

UNIVERSIDAD DE
GUANAJUATO



MANUAL PARA EL MODELADO DE RECIPIENTES A PRESIÓN EN ANSYS

Dr. Miguel Ernesto Gutiérrez Rivera

Estudiantes:
Pérez Rodríguez Martín Said
Granados Negrete Pedro Daniel
Moreno Palacios Mary Paz

Salamanca, Guanajuato

27 de julio de 2024

RECIPIENTE ESFÉRICO

1. EJEMPLO

Un recipiente esférico a presión hecho de acero (diámetro 500 mm, espesor 10 mm) está recubierto con laca frágil que se agrieta cuando la deformación alcanza 150×10^{-6} (vea la Figura 1) [1].

- ¿Qué presión interna p ocasionará que la laca se agriete? (Suponga que $E = 205$ GPa y $\nu = 0.30$).
- Si la deformación se mide en 125×10^{-6} ¿Cuál es la presión interna en ese punto?

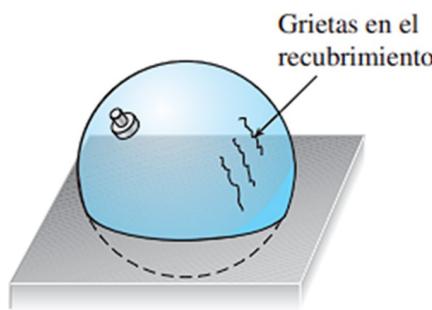


Figura 1: Recipiente esférico de acero [1].

2. SOLUCIÓN TEÓRICA

2.1. Inciso a

En el caso de esfuerzo biaxial, tal como el que ocurre en recipientes a presión esféricos, la ley de Hooke para esfuerzo plano se puede representar como:

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{E}(\sigma_1 - \nu\sigma_2) \quad (1)$$

Sustituyendo el valor de los esfuerzos σ_1 y σ_2 en función de la presión interna p , el radio r y el espesor de pared t , se tiene que

$$\varepsilon_1 = \frac{pr}{2tE}(1 - \nu) \quad (2)$$

Despejando p de la ecuación 2, se obtiene:

$$p = \frac{2tE\varepsilon_1}{r(1 - \nu)} \quad (3)$$

O en función de los valores del problema

$$p = \frac{2(10 \text{ mm})(205 \times 10^3 \text{ N/mm}^2)(150 \times 10^{-6})}{250 \text{ mm}(1 - 0.3)}$$
$$p = 3.5143 \text{ MPa}$$

2.2. Inciso b

Usando la ecuación 3 y sustituyendo los valores numéricos, se tiene que:

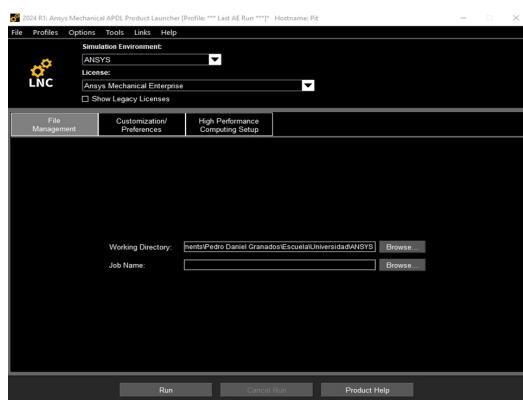
$$p = \frac{2(10 \text{ mm})(205 \times 10^3 \text{ N/mm}^2)(125 \times 10^{-6})}{250 \text{ mm}(1 - 0.3)}$$

$$p = 2.9286 \text{ MPa}$$

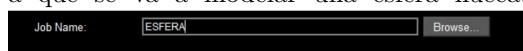
A continuación, se procederá a realizar el modelo de elemento finito, utilizando como entrada los valores de presión calculados y obteniendo como resultados las deformaciones listadas en el ejercicio.

3. MODELADO

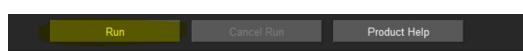
- Abre el programa “MECHANICAL APDL PRODUCT LAUNCHER”.



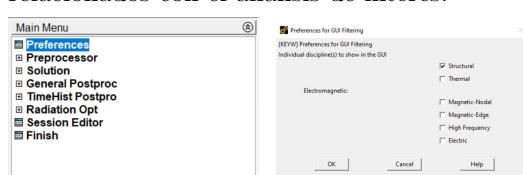
- En el cuadro de entrada de texto “Job Name” coloca el nombre del archivo de trabajo. Como recomendación, es conveniente darle un nombre al archivo que describa el modelo a elaborar. En este caso se coloca como ejemplo el nombre “ESFERA” debido a que se va a modelar una esfera hueca.



- Corre el archivo en ANSYS Mechanical APDL, presionando el botón RUN.

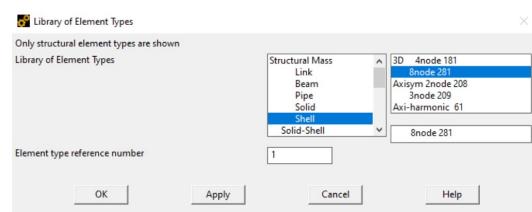


- En la ventana de ANSYS Mechanical APDL, dirígete al menú principal y abre el árbol de opciones “Preferences”. Dado que el análisis a realizar es un análisis de esfuerzos, selecciona la opción “Structural”, para que de este modo solamente aparezcan en la Interfaz Gráfica del Usuario (GUI) parámetros relacionados con el análisis de interés.

