



## Índice

1. Introducción.....	¡Error! Marcador no definido.
2. Objetivos.....	2
3. Ejercicio L50. Panteón De Agripa.....	3
<b>3.1 Planteamiento del problema.</b> .....	3
<b>3.2 Solución del problema.</b> .....	4
<b>3.2.1 Tipo de problema.</b> .....	4
<b>3.2.2 Geometría de la estructura.</b> .....	5
<b>3.2.3 Condición de Contorno.</b> .....	5
<b>3.2.4 Asignación de coeficiente y definición de material.</b> .....	6
<b>3.2.5 Análisis del Problema.</b> .....	7
<b>3.3 Estados Tensionales.</b> .....	8
<b>3.3.1 Resultados.</b> .....	8
4. Ejercicio L23. Torre de enfriamiento.....	13
<b>4.1 Planteamiento del problema.</b> .....	13
<b>4.2 Solución del problema.</b> .....	14
<b>4.2.1 Tipo de problema.</b> .....	14
<b>4.2.2 Base teórica.</b> .....	14
<b>4.3 Datos de Análisis.</b> .....	17
<b>4.3.1 Resultados.</b> .....	17
<b>4.3.2 Geometría de la estructura.</b> .....	18
<b>4.3.3 Condición de Contorno.</b> .....	19
<b>4.3.4 Asignación de coeficiente y definición de material.</b> .....	20
<b>4.3.5 Análisis del Problema.</b> .....	21
<b>4.3.6 Analisis de espesores.</b> .....	24



## **1. Introducción**

El área de las estructuras es una rama de la ingeniería que en la actualidad se encuentra en constante crecimiento e investigación, existe gran diversidad de metodologías para el análisis y diseño de estructuras, estas van desde métodos experimentales y estadísticos hasta métodos simplificados o analíticos.

Los Métodos de Elementos Finitos (MEF), es una de estas importantes metodologías, la cual permite simular con altos grados de precisión el comportamiento de las estructuras sometidas a cargas de diseño, dándonos a conocer desplazamientos, esfuerzos y deformaciones en el interior de los elementos estructurales.

Los métodos de elementos finitos con ayuda de las altas tecnologías en computación que se viven en la actualizada, se unen para crear gran variedad de software de análisis de estructuras, estos se convierten en una valiosa herramienta de fácil aplicación que permite recrear casi cualquier tipo de estructura aplicada para el uso civil.

Es por esto que el presenta trabajo tiene como objetivo en la enseñanza y practica de las herramientas de diseño basados en la utilización de elementos finitos, para los estudiantes de la asignatura de Ingeniería de Estructuras.

Veremos el desarrollo y solución de 2 problemas tipo en estructuras de uso civil, utilizando las herramientas de diseño en Elementos finitos, el primer problema es el diseño de un panteón de Agripa y el segundo es una torre de enfriamiento.

## **2. Objetivos**

Diseñar y analizar las estructuras utilizando método de elementos finitos (MEF) para desarrollar el conocimiento de sobre la materia.

Objetivos específicos:

- Diseñar y dimensionar una presa en tierra armada, teniendo como limitante las dimensiones geométricas y las tensiones desarrolladas en el interior de la presa.
- Analizar el estado tensional de las estructuras típicas de la ingeniería civil.
- Diseñar el espesor de una torre de enfriamiento de concreto, teniendo como limitante las tensiones.

### 3. Ejercicio L50. Panteón De Agripa.

#### 3.1 Planteamiento del problema.

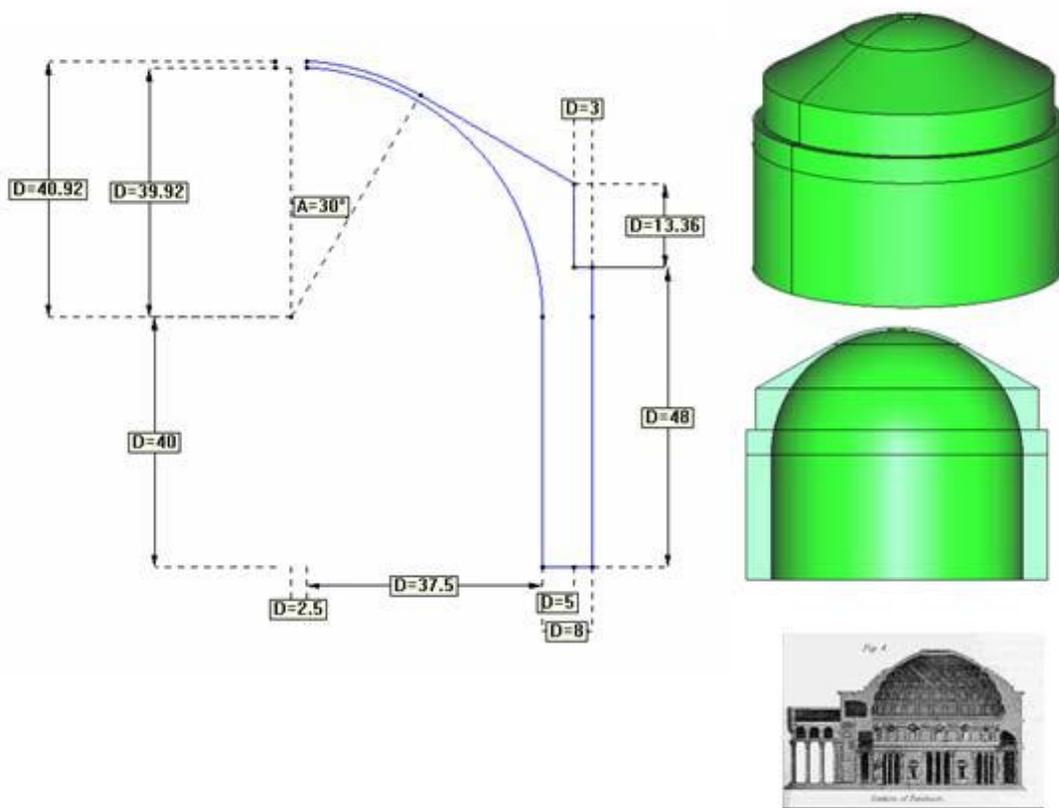
La figura representa aproximadamente el panteón de Agripa. Calcule el estado tensional y el coeficiente de seguridad que tiene la estructura ante el peso propio.

- 1) Las tracciones máximas en cualquier punto de la 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 **simplemente apoyada**.
- 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<sup>3</sup>**

#### Cargas actuantes:

##### a) Peso propio

Las dimensiones de la torre en m:



### 3.2 Solución del problema.

#### 3.2.1 Tipo de problema.

Para la solución de problema utilizamos el programa GID, donde nuestro tipo de problema para ejecutar el ejercicio fue el de **Solido de revolución** como se muestra en la figura 1, con el objetivo de visualizar mejor el comportamiento de la estructura y no gastar mucho tiempo en calculo, en comparación de la geometría completa, además se realizó un ensayo inicial de la geometría completa, pero las mallas estudiadas nunca convergieron, y el proceso se cancelaba cuando se sumaban demasiados puntos al análisis de convergencia.

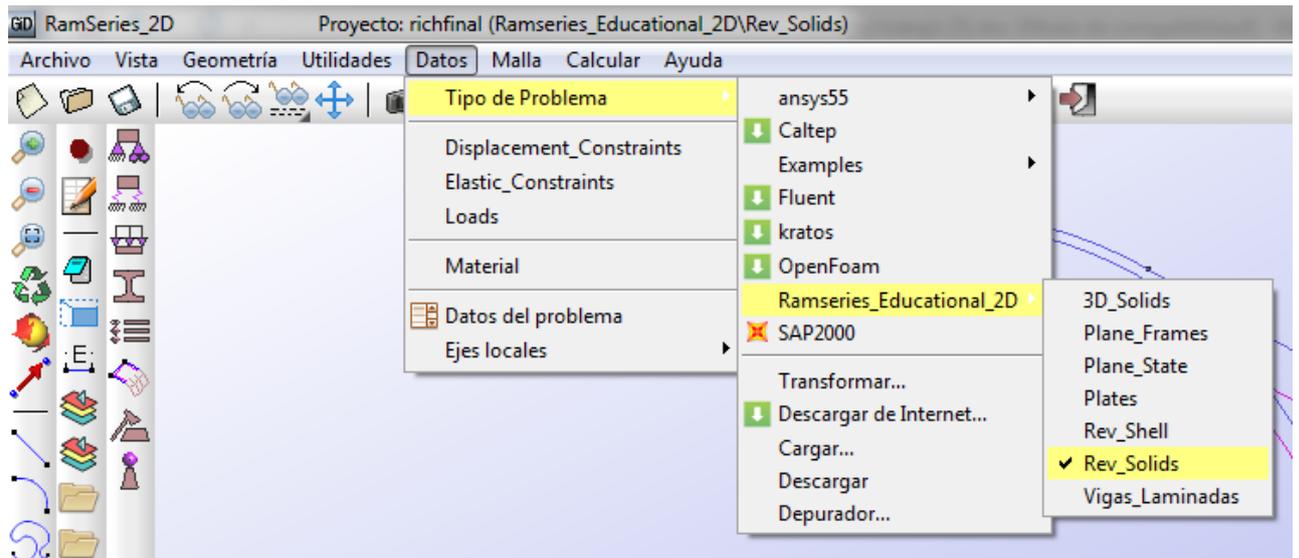


Fig. 1. Tipo de problema para el analisis de la estructura.

