



**MASTER EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
Y DE LA CONSTRUCCIÓN**

Ingeniería de Estructuras

Trabajo Final basado en Método de elementos Finitos (MEF)

JOSE GUILLERMO CARDENAS FERNANDEZ

Barcelona, Junio de 2015

Tabla de contenido

1.	INTRODUCCIÓN	3
2.	OBJETIVO	3
2.1	Objetivos específicos.....	3
3.	PANTEON DE AGRIPA (L-37)	3
3.1	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
3.2	SOLUCIÓN DEL PROBLEMA	4
3.3	PREPROCESO.....	4
3.3.1	DATOS DE ANALISIS	4
3.3.2	GEOMETRIA.....	5
3.3.3	CONDICIONES DE CONTORNO	6
3.3.4	DEFINICIÓN DE MATERIAL	6
3.3.5	CARGAS.....	7
3.3.6	GENERACIÓN DE MALLA	7
3.4	POST-PROCESO	8
4.	PUENTE EN ARCO DE HORMIGÓN (L46).....	10
4.1	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	10
4.2	SOLUCIÓN DEL PROBLEMA	11
4.3	PREPROCESO.....	11
4.3.1	DATOS DE ANALISIS	11
4.3.2	GEOMETRIA.....	11
4.3.3	CONDICIONES DE CONTORNO	12
4.3.4	DEFINICIÓN DE MATERIAL	12
4.3.5	CARGAS.....	13
4.3.6	ANALISIS DE CONVERGENCIA.....	13
4.4	POSTPROCESO	16
4.4.1	ANALISIS.....	16

1. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo contiene el desarrollo de dos problemas típicos de ingeniería, donde el uso del método de elementos finitos, mediante herramientas de informática, nos facilita el análisis y la posible solución de acuerdo a unas condiciones de contorno y solicitaciones dadas mediante el análisis de las deformaciones y tensiones de cada una de las estructuras.

2. OBJETIVO

Desarrollar el conocimiento y la práctica en el análisis y diseño de estructuras, utilizando Métodos de elementos Finitos.

2.1 Objetivos específicos

- Analizar el estado tensional de las estructuras típicas de la ingeniería civil.
- Analizar una cúpula tridimensional mediante el método de elementos finitos más conveniente para determinar el coeficiente de seguridad empleado para construir la estructura teniendo en cuenta solo su peso propio.
- Analizar el estado tensional de un puente con sección transversal en cajón para determinar la carga máxima uniformemente repartida que es capaz de soportar, adicional a su peso propio.

3. PANTEON DE AGRIPA (L-37)

3.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La figura 1, representa aproximadamente el panteón de Agripa. Calcule el estado tensional y el coeficiente de seguridad que tiene la estructura ante el peso propio.

- 1) Las tracciones máximas en cualquier punto de la de estructura no deben superar los 1.8 MPa.
- 2) Las compresiones máximas en cualquier punto de la chapa no deben superar los 70 MPa.
- 3) La base de la estructura se considera empotrada.
- 4) Las propiedades mecánicas del edificio son: $E = 15.7 \text{ KN/mm}^2$; $\nu = 0.18$.
- 5) El peso específico del material es de: 1200 Kg/m^3 .

Cargas actuantes:

a) Peso propio

Las dimensiones de la torre en m:

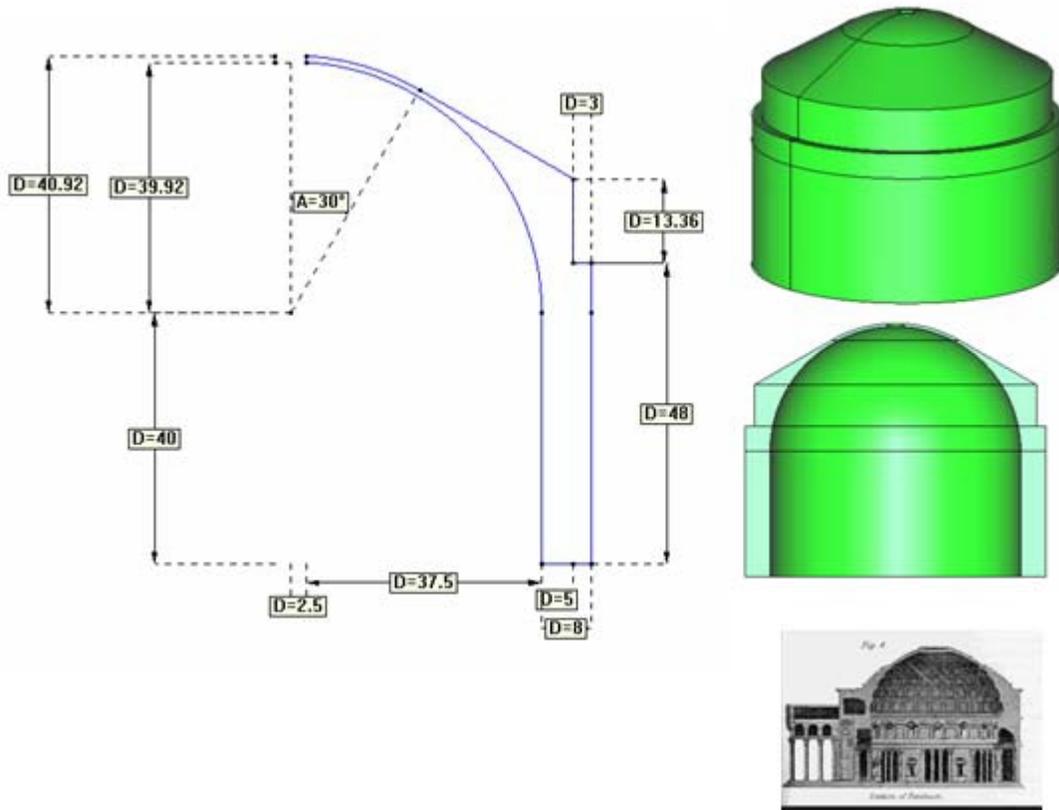


Figura 1. Representación gráfica y medidas del panteón.

3.2 SOLUCIÓN DEL PROBLEMA

El ejercicio se analizará como un sólido de revolución debido a que las cargas actuantes sobre la superficie del elemento (que en este caso será solo el peso propio) y su geometría se mantienen uniformes e invariables alrededor de un eje central. Se ha optado analizarlo con un sólido de revolución y no mediante láminas de revolución debido a que si se observa un corte de la estructura (Fig. 1), esta tiene una geometría muy variable en el plano bidimensional.

3.3 PREPROCESO

3.3.1 DATOS DE ANALISIS

Inicialmente se define el tipo de problema a resolver. En este caso se trata de un sólido de revolución, por lo que se especifica en el programa de cálculo RamSeries, así el programa proporciona la barra de herramientas necesaria para poder aplicar las cargas, las condiciones de contorno y poder generar la malla.