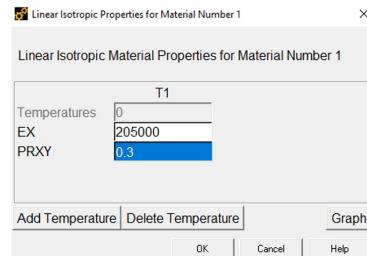
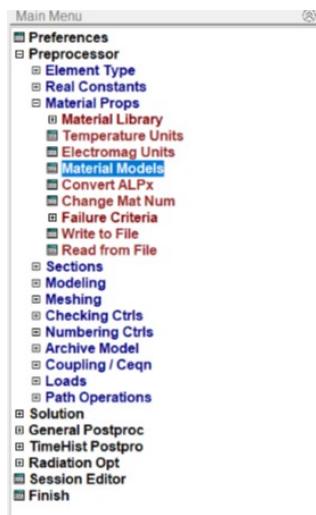


- Como siguiente paso, dentro del menú principal, dirígete a “Preprocessor”, abre el árbol de opciones, selecciona “Element Type” y has clic izquierdo en la opción “Add/Edit/Delete”. De este modo, se define el tipo de elemento que con el que se va a trabajar.

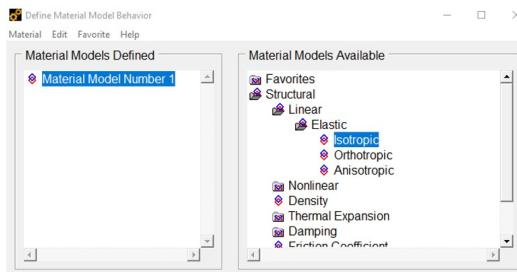
En este caso, debido a que la geometría es una esfera hueca, es conveniente trabajar con elementos **Shell**. Por tanto, selecciona el elemento **Shell 281 de 8 nodos**, para obtener mejores resultados en los cálculos numéricos.



- Posteriormente, define las propiedades del material. Para ello, dentro del árbol de opciones de “Preprocessor” en el menú principal, abre el árbol de opciones “Material Props” y selecciona con clic izquierdo la opción “Material Models”. De este modo se abrirá la ventana donde podrás definir el comportamiento que tendrá el material de trabajo.

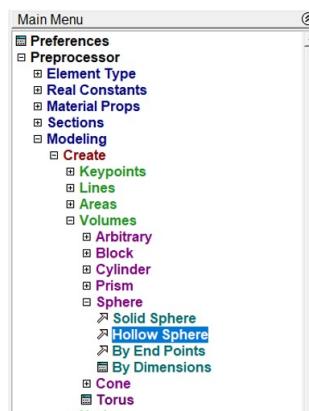


7. En el cuadro de opciones “**Material Models Available**”, dentro de la ventana que se abrió al culminar el punto anterior, selecciona el comportamiento del material. En este caso, selecciona un material con un comportamiento lineal, elástico e isotrópico.

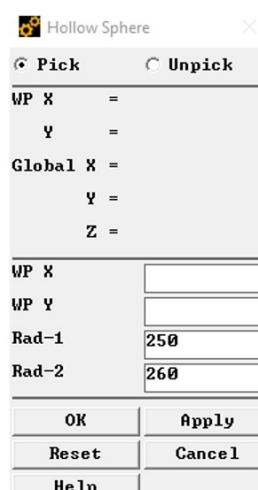


8. Hecho lo anterior, aparecerá una ventana en donde se introduce el módulo de elasticidad (E) y la razón de Poisson (ν) del material. En este ejemplo se usará $E = 205$ GPa y $\nu = 0.3$. Debido a que ANSYS no permite seleccionar las unidades con las que se trabajará, al introducir los valores se debe mantener una concordancia de unidades entre todos ellos. Para este caso, se trabaja con **mm** como unidad de distancia, y con **N** como unidad de fuerza, por lo que se introduce el módulo de elasticidad en MPa (N/mm^2), que en este caso tiene un valor de 205×10^3 MPa. Ahora, debido a que la razón de Poisson es adimensional, se introduce tal como lo proporciona el problema. Finalmente, una vez hayas introducido los datos, presiona el botón “**OK**” que aparece en la parte inferior de la ventana.

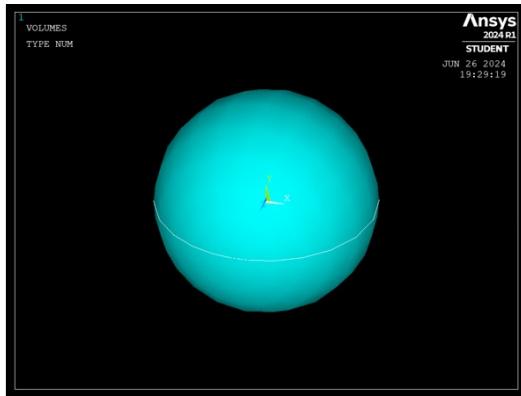
9. Como siguiente paso, es necesario definir la geometría del recipiente a analizar. En este caso corresponde a una esfera hueca, por lo que dentro del menú principal abre el árbol de opciones “**Preprocessor**”. Posteriormente, abre el árbol de opciones “**Modelling**” y después selecciona “**Create**”. A continuación, abre el árbol de opciones “**Volumes**”. Finalmente, en la opción “**Sphere**”, selecciona “**Hollow Sphere**”.



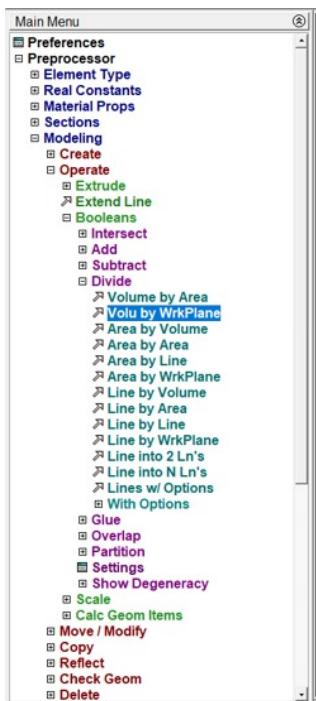
10. Dentro de la nueva ventana, define el radio exterior e interior de la esfera. Dado que para este problema el diámetro interior es de 500mm (véase el enunciado del problema) y el espesor dado es de 10mm, el radio 1 será de 250 mm y el radio 2 de 260 mm. Una vez que hayas agregado los valores en la ventana, presiona el botón “**OK**”.