### 3.2.2 Geometría de la estructura.

Una vez que definimos el tipo de problema para el análisis de la estructura debemos realizar la geometría del mismo, mediante las herramientas de dibujo del programa GID, en la figura 2 se muestra que solo se dibuja una parte de la estructura, esto es debido a que la misma es simétrica en el otro lado. Por lo tanto nos ahorramos cálculos, análisis y tiempo.

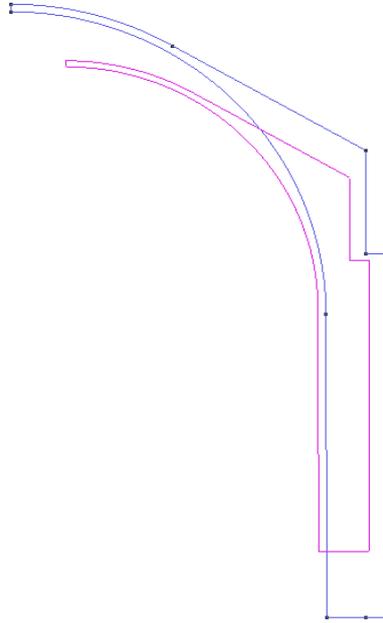


Fig. 2. Geometría y superficie de la estructura.

### 3.2.3 Condición de Contorno.

Luego que se la geometría de la estructura procedemos a la asignación de condiciones de apoyo y/o restricciones de la misma según lo establecido en el encabezado del problema, donde nos dice que el panteón de Agripa se debe considerar con simplemente apoyado tal como se muestra en la figura 3.

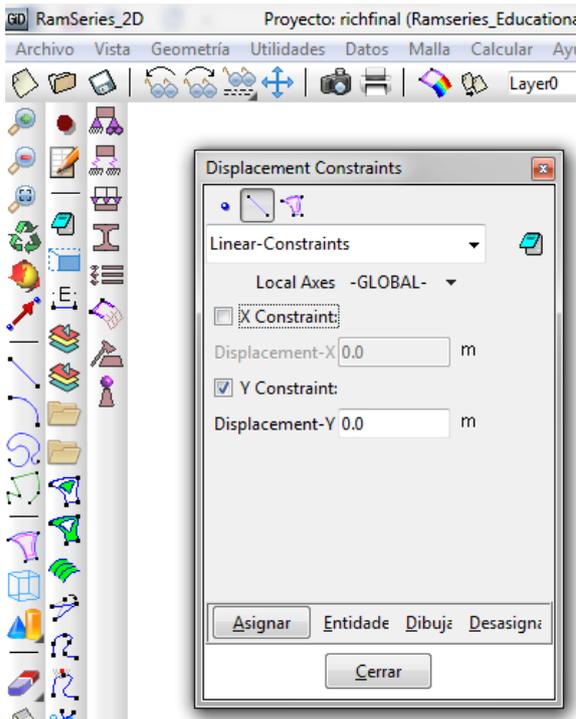


Fig. 3. Asignación de apoyo y rest.

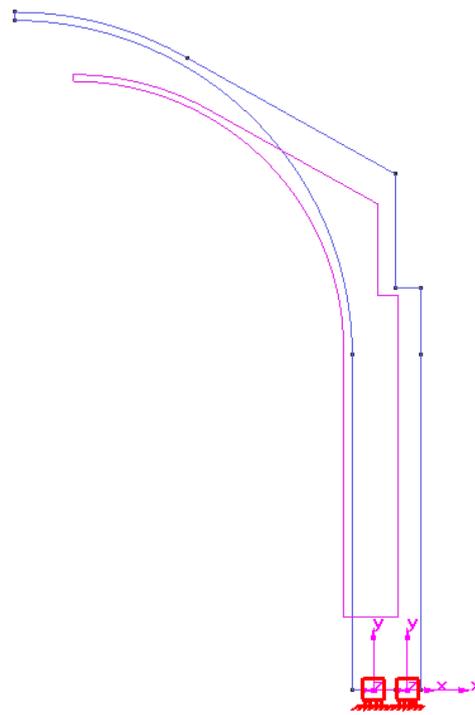
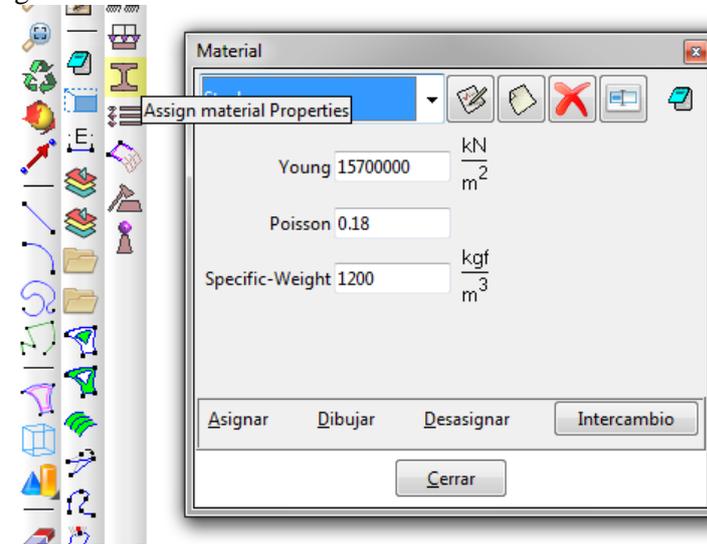


Fig. 4. Estructura simplemente apoyada.

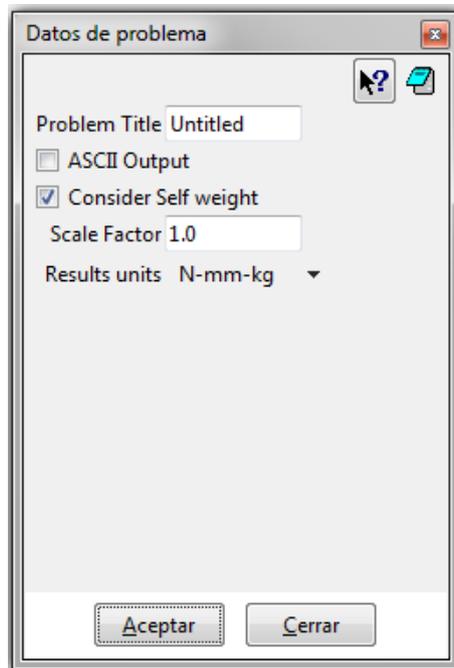
### 3.2.4 Asignación de coeficiente y definición de material.

Se asignaron los coeficientes y definieron los establecidos por el mandato del problema, la misma es de un material no identificado por el problema, pero sus valores son los que se presentan en la figura 5.



**Fig. 5. Propiedades del material.**

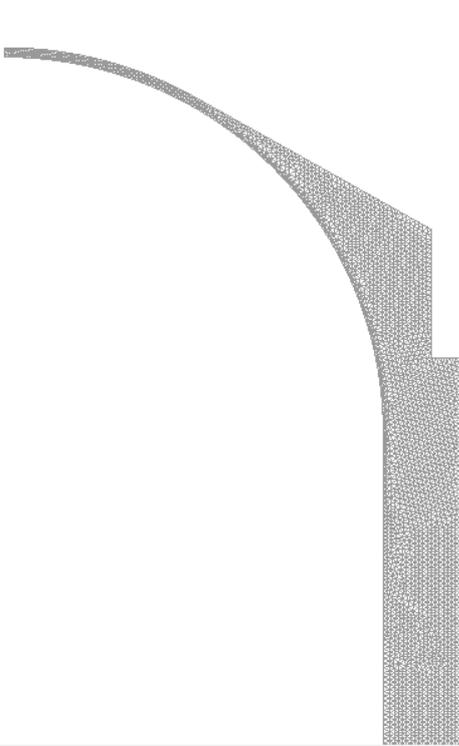
Nota: La Carga considerada para el análisis de la estructura fue la de su propio peso como se muestra en la figura 6.



