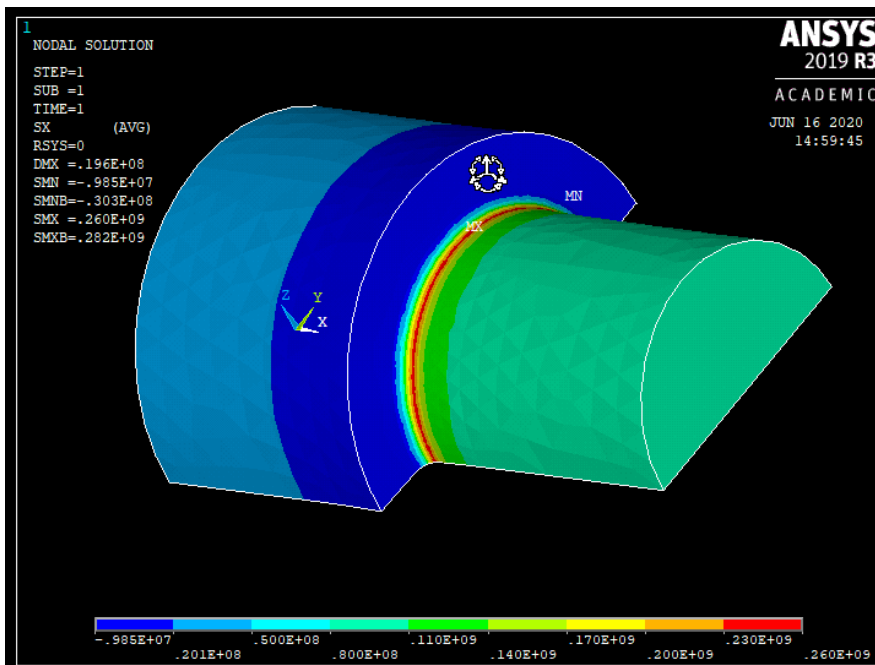


Figura 6. 8.Tensiones obtenidas con características de un material ficticio.

Viendo los resultados obtenidos y haciendo un estudio de ellos podemos afirmar que:

- El cambio de los parámetros elásticos no produce una variación significativa en la obtención de  $K_t$  mediante MEF.
- La deformada sí que se ve afectada considerablemente al cambiar los parámetros elásticos con los que trabajamos.

	Acero	Aluminio	Mat. Ficticio
$K_t$	2.59	2.59	2.62
Deformada	0.009235	0.02515	0.216e8



# 7. OBTENCIÓN DE CURVAS DE FACTOR DE CONCENTRADOR DE TENSIONES PARA BARRA CILÍNDRICA CON RANURA MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS.

Una vez hemos conseguido demostrar que el análisis mediante elementos finitos con el software Ansys®, es válido para crear las curvas teóricas del efecto concentrador de tensiones en una barra de acero con ranura.

Para ello, lo que hacemos es seguir los pasos descritos en el apartado 5 anterior, donde seguíamos paso a paso como hacer el modelado de una barra cambiando únicamente la geometría, la cual vamos a explicar a continuación.

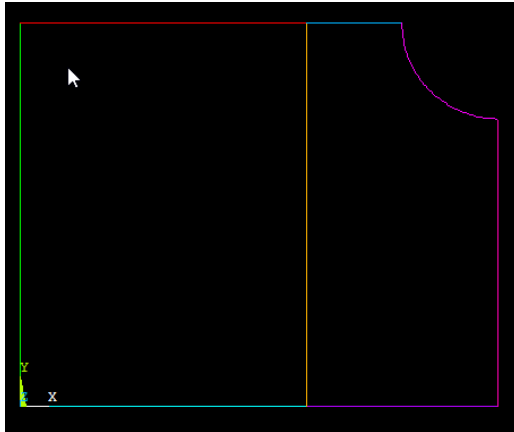


Figura 7.1. Geometría de la pieza en Ansys®.

El modelo geométrico lo vamos a definir mediante puntos (Keypoints) los cuales definiremos por sus coordenadas X e Y. Estos puntos los vamos a definir en función de los parámetros D, d y r.

keypoint	coordenadas	
1	0	0
2	$d - D/8$	0
3	$D + r$	0
4	0	$D/2$
5	$d - D/8$	$D/2$
6	$d$	$D/2$
7	$d + r$	$D/2 - r$

Tabla 7.1. Puntos geométricos de la pieza en Ansys®.