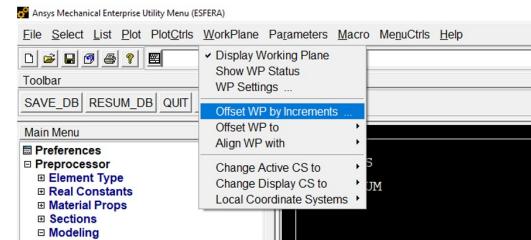
Hecho lo anterior, se debe mostrar en pantalla una esfera, como se ilustra en la siguiente figura:



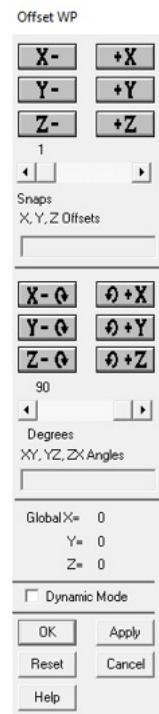
- La esfera es simétrica respecto a los ejes X, Y y Z. Por tal motivo, con el fin de disminuir el tiempo de cálculo, es posible dividirla en 8 partes y realizar el mallado en solo una de ellas, ya que los valores obtenidos para esa porción de esfera serán coincidentes con los de las 7 partes restantes (debido a su simetría). Para hacer una división, dentro del árbol de opciones de “**Preprocessor**” abre el árbol de opciones de “**Modeling**”, posteriormente abre el árbol de opciones “**Operate**”, enseguida abre el árbol de opciones “**Booleans**”. Finalmente abre el árbol de opciones “**Divide**” y selecciona “**Volume by WorkPlane**”, dando clic izquierdo sobre esta opción. Hecho esto, se dividirá o “cortará” nuestra geometría respecto al plano de trabajo XY.



12. Debido a que la esfera se va a dividir en 8 partes, es necesario hacer dos divisiones más. Sin embargo, antes de hacerlas debes mover el plano de trabajo entre cada división, alineando el plano XY con la dirección de corte. Para ello, en la barra de herramientas que se encuentra en la parte superior de la ventana, selecciona la opción **WorkPlane**, de la cual se desplegará una lista de opciones. De esta lista, selecciona la opción “**Offset WP by increments**”.

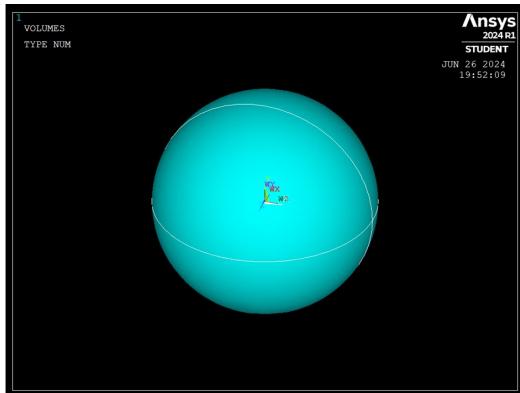


Hecho lo anterior, aparecerá una ventana como la siguiente:



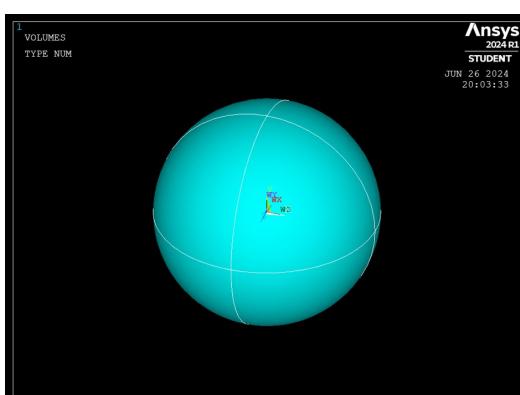
En esta ventana desplaza el deslizador que aparece en el centro de la ventana hacia la izquierda, hasta que el número que aparece encima de éste cambie a 90. Este número indica los grados que el plano de trabajo girará respecto a los ejes. El sentido de giro del plano de trabajo se selecciona con los botones grises arriba del deslizador que tienen una flecha curva. Para acomodar el plano de trabajo para el siguiente corte, presiona el botón de giro en sentido antihorario alrededor de Y, para que el plano XY quede alineado

perpendicularmente al plano que marcó la división anterior, como se muestra en la siguiente figura:

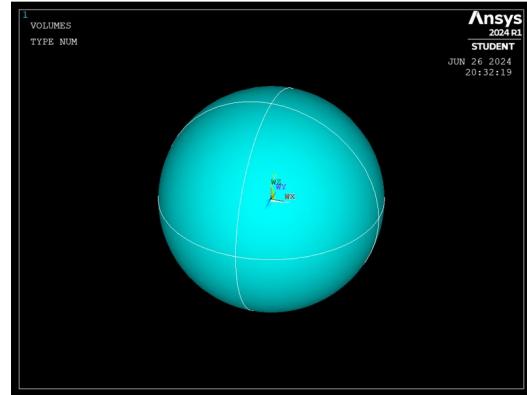


Aunque parezca que ya se realizaron dos cortes en la esfera y está dividida en 4 partes, solamente tiene un corte (el corte vertical de la figura anterior).