3.3.2 GEOMETRIA

Se introduce la geometría en el preproceso del programa, por medio de las herramientas de dibujo, de acuerdo con las medidas proporcionadas, inicialmente generamos la figura en dos dimensiones trabajando sobre el plano XY, posteriormente se genera un cuarto de la superficie de la estructura por medio de revolución a 90° , de esta forma trabajamos el modelo de forma simétrica.

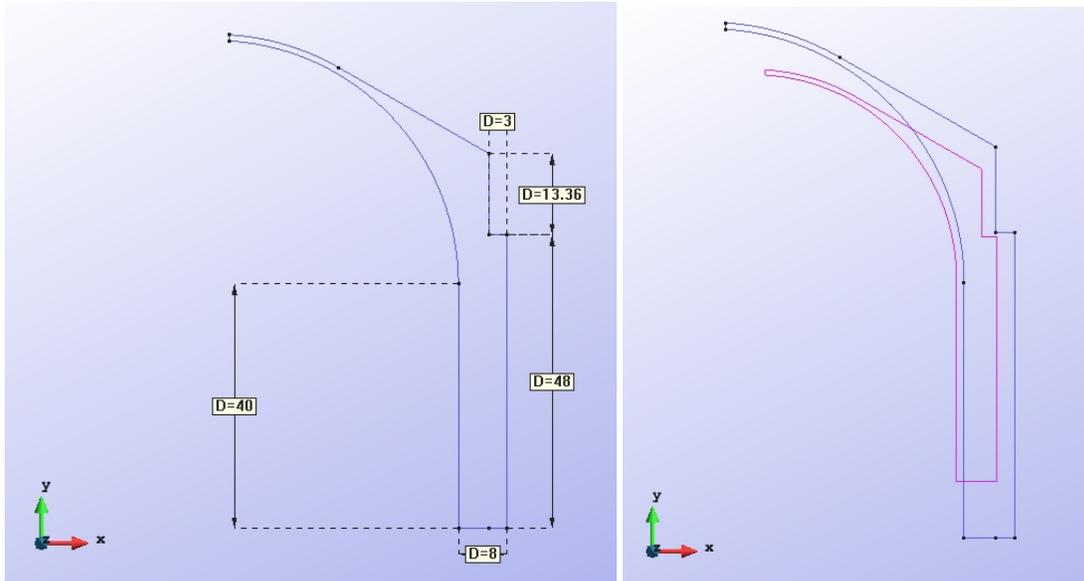


Figura 2. Geometría bidimensional en el plano XY de la estructura.

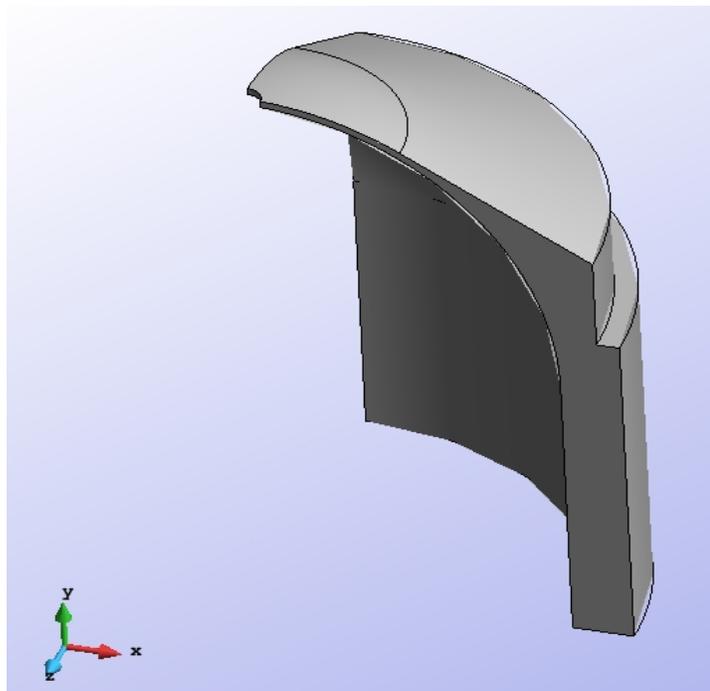


Figura 3. Geometría tridimensional de la estructura.

3.3.3 CONDICIONES DE CONTORNO

Planteamos las condiciones de contorno de acuerdo a las condiciones reales de la estructura, en este caso consideramos la base de la estructura empotrada.

Adicional a esta condición, debemos asignar la restricción de desplazamiento y giros en el sentido ortogonal a la sección de corte del panteón, ya que analizaremos solo un trozo de la estructura a 90° de revolución, asumiendo la condición de un sólido de revolución donde las cargas y geometría se mantienen constantes alrededor de un eje (en este caso el eje y); para generar esta condición restringimos los desplazamientos en cada extremo y el giro como se muestra en las figuras presentadas a continuación:

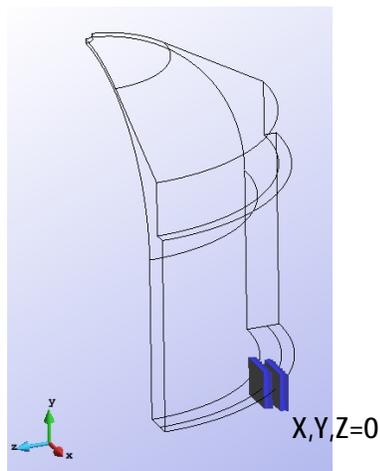


Figura 4. Restricción de base del modelo $X,Y,Z=0$

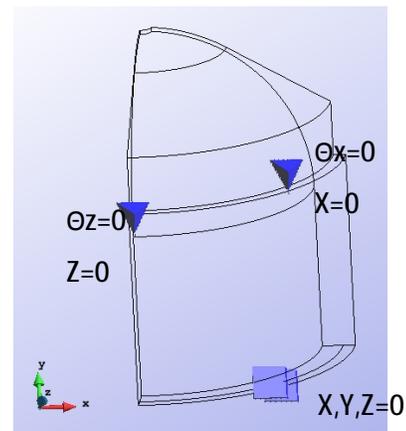


Figura 5. Restricción de líneas de simetría

3.3.4 DEFINICIÓN DE MATERIAL

Se define para el modelo las propiedades asignadas en la formulación del problema, para este caso toda la estructura es en un hormigón especial con las siguientes propiedades, las cuales son definidas en el programa, creando un nuevo material con propiedades de sólido Isotrópico:

$E=15.7 \text{ kN/mm}^2$	Modulo de elasticidad
$\nu= 0.18$	coeficiente de Poisson
$\gamma=1200 \text{ Kg/m}^3 \rightarrow 11768\text{N/m}^3$	Peso específico del concreto.