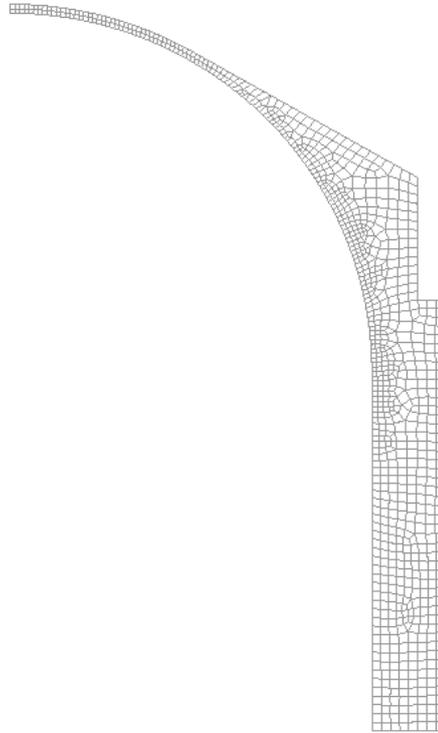
**Fig.6. Consideracion de peso propio.**

### 3.2.5 Análisis del Problema.

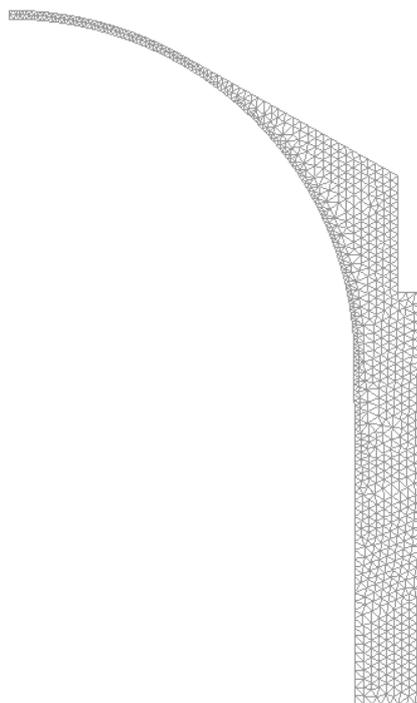
Para el análisis de la misma utilizamos varios tamaños de malla de diferentes tipos de elementos, usando el tipo de malla no estructura, esto se debe a la forma de la estructura.



**Malla de TN3 0.5mts.**

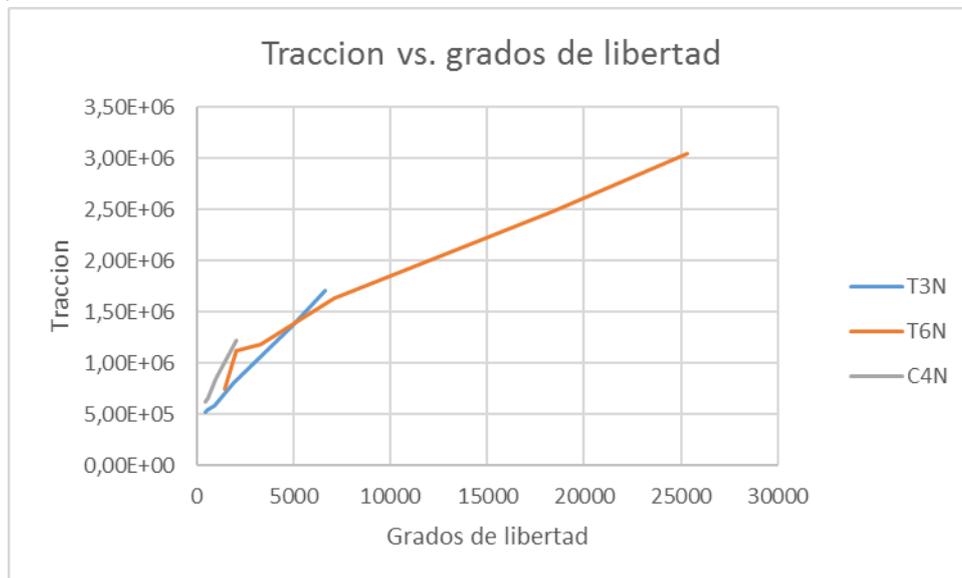


**Malla de C4N 1mts.**



**Malla T6N 0.6mts.**

Según los resultados obtenidos en GID escogimos el tipo de elemento que mejor comportamiento obtuvo y menor tamaño de malla tuvo, según se muestran en la gráfica 1, en donde se consideró más el resultado de la tracción la cual tenía una restricción mayor.



**Grafica 1. Convergencia de los varios tipos de elementos.**

### 3.3 Estados Tensionales.

#### 3.3.1 Resultados.

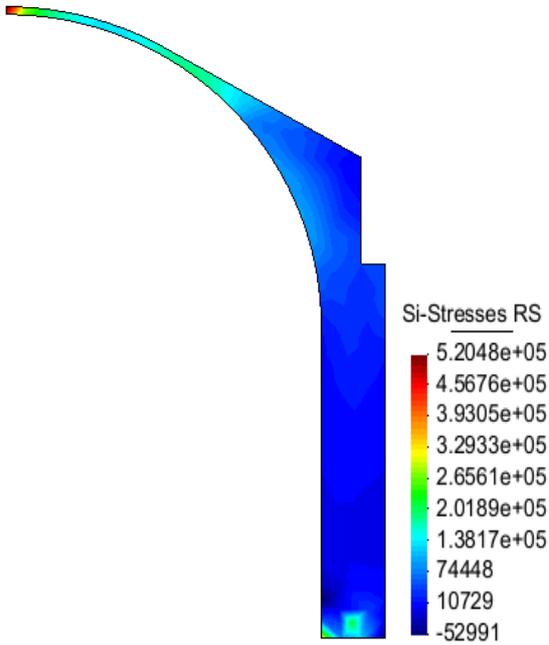
En la siguiente tabla se muestra los resultados obtenidos con los diferentes tipos de elementos y varios tamaños de malla, para ver que la malla T3N según el gráfico de convergencia anterior es el más adecuado ya que se acerca más al límite proporcionado por el problema.

#### Resultados Con tamaños de malla

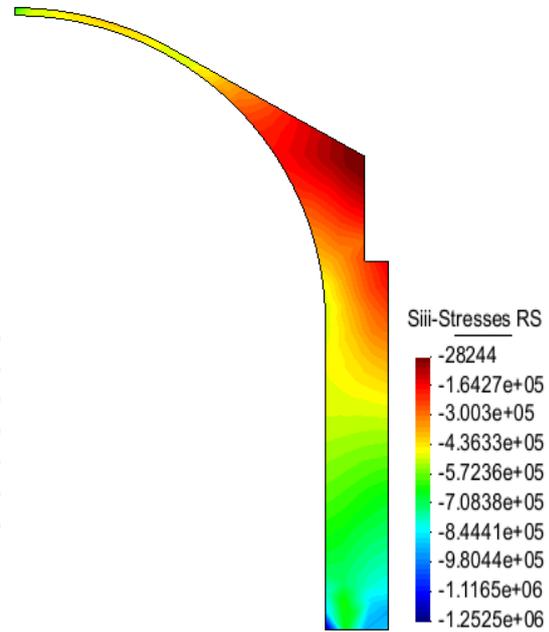
	2.5mts	2mts	1.5mts	1mts	0.6 mts	0.5 mts	0.4 mts
<b>Tipo de elementos</b>	<b>Nodos</b>						
<b>Triangulo 3N</b>	214	297	464	965	2437	3330	5061
<b>Triangulo 6N</b>	725	1026	1641	3536	9210	12675	19435
<b>Cuadrilate 4N</b>	210	296	478	1024	2608	3483	5444
<b>Tipo de elem.</b>	<b>Grados de libertad (mts)</b>						
<b>Triangulo 3N</b>	425	591	925	1930	4874	6660	10122
<b>Triangulo 6N</b>	1447	2049	3279	7072	18420	25350	38870
<b>Cuadrilate 4N</b>	417	589	953	2048	5216	6966	10888
<b>Tipo de elementos</b>	<b>Si (Tracción)</b>						
<b>Triangulo 3N</b>	5,20E+05	5,48E+05	5,83E+05	8,1723E+05	1,3671E+06	1,7093E+06	1,8413E+06
<b>Triangulo 6N</b>	7,50E+05	1,13E+06	1,19E+06	1,6310E+06	2,4912E+06	3,0444E+06	Supera
<b>Cuadrilate 4N</b>	6,29E+05	6,61E+05	8,43E+05	1,2261E+06	1,8068E+06	Supera	Supera
<b>Tipo de elem.</b>	<b>Siii (Compresión)</b>						
<b>Triangulo 3N</b>	1,25E+06	1,27E+06	1,79E+06	2,9497E+06	4,7780E+06	5,7043E+06	7,3840E+06
<b>Triangulo 6N</b>	2,29E+06	2,54E+06	3,37E+06	5,5585E+06	8,8210E+06	1,0811E+07	Cumple
<b>Cuadrilate 4N</b>	1,30E+06	1,47E+06	2,03E+06	3,2547E+06	5,4559E+06	Cumple	Cumple