13. Hecho lo anterior repite el paso 11, aunque en este caso selecciona los dos volúmenes de la esfera resultantes del corte anterior, y la esfera quedará dividida en cuatro partes, como se muestra en la siguiente figura:

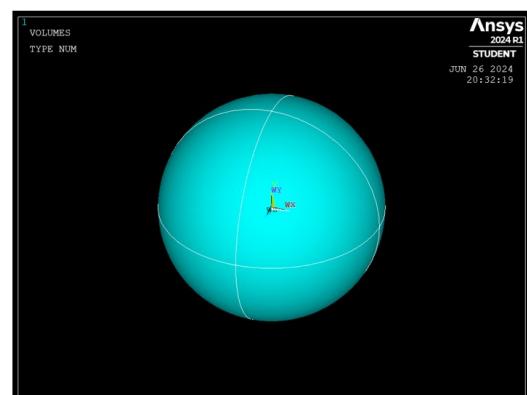


14. Posteriormente, repite el paso 12 girando en esta ocasión el plano de trabajo en sentido horario respecto al eje X y después en sentido horario respecto al eje Z. Luego repite el paso 11 seleccionando esta vez los cuatro volúmenes de la esfera resultantes del corte anterior, y la esfera quedará dividida en ocho partes, como se muestra en la siguiente figura:

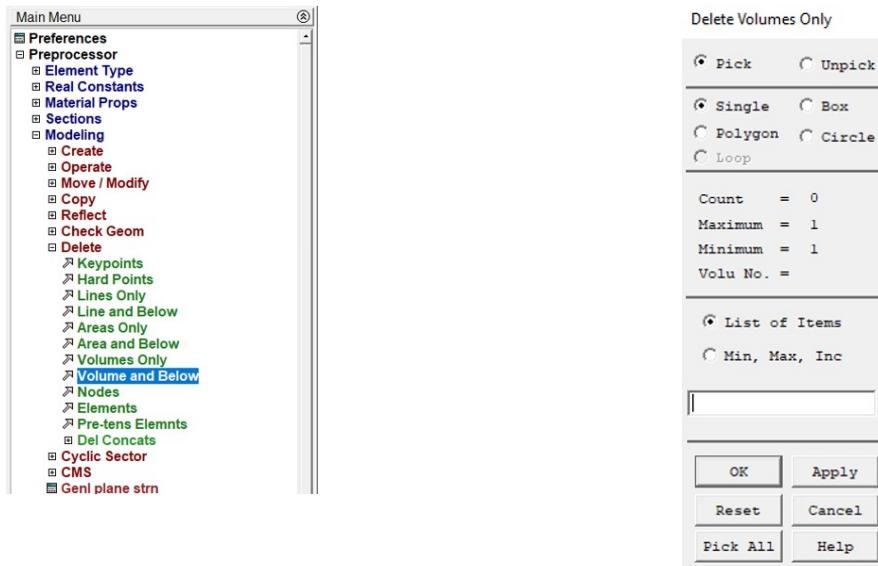


Ahora, alinea nuevamente el plano de trabajo con sus ejes correspondientes. Para ello, dirígete a la barra de herramientas que se encuentra en la parte superior de la ventana, selecciona la opción “**WorkPlane**” en el cual se desplegará una lista de opciones. De esta lista, selecciona la opción “**Offset WP by increments**”.

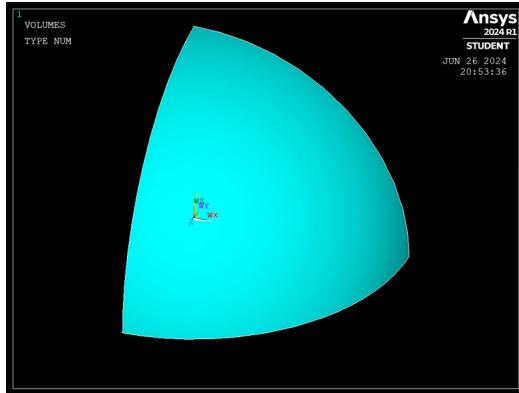
En este caso, primero presiona el botón de giro en sentido antihorario alrededor de X para que el plano de trabajo XYZ quede alineado con los ejes XYZ originales, tal como se muestra en la siguiente figura:



15. Ahora es necesario eliminar 7 de las 8 partes de la esfera. Para ello, en el menú principal abre el árbol de opciones “**Preprocessor**”. A continuación, abre el árbol de opciones “**Modeling**”. Por último, abre el árbol de opciones “**Delete**”, selecciona la opción “**Volume and Below**” y has clic izquierdo sobre ella.

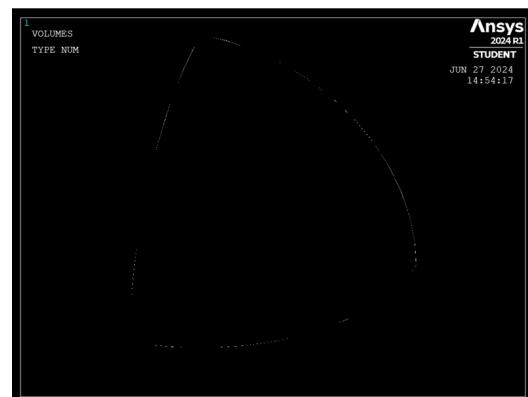


Hecho lo anterior, aparecerá la ventana “**Delete Volume and Below**” y el cursor cambiará de forma, indicando que se deben seleccionar los volúmenes que se desean eliminar. En este caso selecciona 7 de las 8 partes en las que se dividió la esfera y presiona el botón “OK”. Entonces la esfera quedará de la siguiente manera.