Con estos puntos, la geometría que hemos definido no es la totalidad de la barra cilíndrica, en nuestro caso gracias a la simetría de la pieza, podemos resolver el estudio de ésta dibujando en Ansys® únicamente un cuarto de la pieza, ya que la pieza es simétrica respecto del eje y como del eje x.

A partir de aquí, como ya hemos definido la nueva geometría a estudiar, hay que seguir los pasos descritos en el apartado 5.

### 7.1 Generación de la macro

Para la resolución sistemática de nuestro modelo, lo que haremos será crear una macro, con la que obtener todos los resultados sin tener que repetir los pasos nombrados anteriormente, cada vez que cambiemos el tamaño del diámetro o la relación entre éste y el radio.

Como ya hemos visto en el estudio, las gráficas de los concentradores de tensiones dependen de los valores  $d$ ,  $D/d$  y  $r/d$ . Por lo tanto, nuestra macro dependerá de ellos.

Aunque la creación de la macro puede resultar costosa en un primer momento, el tiempo que después nos ahorra hace que este sea un apartado muy importante.

La macro en nuestro caso de estudio queda de la siguiente manera:

```
1. !* Definición tipo de problema (Estructural)
2. /NOPR
3. KEYW,PR_SET,1
4. KEYW,PR_STRUC,1
5. KEYW,PR_THERM,0
6. KEYW,PR_FLUID,0
7. KEYW,PR_ELMAG,0
8. KEYW,MAGNOD,0
9. KEYW,MAGEDG,0
10. KEYW,MAGHFE,0
11. KEYW,MAGELC,0
12. KEYW,PR_MULTI,0
13. KEYW,PR_CFD,0
14. /GO
15. !*
16. /COM,
17. /COM, Preferences for GUI filtering have been set to display:
18. /COM, Structural
19. !*

20. /PREP7
21. !* Parámetros
22. *SET, L, 0.1
23. *SET, Dd, 2
24. *SET, rd, 0.25
25. *SET, ME, 2.1e11
26. *SET, mu, 0.3
```

27. !\*KEYPOINTS

28. k,1,0,0,0

29. K,2,L-L\*Dd/8,0,0,

30. k,3,L+L\*rd,0,0

31. k,5,0,L\*Dd/2,0

32. k,6,L-L\*Dd/8,L\*Dd/2,0

33. k,7,L,L\*Dd/2,0

34. k,8,L+L\*rd,L\*Dd/2-L\*rd,0

35. k,9,L,L\*Dd/2+L\*rd,0

36. !\*Creación de líneas

37. L, 1, 2

38. L, 2, 3

39. L, 5, 6

40. L, 6, 7

41. L, 3, 8

42. L, 1, 5

43. L, 2, 6

44. !\*Creación de arco correspondiente al radio de acuerdo

45. LARC,7,8,9,L\*rd

46. !\*AREAS

47. FLST,2,4,4

48. FITEM,2,6

49. FITEM,2,1

50. FITEM,2,7

51. FITEM,2,3

52. AL,P51X

53. FLST,2,5,4

54. FITEM,2,7

55. FITEM,2,4

56. FITEM,2,8

57. FITEM,2,5

58. FITEM,2,2

59. AL,P51X

60. !\*REVOLUCIÓN DE LA FIGURA

61. FLST,2,2,5,ORDE,2  
62. FITEM,2,1  
63. FITEM,2,-2  
64. FLST,8,2,3  
65. FITEM,8,1  
66. FITEM,8,3  
67. VROTAT,P51X, , , , , ,P51X, ,180,2