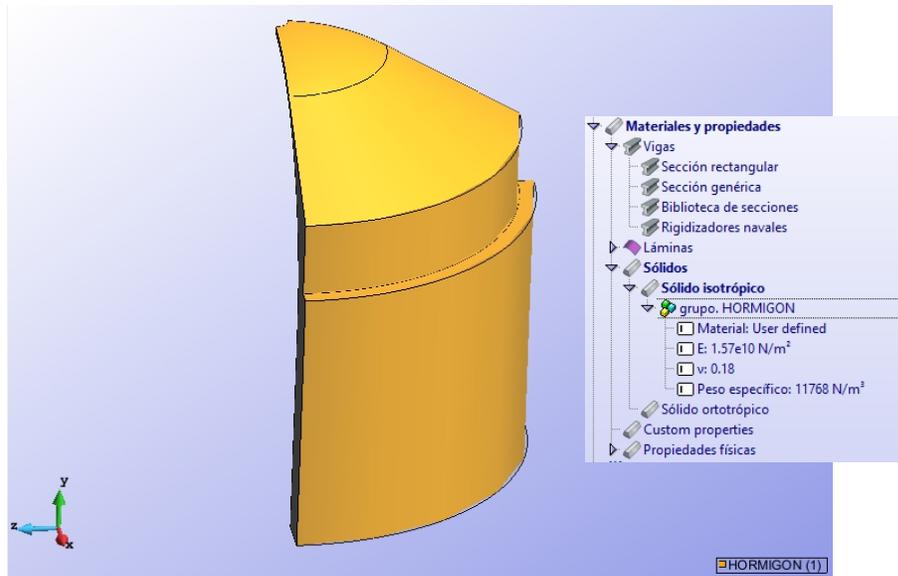


Figura 6. Asignación de propiedades del material.

3.3.5 CARGAS

Se asignan cargas al modelo computacional, para este caso las únicas cargas actuantes en el planteamiento del problema es el peso propio, se introduce la carga de diseño en el programa RamSeries:

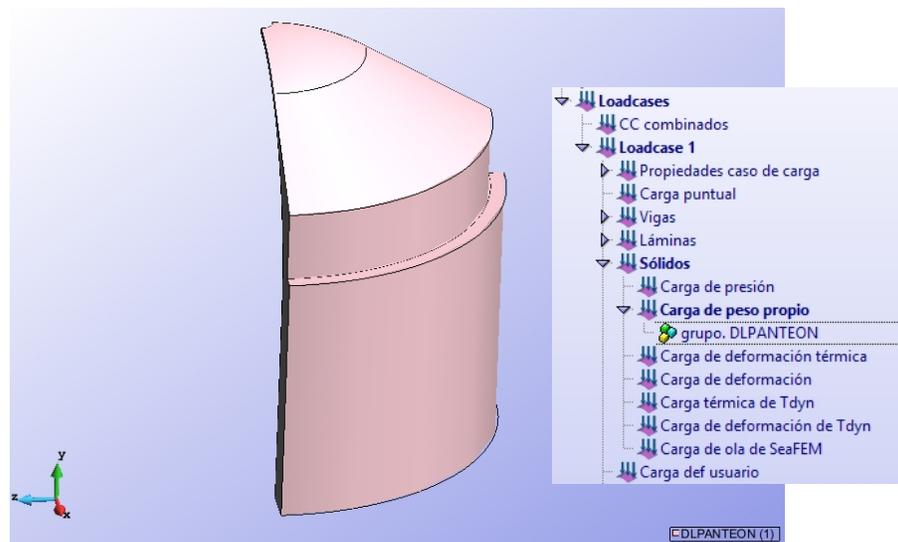


Figura 7. Asignación de carga a modelo, Peso propio.

3.3.6 GENERACIÓN DE MALLA.

Para el análisis de este ejercicio se generó una malla con elementos triangulares de tipo TDK, se realizaron varios refinamientos de malla en los que tardaba mucho tiempo la etapa de cálculo

por ser un elemento solido tridimensional, finalmente se decidio trabajar con el refinamiento de malla que daba un tiempo de espera para el cálculo razonable que fue de 5m, que generaba un total de 8900 nodos.

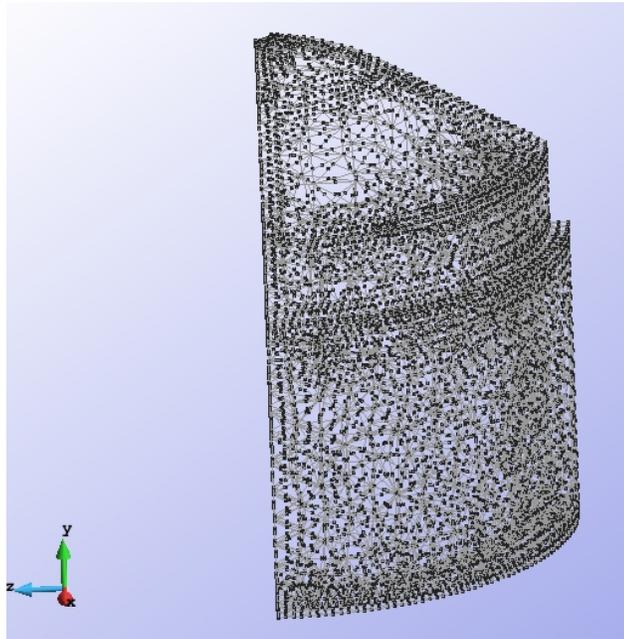


Figura 8. Malla DKT 3N, refinamiento 5m.

3.4 POST-PROCESO

Para realizar el analisis de los estados tensionales del panteón se modelo la estructura de acuerdo con la geometría aproximada real y se comparó con el modelo aumentando el espesor de la chapa superior iterando valores hasta obtener los esfuerzos máximos permitidos, los resultados de dicho análisis se presentan a continuación:

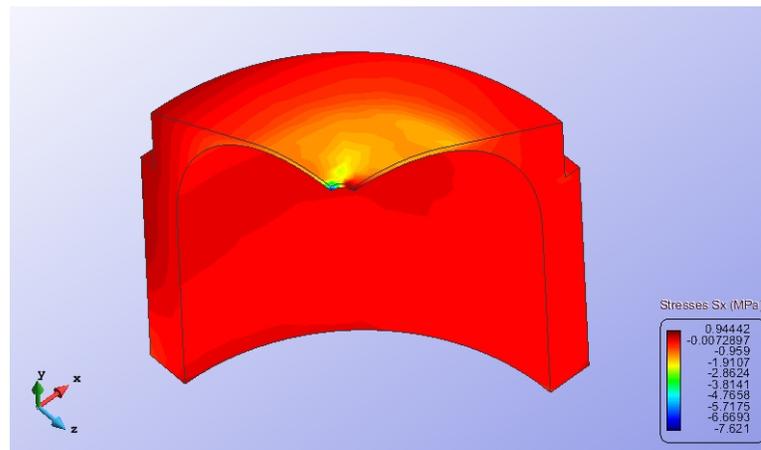


Figura 9. Esfuerzos con respecto al eje X, geometría original.