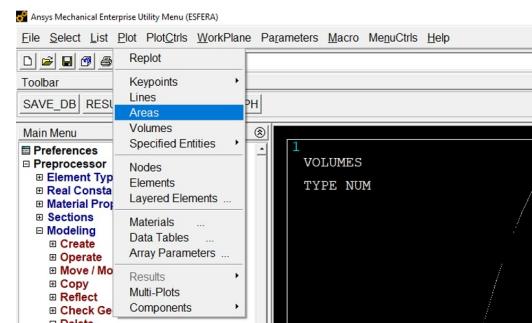


16. Como siguiente paso, debido a que sólo se requiere el área exterior del octavo de esfera, es necesario eliminar el volumen y las áreas que no son de interés para el análisis. Para eliminar el volumen, primero abre el árbol de opciones “**Preprocessor**” en el menú principal. Despues, abre el árbol de opciones “**Modeling**”. Por último, abre el árbol de opciones “**Delete**” y selecciona la opción “**Volume only**”. Hecho lo anterior, aparecerá la ventana “**Delete Volumes Only**” y el cursor cambiará de forma, indicando que se debe seleccionar el volumen que se desea eliminar.

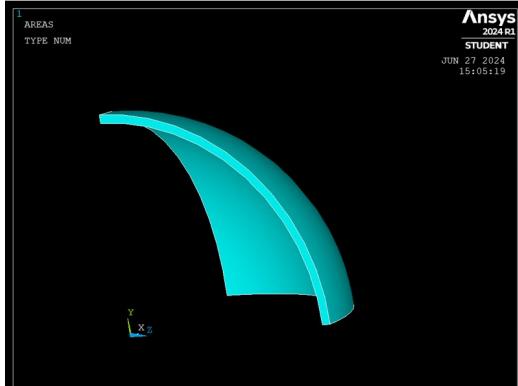
Selecciona el octavo de la esfera restante y presiona el botón “OK”. Hecho esto la pantalla aparecerá vacía, tal como se muestra en la siguiente figura:



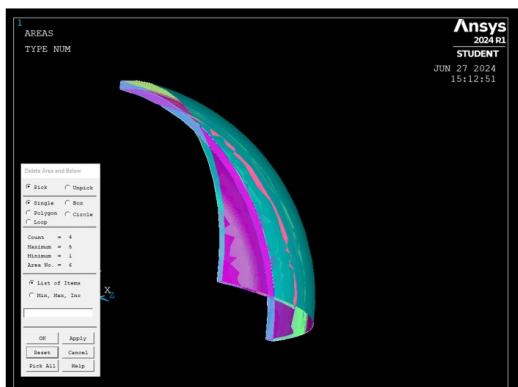
Posteriormente, debes graficar nuevamente las áreas del modelo, ya que dichas áreas aún se conservan, pues lo único que se borró en el paso anterior fue el volumen como tal. Para ello, en la barra de herramientas que se encuentra en la parte superior de la ventana, selecciona la opción **Plot**, hecho esto se desplegará una lista de opciones. De esta lista selecciona la opción “**Areas**”.



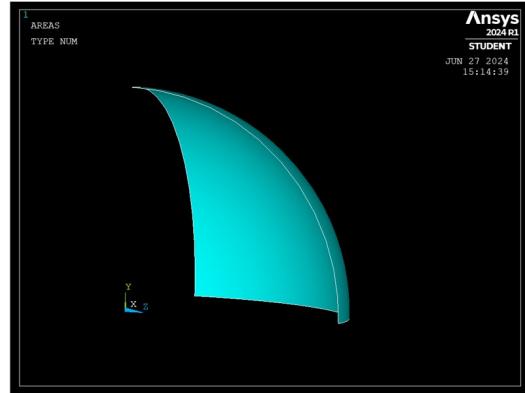
Una vez hecho lo anterior, se volverán a mostrar las caras del octavo de esfera restante.



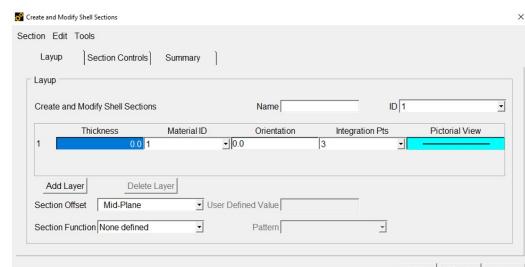
17. A continuación, debes eliminar las áreas que no son de interés en el modelo. Para ello, en el menú principal abre el árbol de opciones “**Preprocessor**”, después abre el árbol de opciones “**Modeling**”, y por último abre el árbol de opciones “**Delete**”. Selecciona la opción “**Area and below**” presionando el clic izquierdo sobre ella. Hecho esto, aparecerá la ventana “**Delete Area and Below**” y el cursor cambiará de forma, indicando que se deben seleccionar las áreas que se desean eliminar. Para ello, selecciona todas las áreas a excepción de la cara exterior de la esfera, tal como se muestra en la siguiente figura:



Hecho lo anterior, presiona “**OK**” y las áreas seleccionadas se eliminarán.

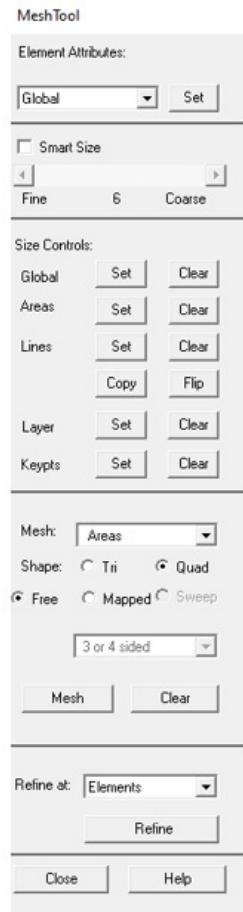


18. A continuación, es necesario establecer el espesor de las secciones **Shell**, en este caso es el mismo espesor de la pared de la esfera, 10 mm. Para ello, primero abre el árbol de opciones “**Preprocessor**” del **Menú Principal**. Despues, abre el árbol de opciones “**Sections**”. Posteriormente, abre el árbol de opciones “**Shell**”. Finalmente abre el árbol de opciones “**Lay-up**” y selecciona la opción “**Add/Edit**” presionando el clic izquierdo sobre ella. Entonces aparecerá la siguiente ventana.