**Tabla 1. Muestra los resultados de los estados tensionales de la estructura.**

**Traccion**

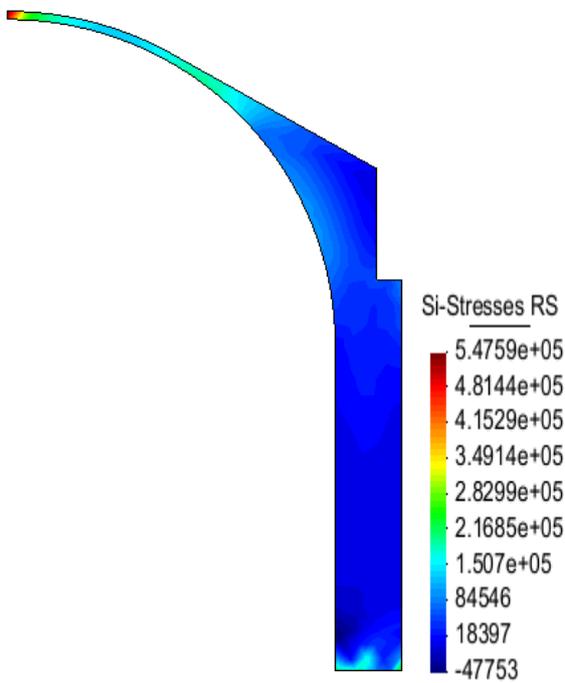


**Compresion**

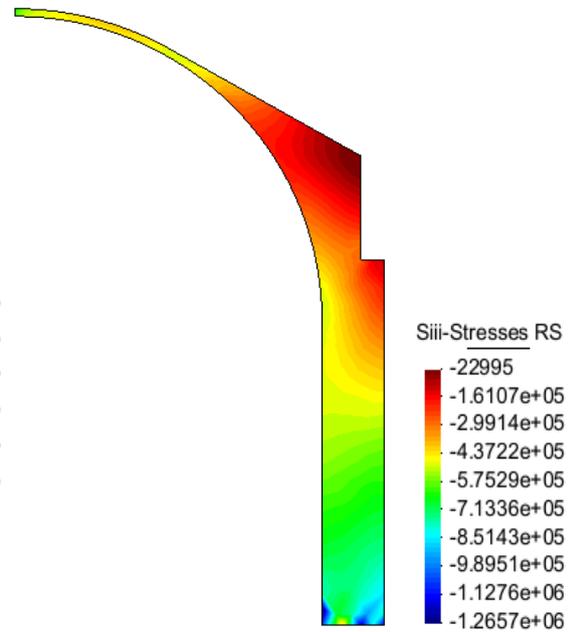


**Resultados de malla T3N a 2.5mts.**

**Traccion**



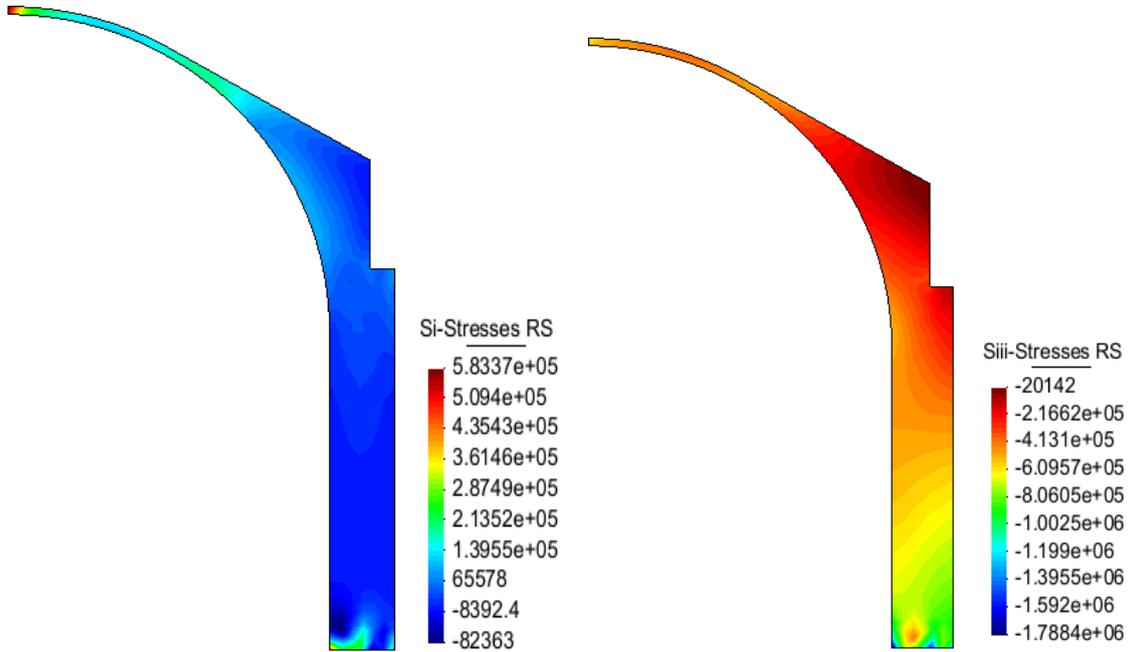
**Compresion**



**Resultados de malla T3N a 2mts.**

**Traccion**

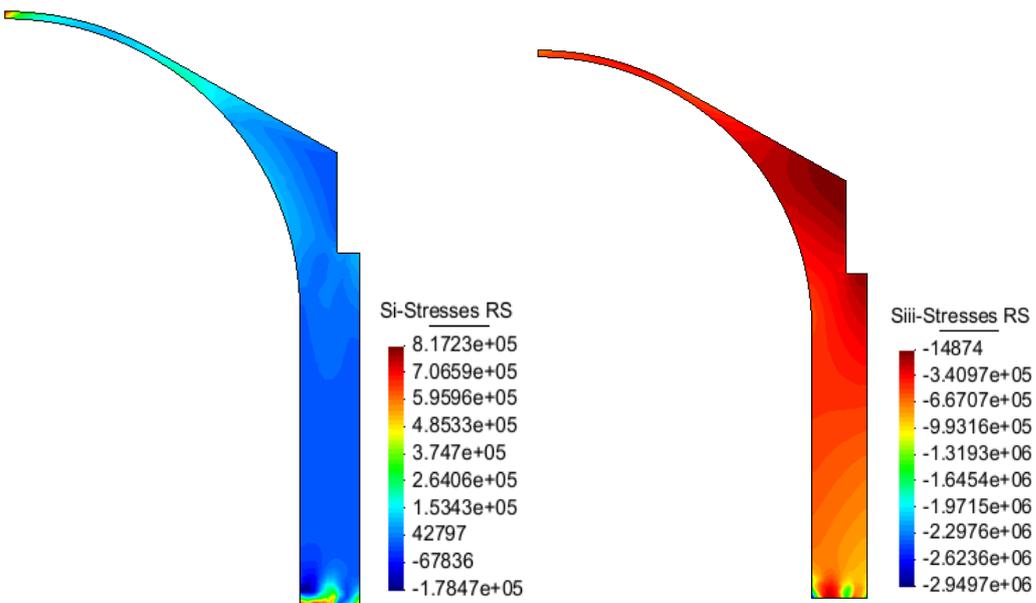
**Compresion**



**Resultados de malla T3N a 1.5mts.**

**Traccion**

**Compresion**

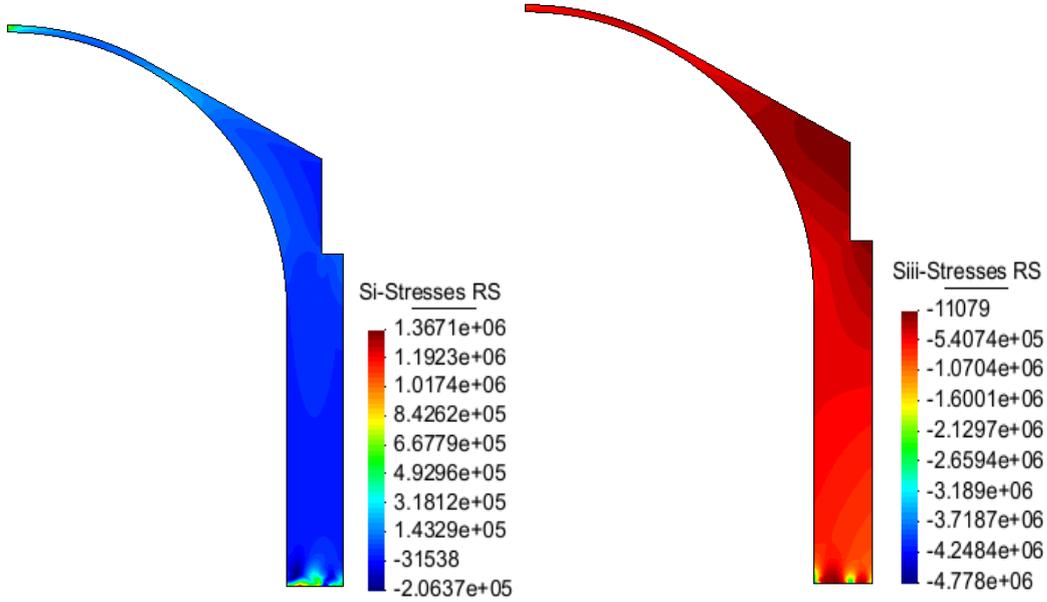


**Resultados de malla T3N a 1mts.**



Traccion

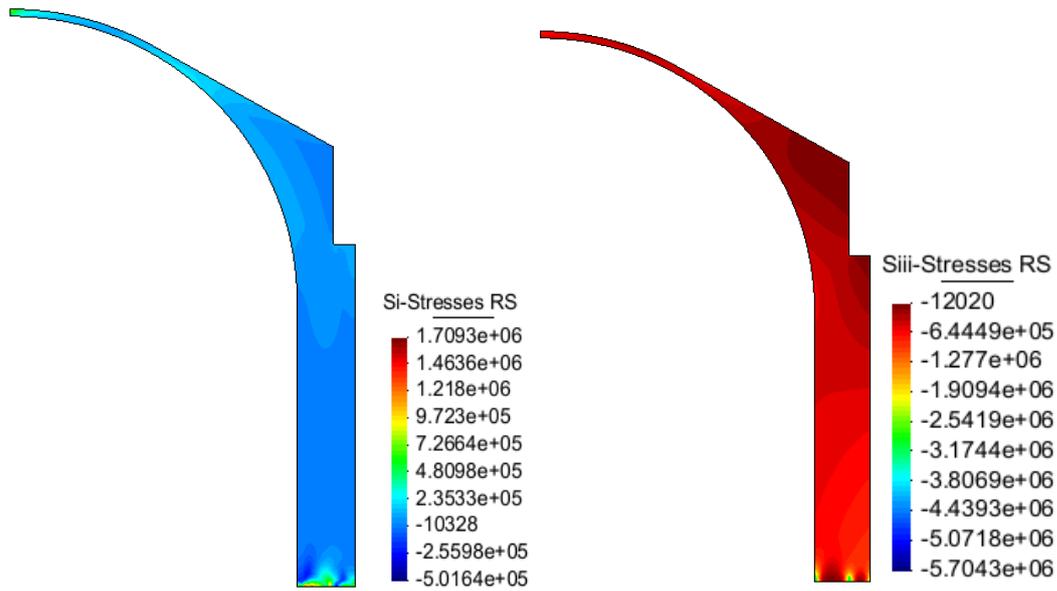
Compresion



Resultados de malla T3N a 0.6mts.

Traccion

Compresion



Resultados de malla T3N a 0.5mts.



### 3.3.2 Coeficiente de Seguridad o factor de seguridad.

El Coeficiente de estructura de esta estructura sera el cociente resultante del valor limite de tensiones (Capacidad Maxima) dado por el problema por el valor encontrado (Capacidad real) en el programa GID, este valor debera ser mayor que uno.

Capacidad Maximo / Capacidad Real = Coeficiente de seguridad.

#### Resultados:

Después de observar que la malla T3N es la de mejor comportamiento pues procedimos a colocarle diferentes tamaños de malla hasta alcanzar el valor más próximo al límite propuesto por el problema, en donde las tracciones no podían ser mayores a 1.8 Mpa y las compresiones no podían ser mayores a 70 Mpa. Por tanto el coeficiente de seguridad de la estructura será el siguiente:

**En Tracciones -----→ 1.8 Mpa / 1.709 Mpa = 1.0525**

**En compresiones ---→ 70Mpa / 5.704 Mpa = 12.2721**

Se escoge el mas desfavorable de los dos, en este caso el coeficiente de seguridad sera el de la traccion; esto debido a que solo soporta 1.05 veces lo solicitado mientras que la compresion es 12.27 veces lo solicitado por el mismo.





## 4.2 Solución del problema.

### 4.2.1 Tipo de problema.

La metodología de los elementos finitos permite abordar de varias maneras los problemas de estructuras, pero al final los resultados deberán ser similares al obtenido por cualquiera de las opciones que se planteen.

En este caso para al presente problema se puede dar solución con varias alternativas, aplicando siempre láminas de revolución ya que este cumple con 4 de los requerimientos para la solución por este tipo de metodología. Las cuatro condiciones son: 1) La geometría del elemento debe ser siempre de revolución, 2) las propiedades de los materiales deben pueden ser recreadas por revolución 3) las condiciones de contorno deben ser siempre de revolución. 4) las cargas deben ser siempre de revolución. De esta manera podemos afirmar que el problema puede ser abordado con métodos de elementos finitos tipo *láminas de revolución*.

Una de las soluciones como puede ser analizar el modelo con elementos troncocónicos, es una manera rápida y sencilla de llegar a los resultados. Otra manera puede ser creando parte de la geometría de revolución y se resuelve el problemas por geometría restringiendo los condiciones de contorno en dicho elemento, y por último de igual forma puede ser analizado con su geometría completa.

Para el presente caso se escogió la alternativa 2, modelando solo un cuarto de la geometría de revolución, con el objetivo de visualizar mejor el comportamiento de la estructura y no gastar mucho tiempo en calculo, en comparación de la geometría completa, además se realizó un ensayo inicial de la geometría completa, pero las mallas estudiadas nunca convergieron, y el proceso se cancelaba cuando se sumaban demasiados puntos al análisis de convergencia.

### 4.2.2 Base teórica.

En el presente problema se implementara la metodología de solidos de revolución MEF, esta es una simplificación de la teoría 3D donde se consideran 2 desplazamientos y un giro, la utilización de dicha teoría implica las siguientes hipótesis como punto de partida:

- 1- Las cargas son de revolución y hay simetría de revolución
- 2-El espesor de la lámina no cambia con la deformación
- 3-La tensión en la dirección normal a la generatriz  $\sigma_z'$  es nula.
- 4-Las normales a la generatriz antes de la deformación permanecen rectas, pero no necesariamente normales a la generatriz después de la deformación.

La hipótesis 4 sobre no ortogonalidad de la normal es idéntica a la establecida en las teorías de Timoshenko y de flexión de placas y láminas de Reissner-Mindlin.

El desarrollo de la teoría implementa, es importante conocer la diferente característica que nos pueden ayudar a una mejor interpretación de los resultados.

Se resumen las pautas y notación matemática utilizadas para la teoría de revolución.

#### Campo de movimientos

El cambio de desplazamiento está regido por los siguientes vectores:

El vector de movimientos locales es:

$$\mathbf{u}' = \begin{pmatrix} u'_o \\ w'_o \\ \theta \end{pmatrix}$$

El vector de movimientos globales es:

$$\mathbf{u} = \begin{Bmatrix} u_o \\ w_o \\ \theta \end{Bmatrix}$$

La matriz de transformación de movimientos locales es:

$$\mathbf{u}' = \begin{Bmatrix} u'_o \\ w'_o \\ \theta \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\phi & \text{sen}\phi & 0 \\ -\text{sen}\phi & \cos\phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_o \\ w_o \\ \theta \end{Bmatrix} = \mathbf{L} \mathbf{u}$$

### Vector de deformaciones

Como las tensiones tangenciales en xy e yz son nulas y con un valor de Cr que no se aproxime a la unidad, obtenemos el vector de deformaciones como sigue:

$$\boldsymbol{\varepsilon}' = \begin{Bmatrix} \varepsilon_{x'} \\ \varepsilon_{\phi} \\ \gamma_{x'z'} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u'_o}{\partial s} - \frac{w'_o}{R} - z' \frac{\partial \theta}{\partial s} \\ \frac{u'_o \cos\phi - w'_o \text{sen}\phi - z' \theta \cos\phi}{x} \\ \frac{\partial w'_o}{\partial s} + \frac{w'_o}{R} - \theta \end{Bmatrix}$$

$\varepsilon_{x'}$  deformación radial

$\varepsilon_{\phi}$  deformación circunferencial

$\gamma_{x'z'}$  deformación tangencial

Y el vector de deformaciones locales se escribe:

$$\boldsymbol{\varepsilon}' = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u'_o}{\partial s} - \frac{w'_o}{R} \\ \frac{u'_o \cos\phi - w'_o \text{sen}\phi}{x} \\ 0 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} -z' \frac{\partial \theta}{\partial s} \\ -z' \frac{\theta \cos\phi}{x} \\ \frac{\partial w'_o}{\partial s} + \frac{w'_o}{R} - \theta \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \hat{\boldsymbol{\varepsilon}}'_m \\ 0 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} z' \hat{\boldsymbol{\varepsilon}}'_f \\ \hat{\boldsymbol{\varepsilon}}'_c \end{Bmatrix}$$

Deformaciones generalizadas de membrana

Deformaciones generalizadas de flexión

$$\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}'_m = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u'_o}{\partial s} - \frac{w'_o}{R} \\ \frac{u'_o \cos\phi - w'_o \text{sen}\phi}{x} \end{Bmatrix}$$

$$\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}'_f = \begin{Bmatrix} -\frac{\partial \theta}{\partial s} \\ -\frac{\theta \cos\phi}{x} \end{Bmatrix}$$

Deformaciones generalizadas de cortante

$$\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}'_c = \left\{ \frac{\partial w'_o}{\partial s} + \frac{w'_o}{R} - \theta \right\}$$

Las componentes de  $\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}'_m$  pueden interpretarse como los alargamientos según direcciones radial y circunferencial. Las de  $\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}'_m$  como las "curvaturas" en esas dos mismas direcciones y  $\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}'_c$  representa la "deformación" de cortante transversal.