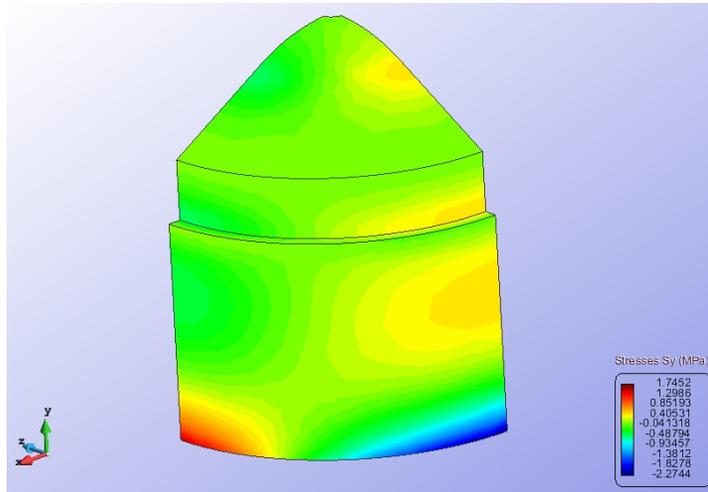


Figura 10. Esfuerzos con respecto al eje Y, geometría original.

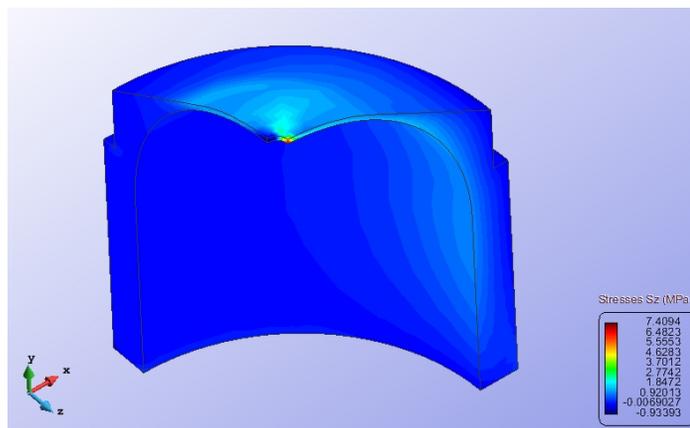


FIGURA 11. Esfuerzos con respecto al eje Z, geometría original.

Después de realizar el tanteo se determinó el coeficiente de seguridad con el cual fue diseñado implícitamente el panteón, a continuación se presentan los resultados:

	Tension maxima Estado Real (Mpa)	Tension permitida (Mpa)	Coef. Seguridad
Esfuerzos de traccion	0.93	1.8	1.935483871
Esfuerzos de compresion	7.62	70	9.186351706

Tabla 1. Calculo del estado tensional y coeficiente de seguridad para el panteón.

4. PUENTE EN ARCO DE HORMIGÓN (L46)

4.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La figura 12 representa un puente circular realizado mediante cajones con losas planas de hormigón armado bajo una carga vertical uniformemente repartida. Calcular la carga máxima uniformemente repartida que es capaz de soportar con las restricciones que se indican.

- 1) Las tracciones máximas en cualquier punto de la estructura no deben superar 400 MPa
- 2) Las compresiones máximas en cualquier punto de la estructura no deben superar los 500 Mpa.
- 3) Ambos extremos del puente se encuentran empotrados.
- 4) El espesor de todas las chapas es de 0.40 m excepto el alma central que es de 0.30 m

Cargas actuantes:

- a) Peso propio
- b) Peso propio + carga uniforme.

Las dimensiones en metros del puente son:

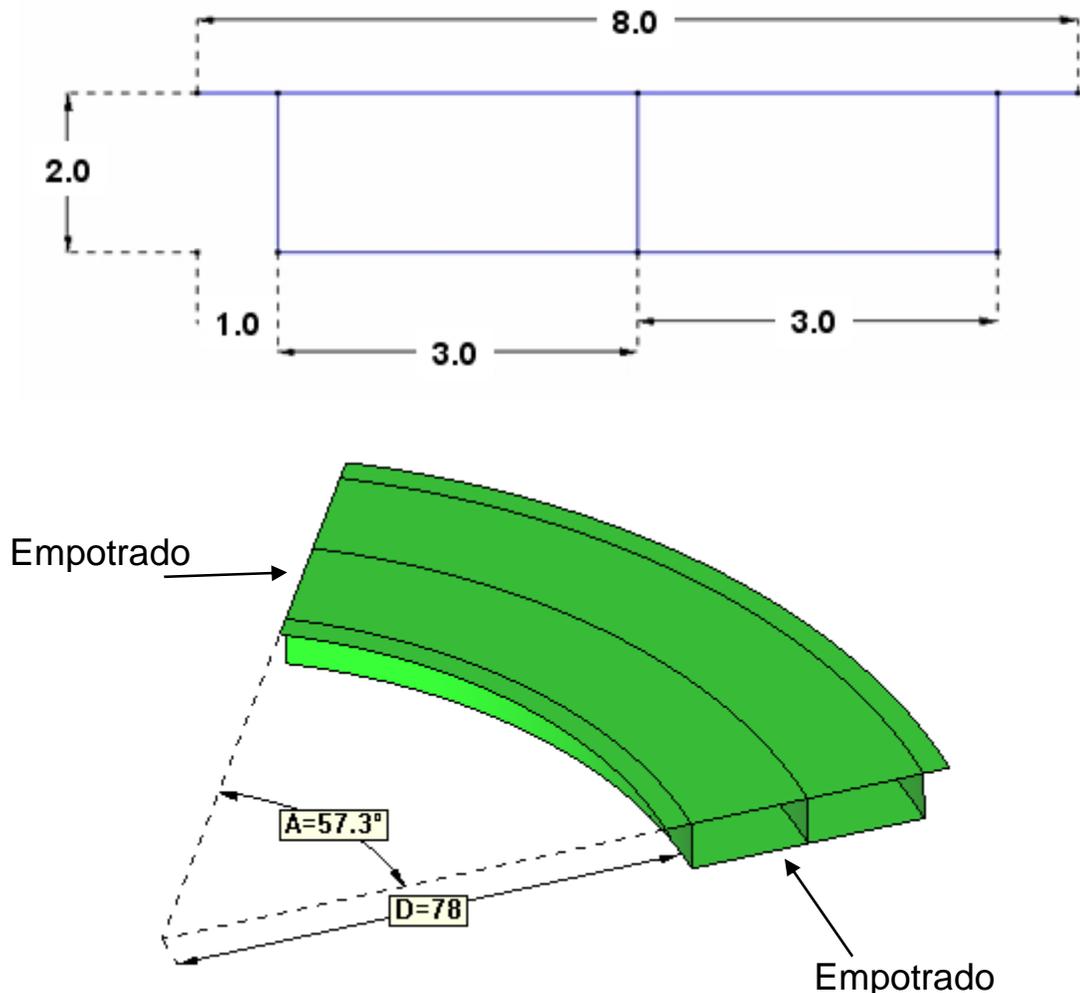


Figura 12. Esquema general y medidas del puente.