En esta ventana, dirígete al apartado “**Thickness**” y coloca 10. Posteriormente, dirígete a la lista de opciones del apartado “**Section Offset**” y selecciona la opción “**Top-Plane**”, para indicar que el espesor se agrega desde una cara exterior. Finalmente, presiona el botón “**OK**” que aparece en la parte inferior derecha de la ventana.

19. Como siguiente paso, debes definir el tamaño de los elementos que se encontraran a lo largo del recipiente. Para ello, en el menú principal, dirígete al árbol de opciones “**Preprocessor**” y abre el árbol de opciones “**Meshing**”, dentro de este selecciona la opción “**Mesh Tool**” colocando el cursor y haciendo clic izquierdo sobre ella. Hecho esto se abrirá una ventana como se muestra en la siguiente figura:

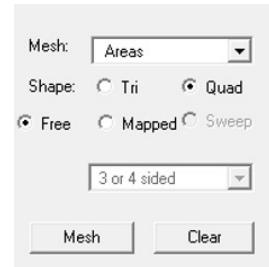


Ahora, dirígete al apartado “**Size Controls**” y selecciona “**Global**”, presiona la opción “**Set**”. Hecho esto aparecerá una nueva ventana, como la que se muestra a continuación:



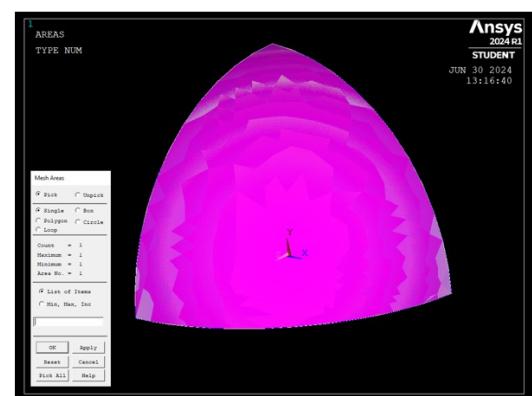
Una vez aparezca esta ventana, dirígete al apartado “**SIZE**” y en el cuadro de entrada de texto coloca la longitud del borde del elemento que consideres conveniente para tu mallado (la longitud la debes de colocar en unidades de distancia coherentes con las unidades que hayas definido la geometría de la figura), teniendo en cuenta que entre más pequeño sea el tamaño más fina será la malla y más precisos serán los resultados, aunque también más tardado será el cálculo. Para este caso colocaremos un tamaño de 7, para obtener aproximadamente 58 elementos en los bordes de nuestra malla. Finalmente, presiona “**OK**” en la ventana “**Global Element Sizes**”. Con esta acción, esta

ventana se cerrará y solamente quedará abierta la ventana de “**Mesh Tool**”. Sobre ella, dirígete al cuadro de opciones “**Size Controls**”, como se muestra en la siguiente figura:

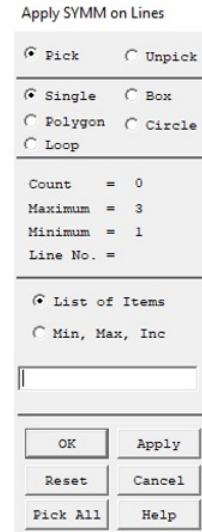
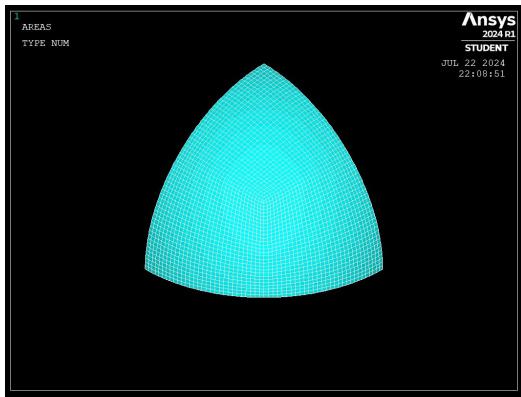


En caso de que la ventana no sea igual a la imagen anterior, se deben seleccionar las opciones que se muestran en la imagen anterior, a excepción de la opción “**Free**”, en lugar de ella selecciona la opción “**Mapped**”. Hecho esto la herramienta de mallar estará lista para realizar el mallado.

20. Dentro de la ventana del “**Mesh Tool**”, dirígete al cuadro de opciones “**Size Controls**” y presiona el botón “**Mesh**”. Hecho esto, aparecerá la ventana “**Mesh Areas**” y el cursor cambiará de forma, indicando que debes seleccionar las áreas que deseas mallar. Entonces, selecciona el área de la octava parte de la esfera, tal como se muestra en la siguiente figura:



Finalmente, presiona el botón “**OK**” y se cerrará la ventana “**Mesh Areas**” a la par que se realiza el mallado sobre el área, como se muestra en la siguiente figura:



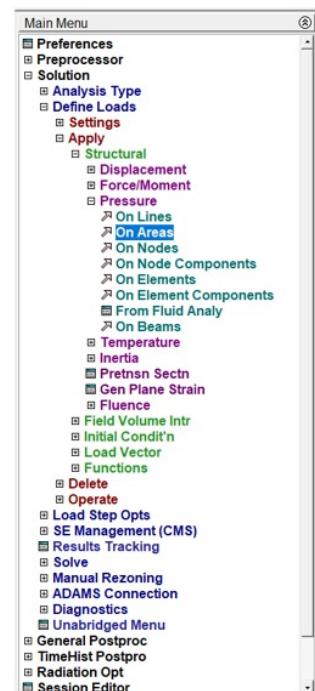
21. Como siguiente paso, es necesario restringir el área. Para ello, primero desde el menú principal abre el árbol de opciones “**Solution**”.Después abre el árbol de opciones “**Define loads**”.Enseguida, abre el árbol de opciones “**Apply**”. Posteriormente abre el árbol de opciones “**Structural**”. A continuación, abre el árbol de opciones “**Displacement**”. Finalmente, abre el árbol de opciones “**Symmetry B.C.**” y selecciona la opción “**On Lines**” haciendo clic izquierdo sobre ella.