68. !\*ASIGNACIÓN PROPIEDADES ELÁSTICAS

69. MPTEMP,,,,,,,,,  
70. MPTEMP,1,0  
71. MPDATA,EX,1,,ME  
72. MPDATA,PRXY,1,,mu

73. !\*TIPO DE ELEMENTO

74. ET,1,SOLID186

75. !\*MALLADO

76. SMRT,6  
77. SMRT,1  
78. FLST,5,2,4,ORDE,2  
79. FITEM,5,18  
80. FITEM,5,28  
81. CM,\_Y,LINE  
82. LSEL, , , ,P51X  
83. CM,\_Y1,LINE  
84. CMSEL,,\_Y  
85. !\*  
86. LESIZE,\_Y1,0.005, , , , , ,1  
87. !\*  
88. FLST,5,4,6,ORDE,2  
89. FITEM,5,1  
90. FITEM,5,-4  
91. CM,\_Y,VOLU  
92. VSEL, , , ,P51X  
93. CM,\_Y1,VOLU  
94. CHKMSH,'VOLU'  
95. CMSEL,S,\_Y  
96. !\*  
97. !\*  
98. VCLEAR,\_Y1  
99. VMESH,\_Y1

```
100. !*
101. CMDELE,_Y
102. CMDELE,_Y1
103. CMDELE,_Y2
104. !*

105. !*PRESIÓN
106. FLST,2,2,5,ORDE,2
107. FITEM,2,9
108. FITEM,2,17
109. /GO
110. !*
111. SFA,P51X,1,PRES,-100000000

112. !*RESTRICCIÓN DE DESPLAZAMIENTO
113. FLST,2,2,5,ORDE,2
114. FITEM,2,3
115. FITEM,2,11
116. !*
117. /GO
118. DA,P51X,UX,
119. FLST,2,4,5,ORDE,4
120. FITEM,2,1
121. FITEM,2,-2
122. FITEM,2,14
123. FITEM,2,18
124. !*
125. /GO
126. DA,P51X,UZ,
127. FLST,2,1,3,ORDE,1
128. FITEM,2,1
129. !*
130. /GO
131. DK,P51X, , , ,0,UY, , , , , ,

132. !*SOLUCIÓN
133. FINISH
134. /SOL
135. !*
136. ANTYPE,0
137. /STATUS,SOLU
138. SOLVE
```

```
139. !* Orden de plotear SX
140. FINISH
141. /POST1
142. !*
143. /EFACET,1
144. PLNSOL, S,X, 0,1.0
145. FINALIZADO
```

De esta manera, los únicos datos que debemos variar son  $D/d$ ,  $r/d$  y  $d$ , ya que la geometría de la pieza también la hemos introducido en función de estos.

## 7.2 Resultados del análisis

Con la macro hemos obtenido los datos de la tensión máxima en la entalla de la geometría. Para ello, lo que hacemos es dividir la tensión principal máxima entre la tensión nominal, lo cual es equivalente al criterio de Máxima Tensión Normal y que además, es la tensión equivalente que mejor se aproximaba al  $K_t$  del eje con cambio de diámetro.

Para nuestro caso de carga, hemos aplicado en la superficie opuesta a la entalla una tensión de 100 MPa y Ansys nos ha calculado el siguiente valor de tensión en la superficie más solicitada:

Tensión nominal (MPa)	Relación entre diámetros D/d	Solicitación esfuerzo Axial (MPa)
100	1.5	454

Tabla 7.2. Valor de la tensión principal para  $d=0,1$ .

Una vez obtenemos con ayuda de la macro, los valores del análisis de Ansys®, el valor de  $K_t$  (coeficiente de concentrador de tensiones) será el cociente entre la tensión obtenida con el software y la tensión nominal aplicada en nuestro caso de carga.

Estos resultados, los pasaremos a una hoja de cálculo de Microsoft Excel donde graficaremos la curva obtenida con el software y la graficaremos a fin de compararlas con las curvas teóricas que queremos estudiar.

En primer lugar, mostramos los resultados obtenidos con Ansys®, que como venimos haciendo todo el trabajo, están en función de la geometría de la pieza, así que las gráficas también lo estarán.

Para obtener unas curvas lo más precisas posibles, hemos utilizado los siguientes datos para realizar el estudio:

- La relación de  $r/d$  serán 0.3, 0.25, 0.2, 0.15, 0.12, 0.1, 0.07, 0.05.
- En cuanto a la relación de diámetros D/d hemos analizado los datos para 1.5, 1.15, 1.05, 1.02.
- En todos los casos, el valor de  $d$  es igual a 0,1m.

Así pues, estos son los resultados obtenidos mediante el software Ansys, los cuales hemos introducido en una hoja Excel para obtener las curvas posteriormente.