4.2 SOLUCIÓN DEL PROBLEMA

Este ejercicio se analizara como un problema de láminas, ya que el puente con secciones en cajón se compone de losas planas de hormigón, las cuales pueden ser representadas por láminas. Toda la simulación se realiza en el programa computacional "RamSeries Professional"

4.3 PREPROCESO

4.3.1 DATOS DE ANALISIS

Inicialmente se define el tipo de problema a resolver. En este caso se trata de un problema tridimensional con láminas.

4.3.2 GEOMETRIA

Para definir la geometría, utilizamos las herramientas de dibujo para crear la sección del puente en cajón de acuerdo con las dimensiones dadas inicialmente, para ello primero creamos la figura en el plano bidimensional y luego hacemos una extrusión para generar el puente tridimensional.

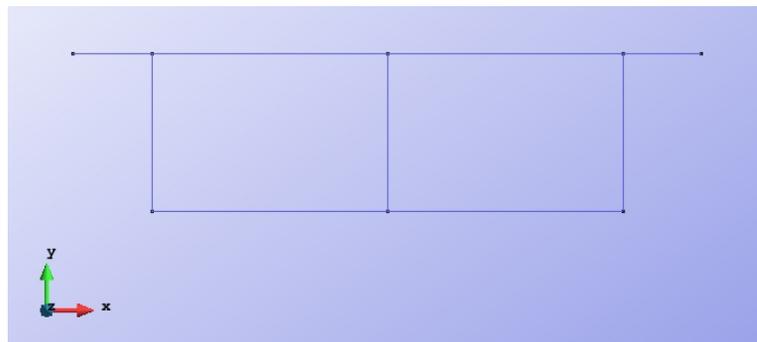


Figura 13. Geometría de cualquier sección transversal del puente.

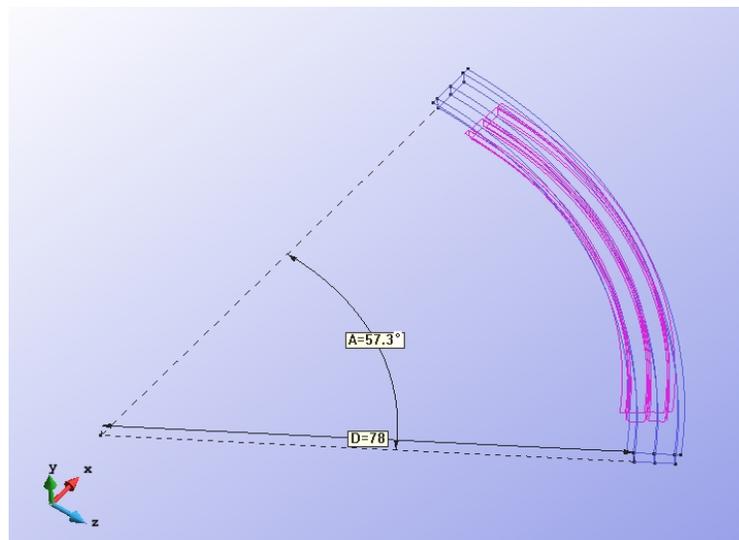


Figura 14. Geometría del puente tridimensional.

4.3.3 CONDICIONES DE CONTORNO

Se definen las condiciones de contorno del puente, el cual estará empotrado en cada extremo, para esto seleccionamos la superficie de cada extremo y restringimos su desplazamiento en el eje ortogonal a su plano.

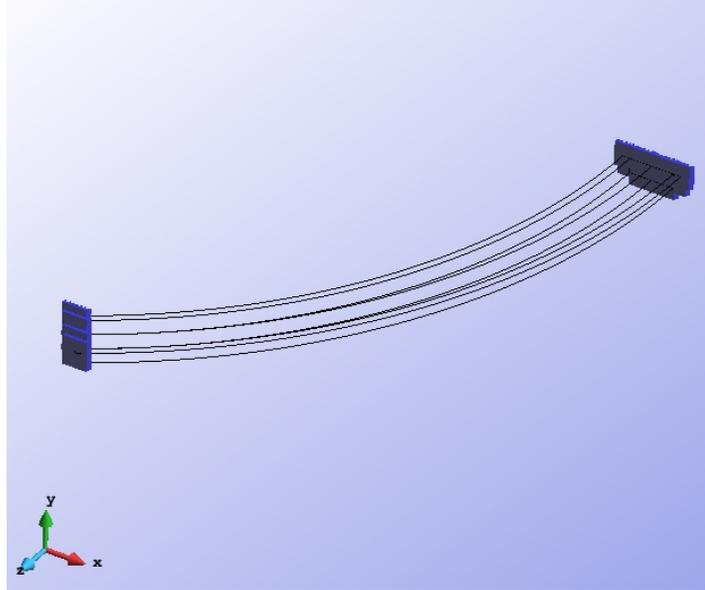


Figura 15. Condición de contorno del puente. Empotramiento en sus extremos.

4.3.4 DEFINICIÓN DE MATERIAL

Definimos los materiales del puente de acuerdo con los parámetros dados al inicio del problema, para esto se introduce las propiedades en el "RamSeries", para este puente creamos laminas de Hormigon tipo HA-30 con dos tipos de espesores: la lamina central con un espesor de 0.3 m, el resto de las laminas con un espesor de 0.4 m.



Figura 16. Definición de materiales para el modelo

4.3.5 CARGAS

Las cargas utilizadas para este ejercicio serán: la carga por el peso propio del puente que se aplica a todos los elementos del puente y una carga adicional distribuida sobre la superficie superior del puente con un valor arbitrario.

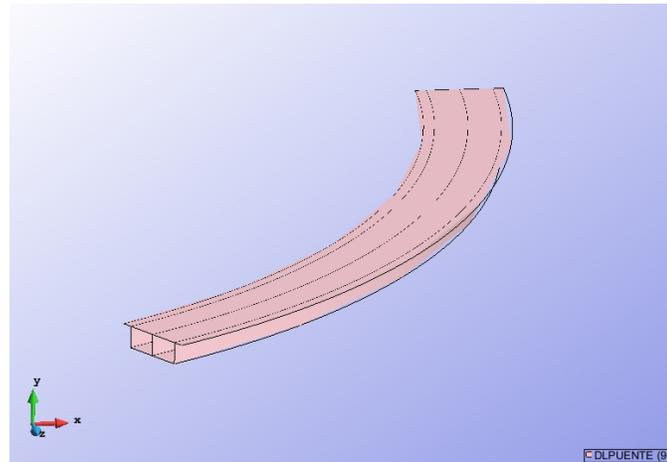


Figura 17. Definición de carga de peso propio en puente.