Una vez aparezca la ventana de la figura anterior, en la parte inferior presiona el botón “**Pick All**” para seleccionar todas las líneas del área y aplicar sobre ellas las restricciones.

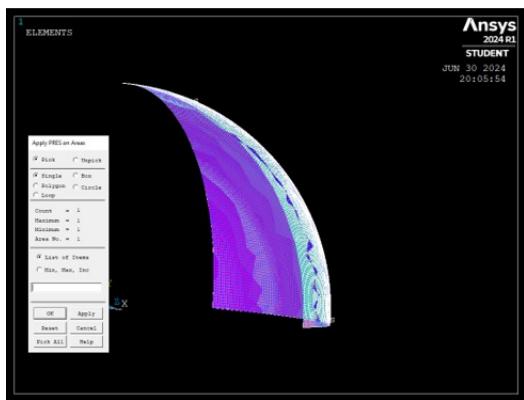
22. Ahora que está restringido el modelo, debes agregar la presión que actúa sobre este. Para ello, primero desde el menú principal abre el árbol de opciones “**Solution**”. Despues, abre el árbol de opciones “**Define loads**”. Enseguida, abre el árbol de opciones “**Apply**”. Posteriormente, abre el árbol de opciones “**Structural**”. Finalmente, abre el árbol de opciones “**Pressure**” y selecciona la opción “**On Areas**” haciendo clic izquierdo sobre ella.



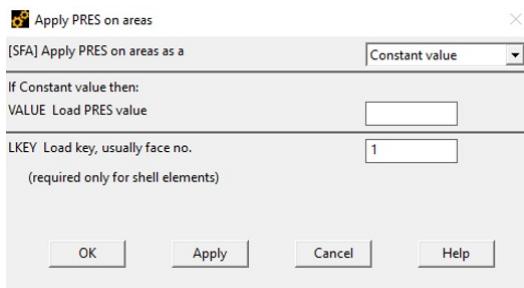
Hecho lo anterior se abrirá una ventana con el nombre “**Apply SYMM on lines**”. Tal como se muestra en la siguiente figura:



Hecho esto, aparecerá la ventana “**Apply PRES on Areas**” y el cursor cambiará de forma, indicando que debes seleccionar las áreas a las cuales es necesario aplicar una presión. Entonces, selecciona el área restante de la esfera, tal como se muestra en la siguiente figura:

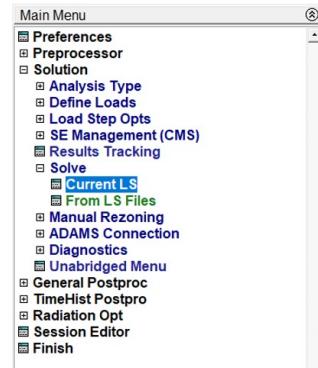


A continuación, presiona el botón “**OK**”, y la ventana “**Apply PRESS on Area**” se cerrará a la par de que se abrirá otra ventana donde debes colocar el valor de la presión deseada.

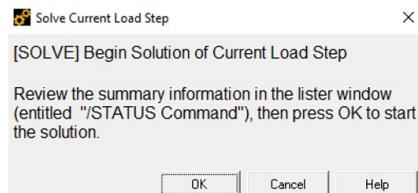


En el cuadro de entrada de texto correspondiente a “**VALUE**” coloca el valor de la presión que será aplicada sobre el área. En este caso corresponde a 3.5143 MPa, por lo que directamente se introduce 3.5143 (esta presión se aplicará de adentro hacia afuera de la esfera, en caso de querer invertir el sentido simplemente se le agrega el signo negativo a la magnitud). Finalmente, presiona el botón “**OK**” que se encuentra en la parte inferior de la ventana.

23. Ahora, para resolver el modelo con la presión aplicada dirígete al menú principal y abre el árbol de opciones “**Solution**”. A continuación, abre el árbol de opciones **Solve**” y selecciona la opción “**Current LS**” haciendo clic izquierdo sobre ella.



Hecho lo anterior, se abrirá la siguiente ventana:

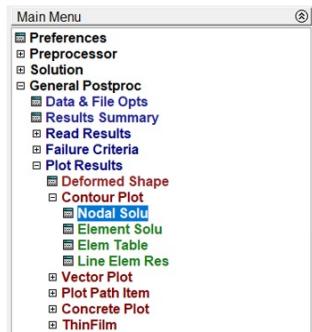


Para comenzar a resolver, presiona el botón “**OK**”. Dependiendo del mallado y del procesador de tu computadora, la obtención de la solución puede tardar poco o mucho tiempo. Una vez que tu computadora termine de resolver todos los cálculos, se mostrará en pantalla la siguiente ventana, la cual indica que los procesos de cálculo han finalizado.