<b>r/d \ D/d</b>	<b>1,02</b>	<b>1,05</b>	<b>1,15</b>	<b>1,5</b>
<b>0,3</b>	1,384083	1,414966	1,51228733	1,533333
<b>0,25</b>	1,412918	1,496599	1,61058601	1,688889
<b>0,2</b>	1,460977	1,596372	1,70888468	1,875556
<b>0,15</b>	1,499423	1,659864	1,92060491	2,017778
<b>0,12</b>	1,547482	1,768707	2,04158790	2,222222
<b>0,1</b>	1,633987	1,85034	2,17769376	2,577778
<b>0,07</b>	1,730104	2,013605	2,35160680	2,995556
<b>0,05</b>	1,845444	2,249433	2,64650283	3,453333

Tabla 7.3. Valores de  $K_t$  obtenidos mediante tensiones principales para carga axial.

### 7.3 Estudio de los resultados obtenidos

Una vez obtenidos los resultados del concentrador de tensiones  $K_t$ , vamos a graficar las curvas mediante Excel y las compararemos con las curvas de las gráficas teóricas que podemos encontrar en prontuarios. En nuestro caso estos son los resultados obtenidos:

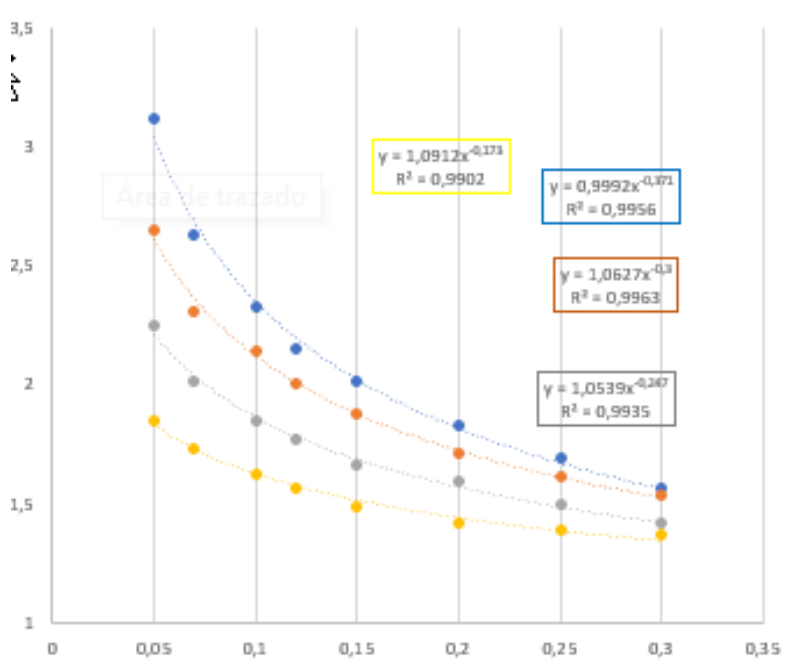


Figura 7.2. Gráfica de la curva  $K_t$ . Criterio de Tensiones principales para carga Axial.

Como observamos en nuestra gráfica, hemos agregado una línea de tendencia exponencial, ya que después de probar con otro tipo de regresión numérica, esta es la que mejor se ajusta. Con lo que nos sale un coeficiente de regresión de las curvas muy alto. De esto podemos sacar algunas conclusiones:

- En primer lugar, que los resultados que obtenemos mediante Ansys® son bastante aceptables.
- Además, como la línea de tendencia que mejor se ajusta y que hemos agregado es una exponencial, sabemos que en nuestro último punto de este estudio, la obtención de la superficie y su ecuación, los coeficientes que obtengamos serán a partir de ecuaciones o bien exponenciales, o bien logarítmicas.