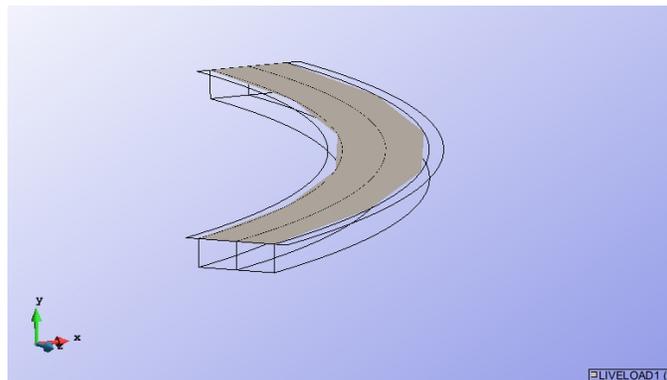


Figura 18. Definición de carga adicional uniforme sobre puente.

4.3.6 ANALISIS DE CONVERGENCIA

Para este ejercicio se hace la escogencia de un tipo un tamaño de malla óptima para garantizar buenos resultados. Se realiza un análisis de convergencia para determinar la escogencia de una malla óptima donde se visualice la convergencia de los resultados de una manera rápida y homogénea.

Basta con realizar un análisis de convergencia a un punto aleatorio del modelo, el cual presente desplazamientos inducidos por las cargas actuantes, esto es debido a que los demás parámetros como esfuerzos y deformaciones dependen de la solución de la matriz global del sistema, específicamente del vector de desplazamientos, generando menos errores en la solución en los resultados.

Para este caso, se realiza un análisis de convergencia asignando varios tipos de mallas para el total del modelo, se obtienen los desplazamientos del punto central del puente que es donde se generan los mayores desplazamientos.

En el análisis de convergencia se estudiaron tres tipologías de mallas no estructuradas, con variación del tamaño de los elementos, el resultado del proceso se indica en la tabla 2:

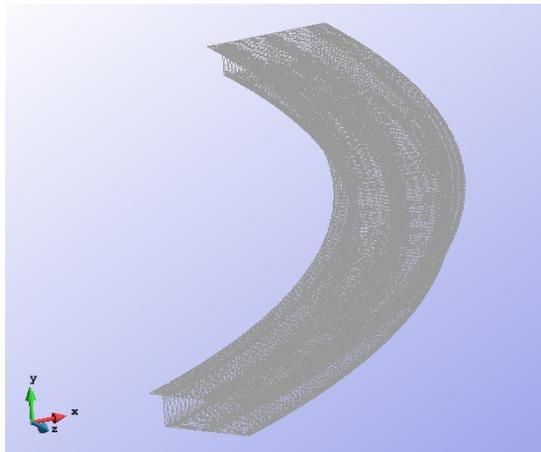


Figura 19. Malla TR 3N – Tamaño de malla a 0.5m

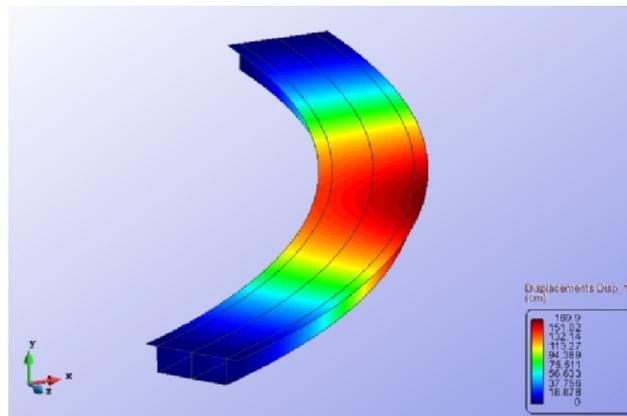


Figura 20. Desplazamientos para refinado de malla 0.5m – 48969 Nodos

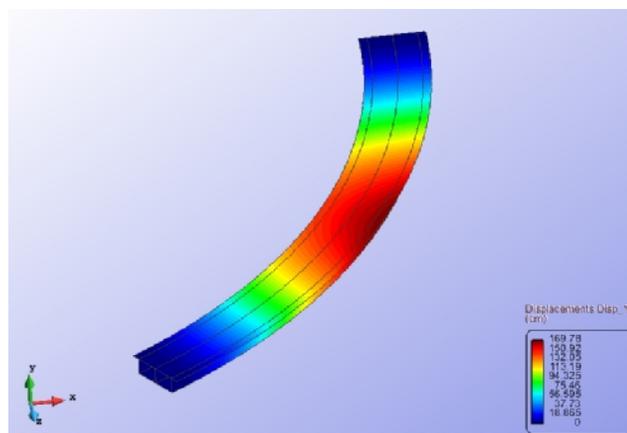


Figura 21. Desplazamientos para refinado de malla 0.5m – 48969 Nodos

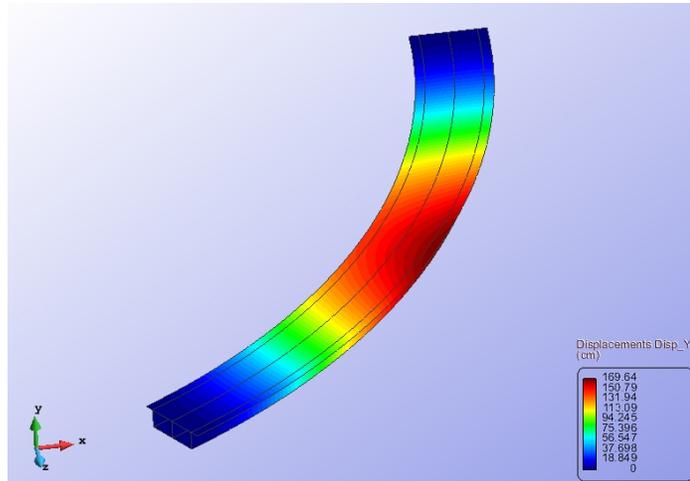


Figura 22. Malla QU 4N

DESPLAZAMIENTO PUNTO CENTRAL VS NUMERO DE NODOS			
	0.5m	1.0m	1.5m
	ΔY_a (m) / #Nodos	ΔY_a (m) / #Nodos	ΔY_a (m) / #Nodos
TR 3N	169.90	169.78	169.64
	48969	16504	8459