Tensiones locales

El vector de tensiones locales se define por:

$$\sigma' = \begin{Bmatrix} \sigma_{x'} \\ \sigma_{\phi} \\ \dots \\ \tau_{x'z'} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \sigma'_m \\ \dots \\ \sigma'_c \end{Bmatrix}$$

Donde  $\sigma_{x'}$ ,  $\sigma_{\phi}$  y  $\tau_{x'z'}$  son las tensiones radial, circunferencial y tangencial respectivamente.

La relación entre tensiones y deformaciones se obtiene modificando la ecuación constitutiva de la elasticidad tridimensional. Haciendo esto se obtiene, para una lámina de material isótropo:

$$\sigma' = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\alpha(1-\nu)}{2} \end{bmatrix} \epsilon' = \begin{bmatrix} D'_m & 0 \\ \dots & \dots \\ 0 & D'_c \end{bmatrix} \epsilon'$$

con

$$D'_m = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu \\ \nu & 1 \end{bmatrix} \quad \text{y} \quad D'_c = \frac{\alpha E}{2(1+\nu)}$$

Esfuerzos locales

El vector de esfuerzos locales se define como:

$$\hat{\sigma}' = \begin{Bmatrix} \hat{\sigma}'_m \\ \dots \\ \hat{\sigma}'_f \\ \dots \\ \hat{\sigma}'_c \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} N_{x'} \\ N_{\phi} \\ \dots \\ M_{x'} \\ M_{\phi} \\ \dots \\ Q_{z'} \end{Bmatrix} = \int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} \begin{Bmatrix} \sigma_{x'} \\ \sigma_{\phi} \\ \dots \\ z'\sigma_{x'} \\ z'\sigma_{\phi} \\ \dots \\ \tau_{x'z'} \end{Bmatrix} dz' = \int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} \begin{Bmatrix} \sigma'_m \\ \dots \\ z'\sigma'_m \\ \dots \\ \sigma'_c \end{Bmatrix} dz'$$

Siendo

$$\hat{\sigma}'_m = \begin{Bmatrix} N_{x'} \\ N_{\phi} \end{Bmatrix} ; \quad \hat{\sigma}'_f = \begin{Bmatrix} M_{x'} \\ M_{\phi} \end{Bmatrix} ; \quad \hat{\sigma}'_c = \{ Q_{z'} \}$$

Relación entre los esfuerzos y deformaciones generalizadas locales queda la expresión:

$$\hat{\sigma}' = \hat{D}' \hat{\epsilon}'$$

El vector de deformaciones generalizadas es:

$$\hat{\epsilon}' = \begin{Bmatrix} \hat{\epsilon}'_m \\ \hat{\epsilon}'_f \\ \hat{\epsilon}'_c \end{Bmatrix}$$

El vector de deformaciones generalizadas es:

La matriz constitutiva generalizada es:

$$\hat{D}' = \int_{-t/2}^{t/2} \begin{bmatrix} D'_m & z'D'_m & 0 \\ z'D'_m & (z')^2 D'_m & 0 \\ 0 & 0 & D'_c \end{bmatrix} dz' = \begin{bmatrix} \hat{D}'_m & \hat{D}'_{mj} & 0 \\ \hat{D}'_{mj} & \hat{D}'_j & 0 \\ 0 & 0 & \hat{D}'_c \end{bmatrix}$$

Como en todas las teorías MEF la implementación del principio de los trabajos virtuales resulta de gran ayuda, la cual se rige para solido de revolución por:

En láminas de espesor moderado y pequeña curvatura se cumple que  $dA=dx'dz'$  es aprox= $ds dz'$ .

El trabajo virtual interno se puede expresar en función de los esfuerzos y las deformaciones generalizadas. La expresión definitiva queda como:

$$2\pi \int_s \delta \hat{\mathbf{E}}^T \hat{\boldsymbol{\sigma}}^T \mathbf{x} ds = 2\pi \int_s \delta \mathbf{u}^T \mathbf{t}^T \mathbf{x} ds + \sum_i 2\pi x_i \delta \mathbf{u}_i^T \mathbf{p}_i$$

En el PTV aparecen únicamente primeras derivadas de los movimientos y pueden utilizarse elementos de clase C0 (se exige únicamente continuidad del campo de movimientos).

### 4.3 Datos de Análisis.

#### 4.3.1 Resultados.

Inicialmente se define el tipo de problema a resolver. En este caso se trata de un problema de láminas, por lo que se especifica en el programa de cálculo “RAM series”, tipo de simulación, dimensión de la simulación, tipo de análisis, y tipo de elementos analizar y los demás parámetros de análisis:

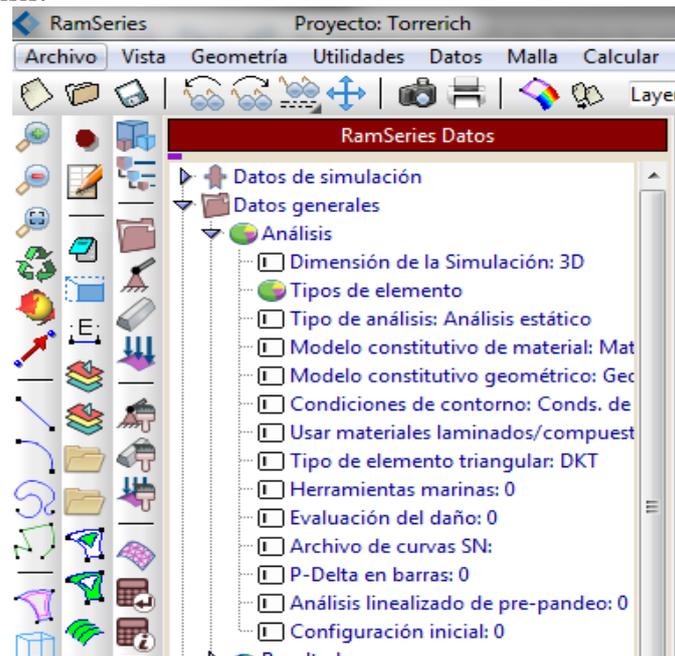
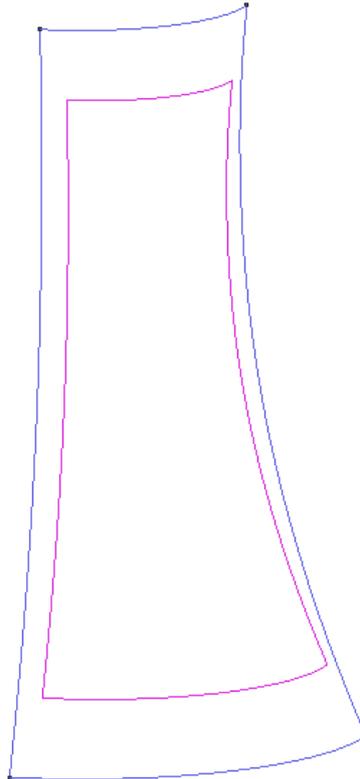


Fig. 1. Muestra los datos generales para el analisis.

En esta etapa definimos variables importantes para el análisis como la asignación de tipo de elementos a utilizar en la etapa de proceso.

#### 4.3.2 Geometría de la estructura.

Se introduce la geometría en el pre proceso del programa RAM Series profesional, por medio de las herramientas de dibujo, inicialmente se generan los punto obligados para el trazado del arcos en el plano de trabajando XY, posteriormente se genera un cuarto de la superficie de la torre por medio de revolución a  $90^\circ$ , de esta forma trabajamos el modelo de forma simétrica.



**Fig. 2. Muestra la geometria Ramseries de la torre de enfriamiento.**

#### 4.3.3 Condición de Contorno.

Se dan las condiciones de contorno al modelo, partiendo de la realidad de la estructura, la cual se encuentra apoyada sobre columnas distribuidas en toda su longitud circunferencial, se realizó una modelación rápida para simular los apoyos de las columnas distribuidos cada  $10^\circ$  como se aprecia en el esquema inicial dado (Ilustración 1), generando puntos de apoyo en la base, pero se observó que se generaban sobre esfuerzos que conllevaban a determinar espesores de más de 60cm, lo cual no es aplicado a la realidad de estas torres, las cuales tiene espesores delgados.

Por lo anterior, se realizó la condición de simplemente apoyada en toda la línea circunferencial de la base (0,0,1), de igual manera de las líneas de simetría restringiendo el giro respecto al eje Z y su desplazamiento perpendiculares al origen.