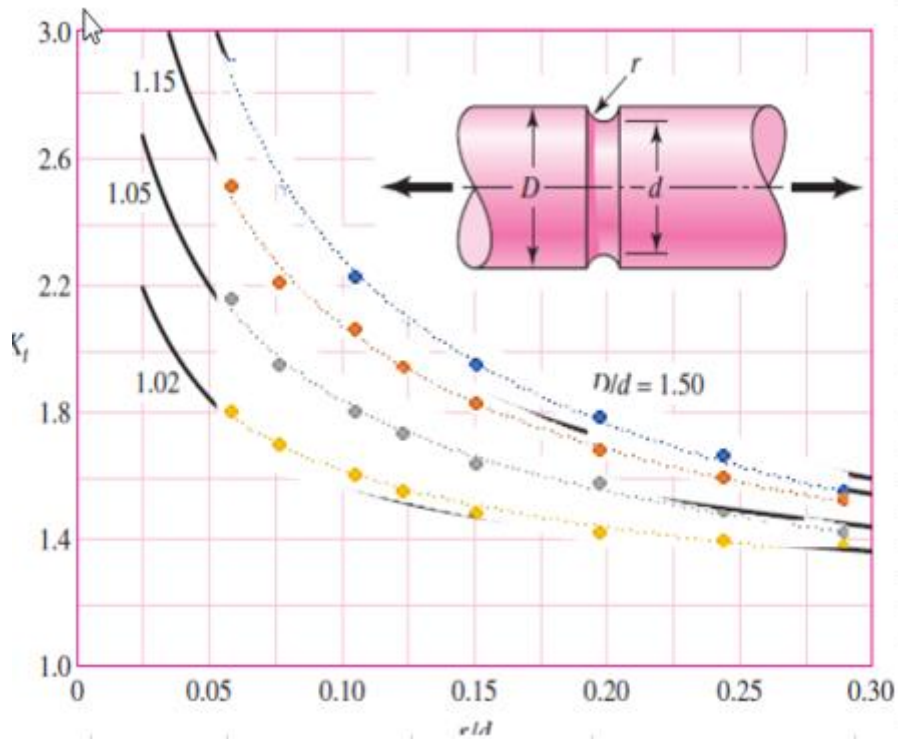


Figura 7.3. Gráfica de la curva obtenida frente a la curva teórica del libro de Shigley.

Además, como vamos a observar, las curvas obtenidas se ajustan a las curvas teóricas de los prontuarios, por lo que podemos aceptar el procedimiento llevado a cabo. También hay que añadir que la versión educacional del software Ansys tiene importantes limitaciones, y aunque como hemos visto en anteriores apartados, obtener un error estimado menor del 5% en norma energética es un error razonable, estaría bien poder realizar este estudio con el software completo de Ansys a fin de obtener una mayor exactitud.

# 8. OBTENCIÓN DE LA SUPERFICIE

## 8.1 SUPERFICIE CON OCTAVE

Por último, una vez hemos obtenido los resultados mediante el software de Ansys®, vamos a realizar el estudio de la superficie creada a partir de los resultado Kt obtenidos y que hemos mostrado en la tabla anterior. Para realizar dicho parte del trabajo haremos uso del programa OCTAVE(GLU).

En primer lugar, abrimos el programa y, una vez estemos dentro de la ventana de comandos, nos disponemos a introducir los datos que tenemos y que usaremos para realizar dichos cálculos.

Los datos a introducir serán: la matriz columna r/d, que es la relación entre el radio de la entalla y el diámetro menor; la matriz fila D/d, que es la relación existente entre los dos diámetros que parametrizan nuestra figura; y por último, la matriz de valores Kt.