Tabla 2. Tabla de resultados de convergencia problema 2

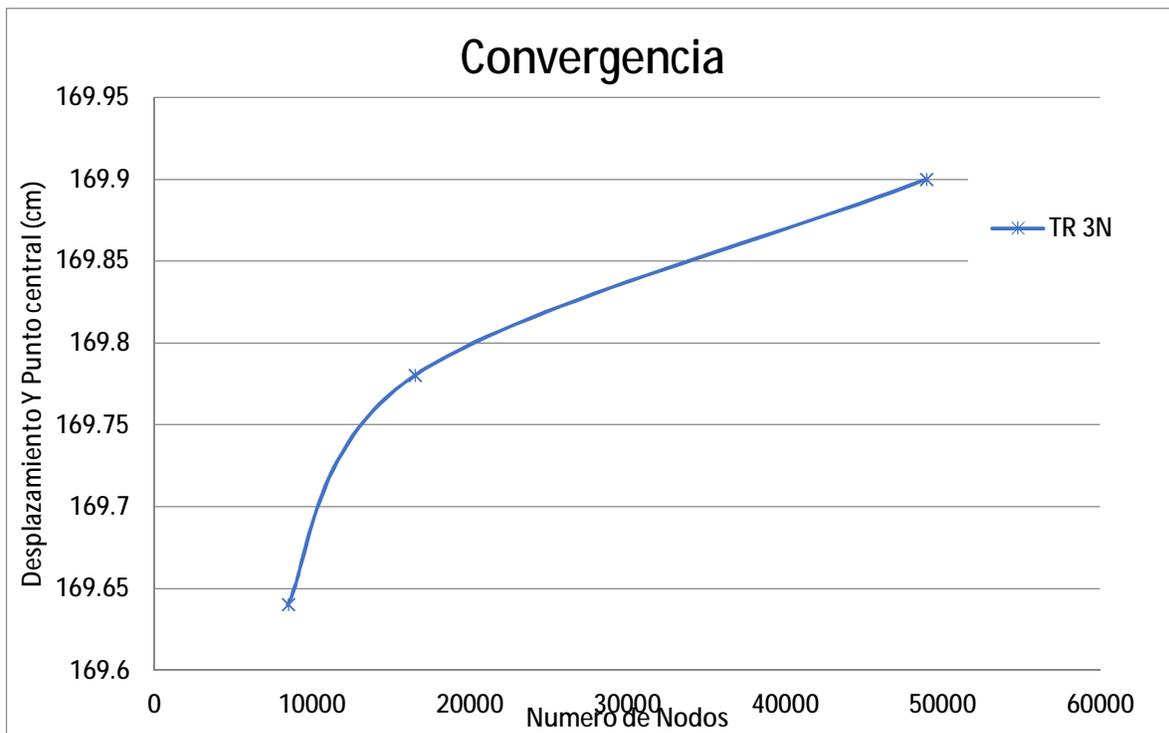


Figura 23. Grafica de convergencia del problema 2

Se analiza la convergencia de la cual se aprecia que la malla de triángulos converge rápidamente al valor del desplazamiento en la dirección Y del punto central con una valor de 169,9 cm por tanto se aprecia este tipo de malla y el tamaño de 0.5m, es la más indicada para el análisis.

4.4 POSTPROCESO

4.4.1 ANALISIS

Conociendo mediante al análisis de convergencia el tipo y tamaño de malla a utilizar, se procede a iterar diferentes cargas, para la cual se cumplan las condiciones dadas en el problema.

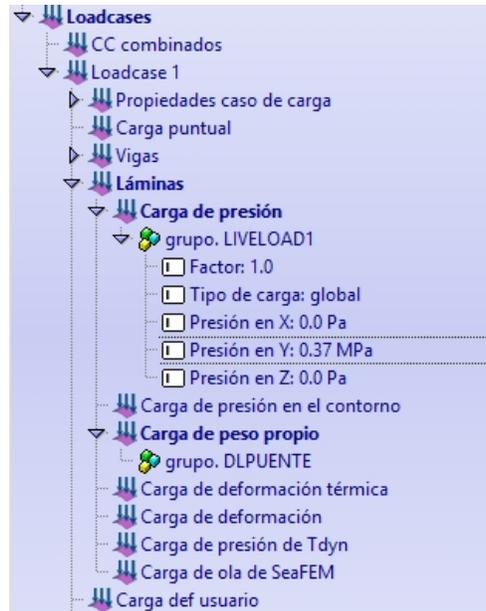


Figura 24. Cargas máximas para obtener los esfuerzos tensionales limite.

Para esto se itero con varias cargas hasta encontrar la carga máxima que fue de 0.37 Mpa que aproximaba los valores de compresión y tracción a los máximos permitidos para este problema.

Esfuerzo	Valores para Carga de 0.37 Mpa	
	Esfuerzos de Compresion (MPa)	Esfuerzos de tracción (MPa)
Top Sx	455.58	-258.67
Top Sy	494.99	-332.05
Bottom Sx	261.57	-294.3
Bottom Sy	207.87	-399.19

Tabla 3. Análisis tentativo de pendiente de taludes óptimos

A continuación se presentan los estados tensionales maximos para las fibras internas y externas del puente en el sentido X y Y.

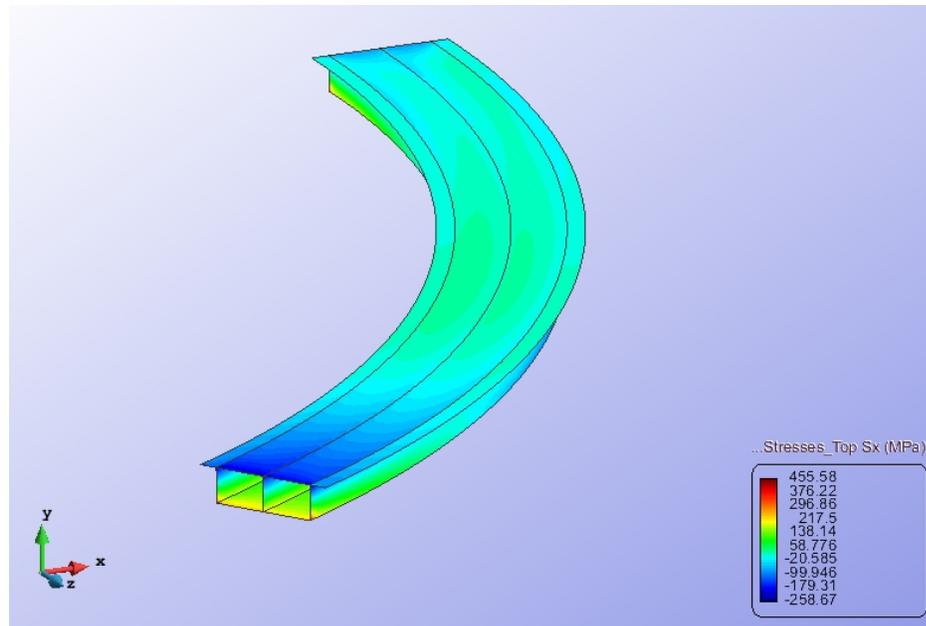


Figura 25. Esfuerzos máximos en fibra exterior en sentido X.