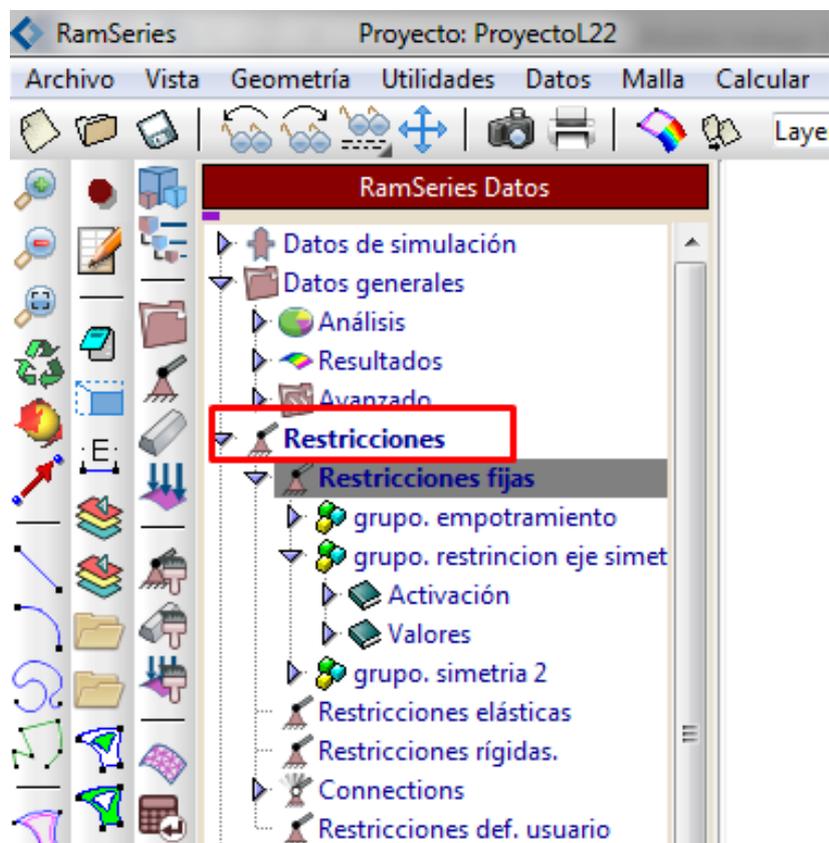
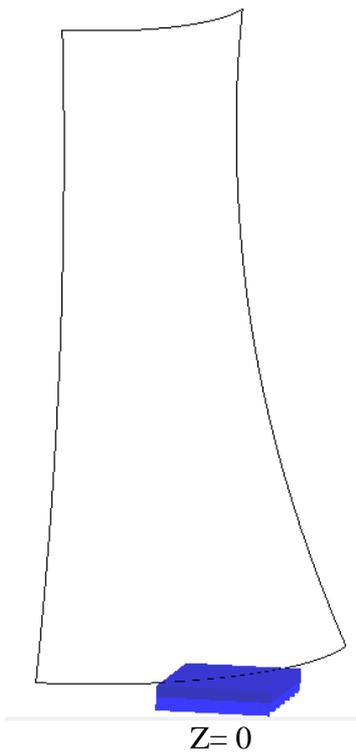
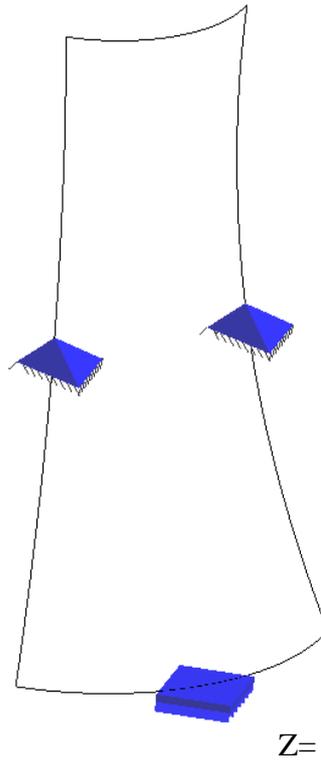


Fig. 3. Muestra la aplicación de restricciones a la estructura.



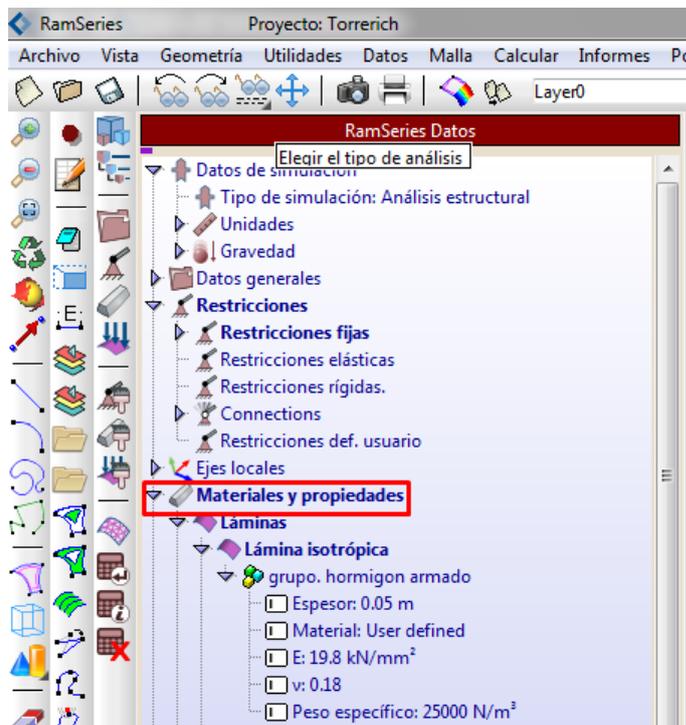
**Fig. 4. Restriccion de base.**



**Fig. 5. Restriccion de lineas de simetria.**

#### 4.3.4 Asignación de coeficiente y definición de material.

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



**Fig. 6. A. de propiedades de materiales.**



**Fig. 7. Muestra de Hormigon Arm.**

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 Ram Series:

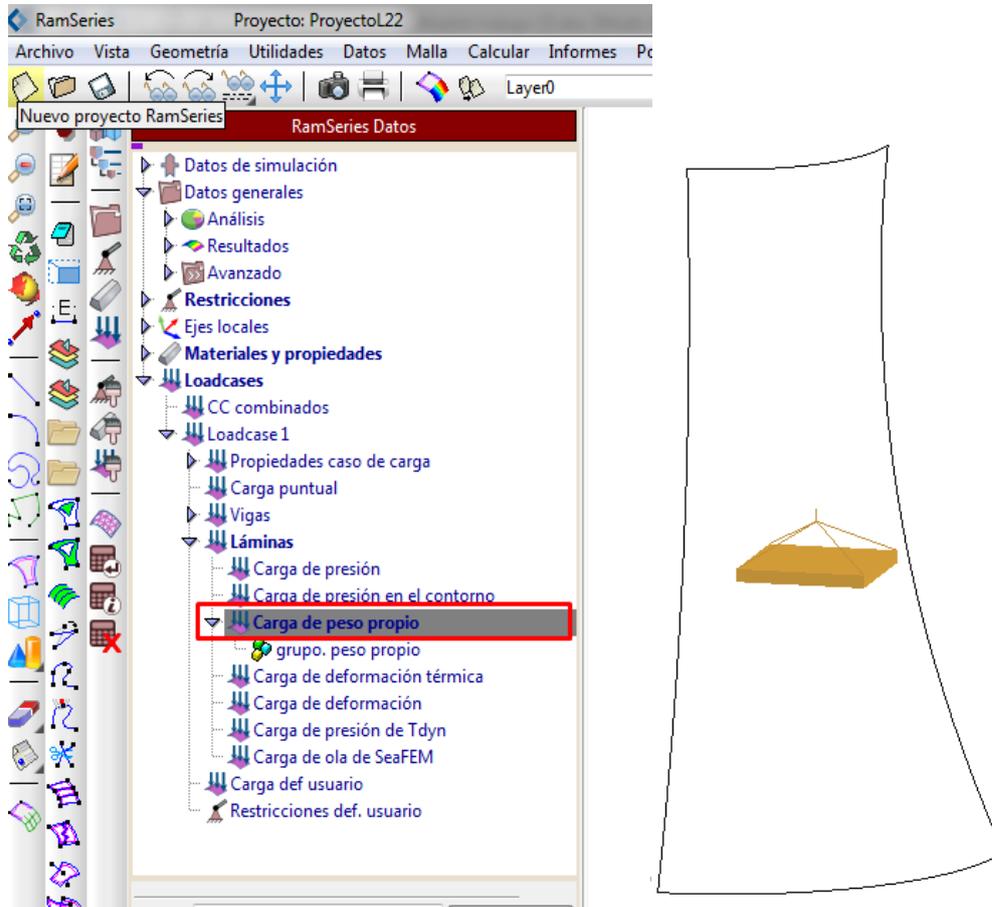


Fig. 8. Asignación del peso propio.