Una vez hecho esto, introducimos los comandos correspondientes con tal de obtener la superficie polinómica que se ajuste a los datos obtenidos con el programa Ansys® mediante el método de los elementos finitos.

```
function a=coeficientes2(rd,Dd,Kt)
close all
rd2=rd*ones(1,size(Kt,2));
Dd2=ones(size(Kt,1),1)*Dd;
rd2=reshape(rd2,[],1);
Dd2=reshape(Dd2,[],1);
Kt1=reshape(Kt,[],1);
X=rd2;
Y=Dd2;
Kt2=Kt1;

P=Polinomio(X,Y);
M=P'*P;
B=P'*Kt2;
a=M\B;
Z=P*a;

R=sum((Z-Kt1).^2)/(Kt1.^2)
plot3(rd2,Dd2,(Kt1),'*');
hold on

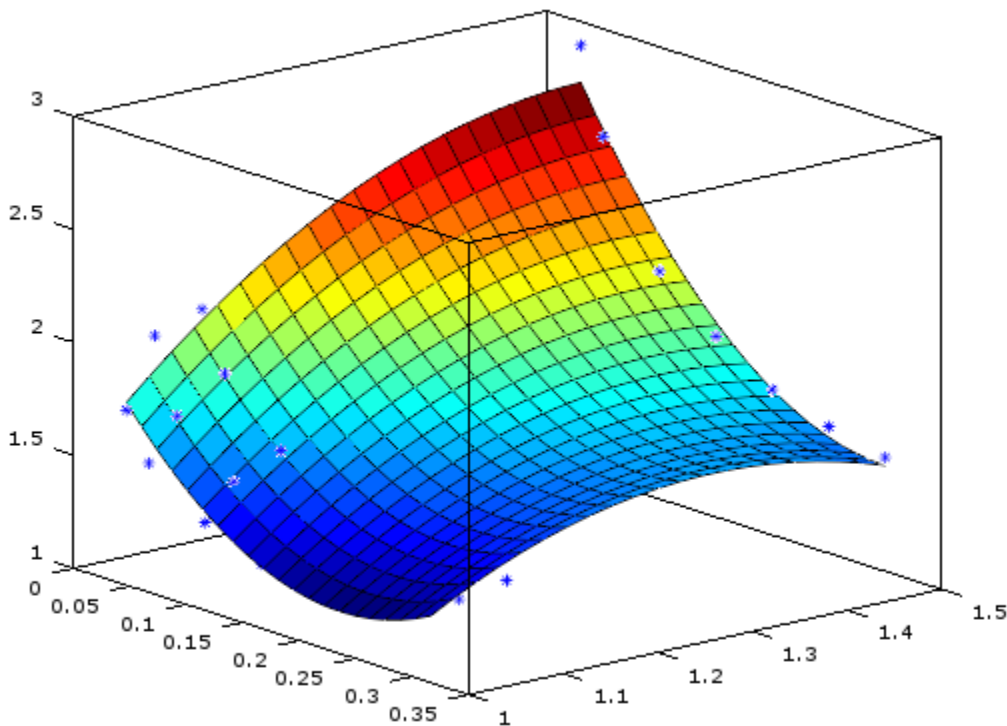
x=min(rd):(max(rd)-min(rd))/20:max(rd);
y=min(Dd):(max(Dd)-min(Dd))/20:max(Dd);
[x,y]=meshgrid(x',y');
x2=reshape(x,[],1);
y2=reshape(y,[],1);

Z=Polinomio(x2,y2)*a;
ZZ=reshape(Z,size(x,1),[]);
surf(x,y,(ZZ));
```

Después de ejecutar los comandos que hemos introducido en el programa OCTAVE, el programa nos devuelve una matriz columna a, correspondiente a los coeficientes del polinomio de ajuste de acuerdo con la siguiente expresión:

$$Kt\left(\frac{r}{d}, \frac{D}{d}\right) = a_0 + a_1 * \left(\frac{r}{d}\right)^{-1} + a_2 * \left(\frac{D}{d}\right)^{-1} + a_3 * \left(\frac{r}{d}\right)^{-2} + a_4 * \left(\frac{r}{d}\right)^{-1} + a_5 * \left(\frac{D}{d}\right)^{-2}$$

Por lo tanto, después de introducir los datos obtenidos en Ansys® y de ejecutar el programa, éste nos devolverá la superficie correspondiente a la ecuación de la tensión axial, donde los asteriscos representan los valores de Kt que hemos obtenido gracias al método de los elementos finitos.



Además de todo esto, también obtenemos un valor R correspondiente al ajuste de la superficie sobre los datos obtenidos mediante Ansys. Como obtenemos un valor de R=ritgher9 además de los coeficientes dicho anteriormente, que a continuación mostraremos, debemos estudiar una ecuación que se ajusten más a nuestros datos.

$$a = [0.979360.036902.85368-0.000490.06793-4.77879]$$

## 8.2 COEFICIENTE DE CORRELACIÓN

Por último, vamos a comparar los datos obtenidos mediante el cálculo de la superficie con el programa OCTAVE y los puntos que obtuvimos anteriormente con Ansys® mediante el método de los elementos finitos. Esto lo haremos con el software de Excel.

Los valores que hemos obtenidos con Ansys, los representaremos, como hemos antes, mediante puntos que uniremos con curvas. Mientras que, por otro lado, la superficie obtenida con el programa OCTAVE, lo representaremos con curvas totalmente continuas.

Para finalizar nuestro estudio, obtendremos el coeficiente de correlación. Este coeficiente nos sirve para comparar los datos obtenidos en Kt con ambos programas, es decir, el valor obtenido con el método de los elementos finitos y el valor que podemos obtener de nuestra ecuación característica. Para llevar esto a cabo, haremos uso de la siguiente ecuación:

$$r_{xy} = \frac{\sum x_i y_i - n \bar{x} \bar{y}}{(n-1) s_x s_y} = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{\sqrt{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \sqrt{n \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2}}$$

Gracias a Excel, podremos prepararnos los diferentes valores que necesitamos en la ecuación:

- Xi= valores obtenidos con Ansys®
- Yi = valores obtenidos con el programa Octave.
- N=número de valores que hemos obtenido.