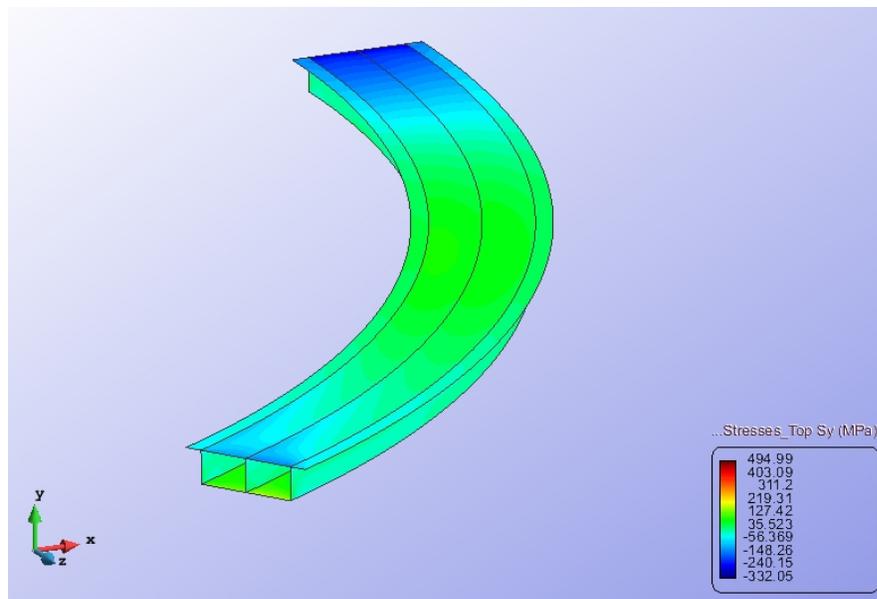


Figura 26. Esfuerzos máximos en fibra exterior en sentido Y.

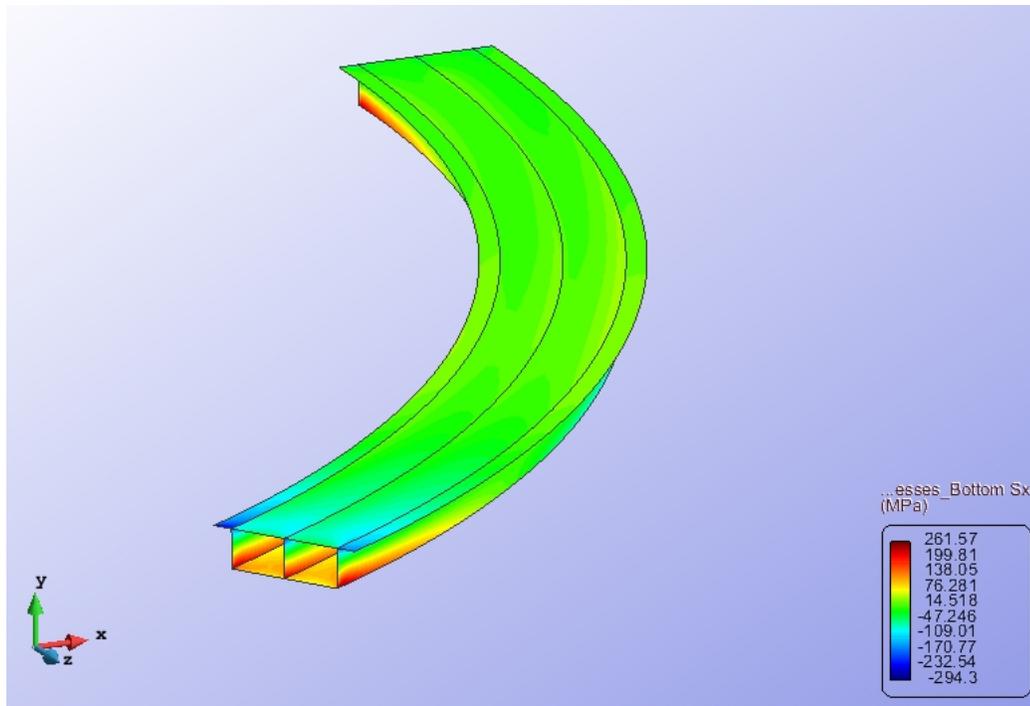


Figura 27. Esfuerzos máximos en fibras internas en sentido X.

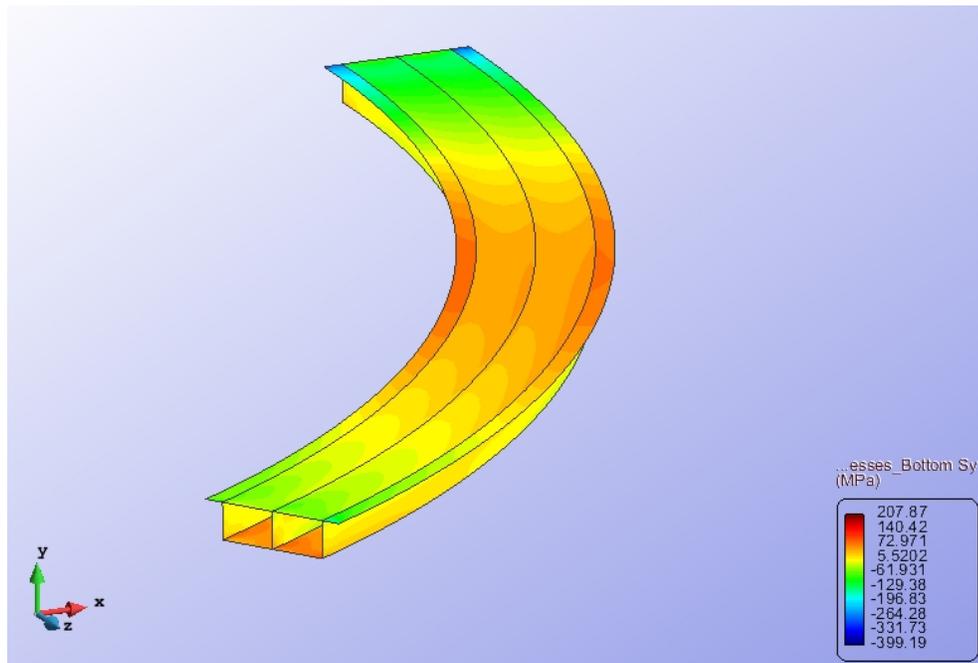


Figura 28. Esfuerzos máximos en fibras internas en sentido Y.