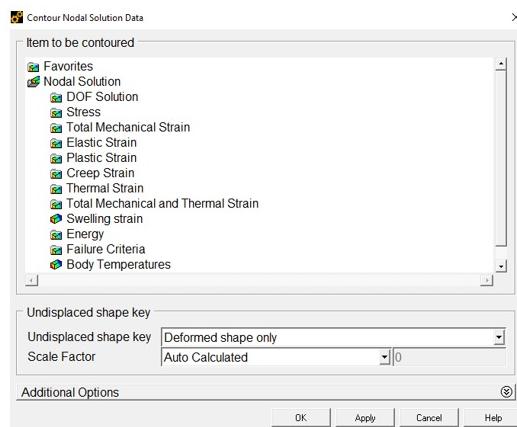


En esta ventana, solamente selecciona el botón “**Close**”.

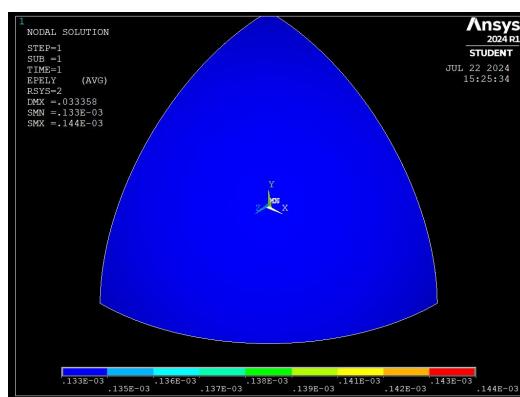
24. Finalmente, para comparar los resultados obtenidos con el modelo y los resultados teóricos obtenidos, debes graficar la deformación en el eje Y o eje Z (Como la geometría corresponde a una esfera será igual en ambos casos). Para ello, en el menú principal abre el árbol de opciones “**General Postproc**”, después abre el árbol de opciones “**Plot Results**”. Finalmente abre el árbol de opciones “**Contour Plot**” y selecciona la opción “**Nodal Solu**”.



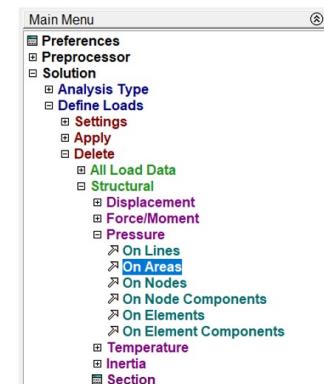
Hecho lo anterior, se abrirá la ventana “**Countour Nodal Solution Data**” donde podrás visualizar los diferentes contornos que puede arrojar el programa. En este caso, abre la carpeta “**Elastic Strain**” y dentro de ella has clic izquierdo sobre la opción “**Y-Component of elastic strain**”. Finalmente, presiona el botón “**OK**” de la parte inferior de la ventana y en el cuadro de entrada de texto “**Command Prompt**” introduce el comando “**RSYS,2**” para cambiar el sistema coordenado a sistema esférico. Lo anterior tiene como objetivo graficar los esfuerzos en el plano de la esfera.



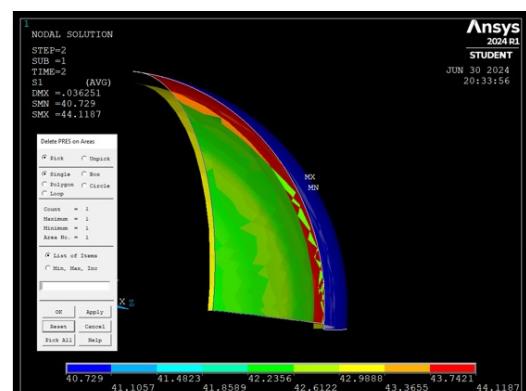
Posteriormente, se mostrará el siguiente contorno, en el cual podás comparar los resultados numéricos con los resultados teóricos obtenidos.



25. Para cambiar la presión aplicada sobre el área y obtener la presión del inciso b del ejercicio (véase el enunciado del problema), primero debes borrar la presión que ya está aplicada sobre el área. Para ello, inicialmente dirígete al menú principal. Despues, abre el árbol de opciones “**Solution**”. Posteriormente, abre el árbol de opciones “**Define Loads**”. Enseguida, abre el árbol de opciones “**Delete**”. A continuación, abre el árbol de opciones “**Structural**”. Luego, abre el árbol de opciones “**Pressure**” y selecciona la opción “**On Areas**” haciendo clic izquierdo sobre ella.

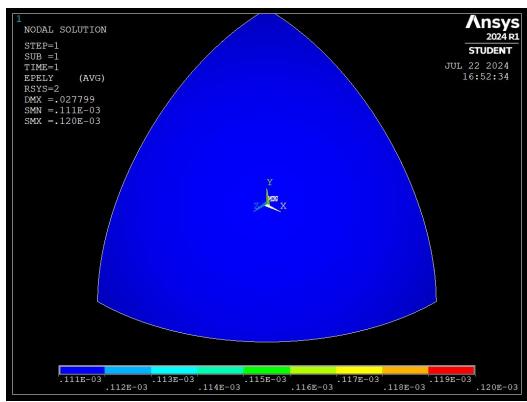


Hecho lo anterior, aparecerá la ventana “**Delete PRES on Areas**” y el cursor cambiará de forma, indicando que debes seleccionar las áreas a las cuales es necesario aplicar una presión. Entonces, selecciona el área restante de la esfera, tal como se muestra en la siguiente figura:



Finalmente, presiona el botón “**OK**” y con ello, se habrá borrado la presión que estaba aplicada sobre el área.

26. Por último, repite del paso 21 al 24 para obtener una nueva solución, con la excepción de cambiar el valor de la presión introducida en el punto 22 a 2.9286 MPa. Así, obtendrás el siguiente contorno para la deformación sobre el plano:



Referencias

- [1] J. M. Gere, B. J. Goodno, Mecánica de materiales, 8th Edition, Cengage Learning, México, 2013.