De esta manera nos queda la siguiente hoja de Excel:





# 9.CONCLUSIONES

El trabajo que se ha realizado durante estos meses ha sido el de encontrar una solución para el cálculo del concentrador de tensiones. Esto quiere decir que, como sabemos, los valores de  $K_t$  que podemos encontrar en gráficas o en prontuarios no están disponibles para cualquier geometría, ni tan siquiera dentro de una geometría, podemos encontrar la relación de diámetros que buscamos.

Por eso, nosotros hemos procedido al cálculo de una ecuación que nos facilite la obtención de nuestro valor de  $K_t$ , conociendo únicamente los datos geométricos de la pieza.

Este estudio se lleva a cabo para argumentar que, en caso de no disponer de la gráfica necesaria, se dé validez al uso del software Ansys. Además de que el uso de éste es más asequible que hacer ensayos experimentales.

Los resultados de  $K_t$  obtenidos mediante el Método de los elementos finitos no son los exactos dado que están afectados el error de discretización. Este se debe al propio método de los elementos finitos al elegir un tamaño y tipo de malla, algo que se puede ir solucionando cambiando el tipo de elemento y reduciendo de esta forma el error hasta el porcentaje deseado. Aun así, al trabajar nosotros con una versión educacional, no podemos sobrepasar el número máximo de nodos a analizar. Por lo que haber obtenido un error por debajo del 5% es un muy buen trabajo.

Para finalizar, podemos concluir que hemos obtenida una ecuación aceptable, y que resulta muy útil a la hora de conseguir valores de  $K_t$  de una manera rápida y precisa, de una forma mejor que introduciéndonos a las gráficas de manera visual donde no podemos obtener el resultado de todo tipo de geometrías.

# 10. BIBLIOGRAFÍA

- Apuntes de la asignatura “Diseño de Máquinas I” Universidad Politécnica de Valencia, curso 2019-2020.
- BESA GONZALEZ, A.J. y VLERO CHULIÁ, F.J. (2016). *Diseño de Máquinas*. Valencia: Universitat Politècnica de València.
- Apuntes de la asignatura “Mecánica de los Medios Continuos y Teoría de Estructuras” Universidad Carlos III, Madrid.
- Manual en línea del programa Octave (inglés). <https://octave.org/doc/v6.1.0/>
- NORTON R. (2011). “Diseño de máquinas. Un enfoque integrado. 4a.ed.”
- RICHARD G. BUDYNAS y J. KEITH NISBETT (2012). “Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley.8a. ed.”

## II. PLANOS

En el estudio que hemos llevado a cabo, no se ha hecho uso de ningún tipo de plano, ya que todo el trabajo desarrollado ha sido a partir de programas informáticos y modelos geométricos teóricos definidos anteriormente que nos han servido de apoyo del proyecto.

# III. PLIEGO DE CONDICIONES

En este apartado procedemos a indicar como y que instrumentos son necesarios para realizar nuestro proyecto. Además, contendrá la información necesaria para que el proyecto llegue a su fin de acuerdo con lo descrito en la memoria. Todo esto, lo describiremos en los siguientes apartados:

1. Pliego de condiciones generales.

Condiciones económicas:

El proyecto constará de un apartado donde se reflejará el presupuesto. En este presupuesto, representaremos los costes de las licencias de los programas utilizados además del tiempo de estudio dedicado a obtener los valores de Kt.

Por último, también especificaremos dentro de este presupuesto las horas que el ingeniero ha dedicado a la redacción y realización del proyecto, así como el coste de estas horas.



## 2. Pliego de condiciones particulares.

### 2.1 Especificaciones de materiales y equipos.

Vamos a definir los materiales y equipos utilizados en el proyecto en función de reglamentos reconocidos.

#### Ordenador Portátil:

Modelo	<b>LENOVO IDEAPAD 320</b>
Procesador	Intel® Core i3 1.8GHz Boost up to 2.4Ghz
Sistema operativo	Sistema operativo de 64 bits, procesador x64
Memoria RAM	4GB DDR3
Almacenamiento disco	1000GB HDD
Tarjeta gráfica	Radeon R5 graphics
Pantalla	LED 15,6 pulgadas. 1366 x 768 HD

#### Ratón inalámbrico:

Modelo	<b>RATÓN WIRELESS</b>
Características	Inalámbrico Micro receptor USB 2 pilas AAA Cobertura inalámbrica 5m

### 2.2 Condiciones de ejecución.

En relación con este apartado, se trata de la forma en que hemos repartido las tareas realizadas durante el proyecto. Las hemos repartido en pequeñas tareas con el fin de controlar la ejecución de estas y poder cuantificarlas como veremos en la siguiente tabla.

Tareas realizadas	Horas dedicadas
Estudio del problema	5
Planteamiento de objetivos	5
Estudio del software Ansys	30
Estudio teórico de barra con cambio de diámetro	100
Estudio teórico de barra ranurada	80
Obtención de los resultados	20
Análisis de los resultados	20
Obtención de la superficie con OCTAVE	20
Redacción de la memoria	120

Estas horas son las optimas para realizar el trabajo y el ingeniero debe estar atento a que se cumplan, ya que retrasarlas podría ocasionar problemas a la hora de la entrega. No obstante, existe dentro de estas horas calculadas, una compensación debido a que ocurra algún imprevisto.

# IV.PRESUPUESTO

En el presupuesto se van a mostrar los gastos económicos acarreados por el trabajo durante su desarrollo. También se reflejará el presupuesto del ingeniero por las horas dedicadas y lo que cobrará por su trabajo.

También se tendrá en cuenta el coste de las licencias de los programas utilizados para desarrollar el proyecto y los programas para procesar la información.

El costes de las licencias usadas son las siguientes:

- El software Ansys® tiene un coste de 5500€. Hemos asumida la licencia que se usará en un entorno empresarial, el precio puede variar dependiendo de las ofertas o licencias que se hayan en ese momento en el mercado. En nuestro caso se trata de la licencia para Ansys® 19.2.
- Por otra parte, tenemos el paquete Microsoft office, cuyo precio es de 126 euros anuales. Hemos elegido el paquete Microsoft 365 Empresa Estándar, que incluye los diferentes programas básicos para una empresa. En nuestro proyecto hemos utilizado Microsoft Excel para el procesamiento de datos y Microsoft Word para la redacción del trabajo.

### Bloque 1. Licencias y trabajos.

Ref.	Definición	Cantidad	Precio anual	Total
1.1	Licencia Ansys ® 19.2	230h	5500,00 €/año	144,40€
1.2	Paquete Microsoft 365 Empresa estándar	20h	126,00 €/año	0,30 €
Total Bloque 1:				144,70 €

Por otro lado, en el presupuesto reflejaremos el coste de los materiales utilizados para desarrollar el proyecto. En nuestro caso, se trata del portátil personal del realizador del proyecto y su ratón inalámbrico.

### Bloque 2. Materiales

Ref.	Concepto	Especificación	Cantidad	Precio	Total
1.1	Ordenador Portátil	Portátil Lenovo Ideapad 320-15ABR	1	598,99	598,99
1.2	Ratón inalámbrico	Mobility Lab Ratón rubamouse inalámbrico	1	18,50	18,50

Finalmente, incluiremos el coste de las horas del ingeniero dedicadas a realizar este proyecto. Como podremos observar a continuación, el costo por hora que cobrará el ingeniero será de 19,5€/hora. Con un total de unas 400 horas de trabajo dedicado que desglosaremos más tarde nos quedan los siguientes costes:

Bloque 3: Otros.

Ref.	Concepto	Especificación	Cantidad	Precio	Total
1.1	Horas Trabajo	Horas de Trabajo dedicadas por el Ingeniero	400	19,50	7800,00
Total Bloque 3: 7800,00 €					

**COSTE TOTAL**

Nº Bloque	Definición	Subtotal
1	Licencias y programas	144,70 €
2	Materiales	617,49 €
3	Otros	7800,00 €
Presupuesto de ejecución material (PEM)		8562,19 €
13% Gastos Generales (GG)		1113,08 €
6% Beneficio Industrial (BI)		513,73 €
Presupuesto de Ejecución por Contrata (PEC)		10189,00 €
21% IVA		2139.69 €
Presupuesto de Ejecución por Contrata con IVA		12328.69 €

Asciende el presupuesto de ejecución por contrata con IVA a la expresada cantidad de DOCE MIL TRESCIENTOS VEINTIOCHO EUROS CON SESENTA Y NUEVE CÉNTIMOS.