#### 4.3.5 Análisis del Problema.

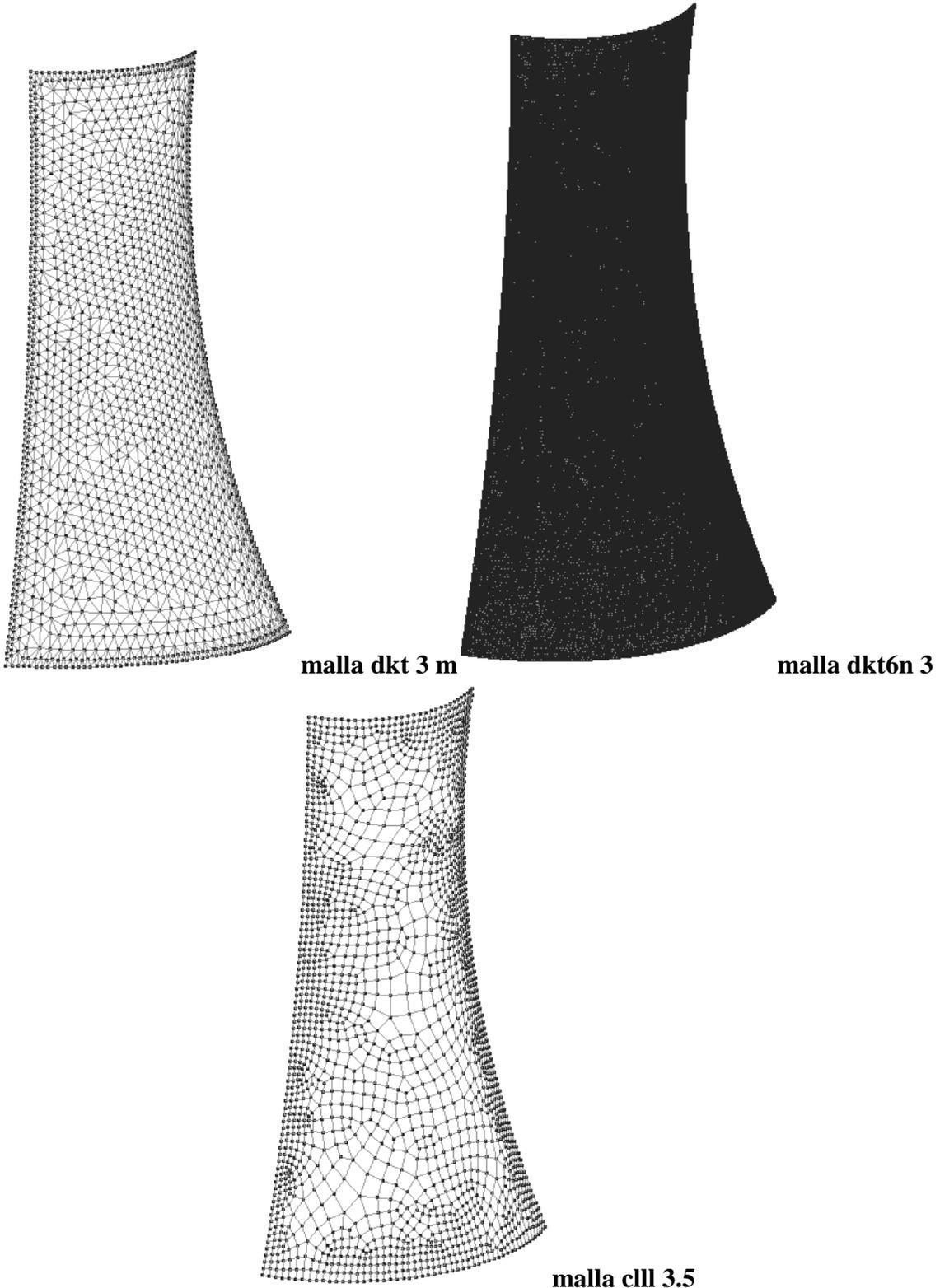
Para una adecuada obtención de resultados confiables y optimización de tiempo en el cálculo del post-proceso, se hace necesario la escogencia de un tipo y tamaño de malla óptima para garantizar buenos resultados. Esto es debido a que en MEF no todos los tipos de malla generan resultados confiables, se busca con el análisis de convergencia 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 y asumiendo un espesor de 15 cm, para el total del modelo, se obtienen los desplazamientos de la estructura ubicado en la parte superior de la torre y sobre la línea revolucionada inicial de generación del modelo, respecto a los diferentes tipos de malla.

En el análisis de convergencia se estudiaron tres tipologías de mallas estructuradas, con variación del tamaño de los elementos, el resultado del proceso se indican a continuación en la tabla 1:

En el análisis de convergencia se estudiaron tres tipologías de mallas estructuradas, con variación del tamaño de los elementos, el resultado del proceso se indican a continuación en la tabla 1:

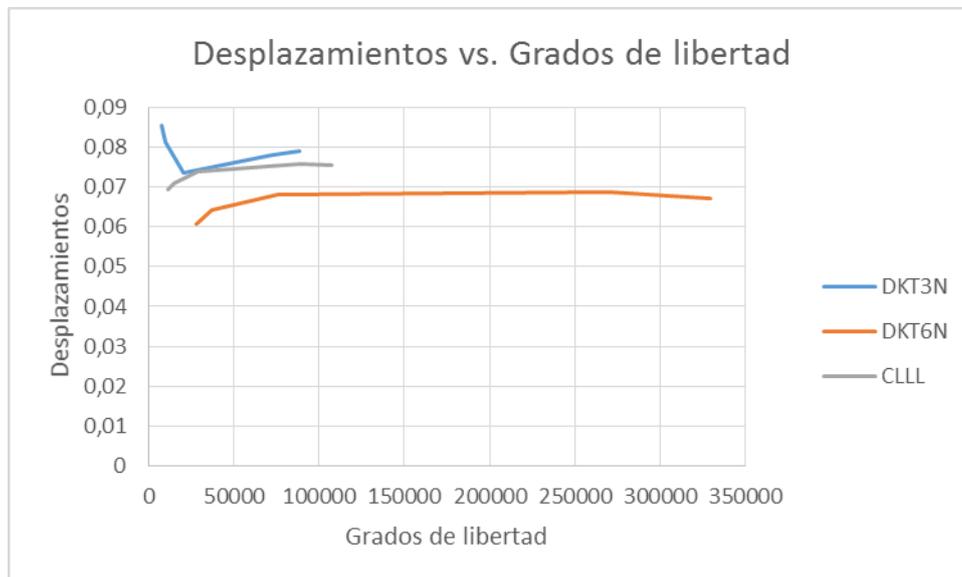


Mallas	Tipo de elemento		
	Grados de libertad		
	DKT3N	DKT6N	CLLL
3.5mts	7692	28486	11370
3mts	9990	37134	15198
2mts	20334	75714	28499
1mts	72550	269803	89009
0.9mts	88880	329278	107606

**Tabla 1.** Muestra los grados de libertad con diferentes elementos y tamanos de malla.

Mallas	Desplazamiento Z		
	DKT3N	DKT6N	CLLL
3.5mts	-0,085351	-0,060799	-0,069458
3mts	-0,081342	-0,064292	-0,071106
2mts	-0,073546	-0,068146	-0,07384
1mts	-0,077988	-0,068836	-0,075653
0.9mts	-0,078958	-0,067109	-0,075412

**Tabla 2.** Muestra los desplazamientos con diferentes elementos y tamanos de malla.



**Grafica 1.** Muestra la convergencia de los desplazamientos con diferentes elementos y tamanos de malla.

Se analiza la convergencia de la cual se aprecia que la malla tipo DKT de 6N converge rápidamente al valor del desplazamiento en la dirección z, por tanto se aprecia este tipo de malla y el tamaño de 0.9m, es la más indicadas para el cálculo del espesor de la torre, de tal forma que se generen resultados confiables.

#### 4.3.6 Analisis de espesores.

Después de asignación de cada una de las mallas para el análisis de convergencia, se procede al cálculo de cada uno de los desplazamientos dando como resultado los datos de la tabla 2, a esta etapa de estudio se le llama Proceso, esta función la elabora internamente en programa “RAM Series Professional”.

Conociendo mediante al análisis de convergencia el tipo y tamaño de malla a utilizar, se procede al cálculo del espesor más óptimo, para el cual se cumplan las condiciones dadas en el problema.

Para esto se realiza un análisis tentativo aumentando los espesores y obteniendo los esfuerzos principales para cada espesor, se inicia el proceso con un espesor inicial de 5 cm y será aumentado cada 5 cm hasta encontrar los esfuerzos óptimos, con el tipo y tamaño de malla optima, los resultados de dicho análisis se presentan a continuación:

Espesores	Estados tensionales	
	Tracción Si (Mpa)	Compresión Siii (Mpa)
0.05mts	41,365	-62,268
0.10mts	29,988	-52,381
0.15mts	23,388	-46,116
0.20mts	19,443	-41,795

**Tabla 2. Muestra los resultados de los estados tensionales con diferentes espesores.**

#### 4.3.7 Resultados.

Escogimos los estados tensionales en un punto de la estructura para cumplir con las restricciones del problema y vemos que la misma cumple con el espesor de 0.20 mts.

0.20mts	19,443	-41,795
---------	--------	---------

Aquí se muestran las imágenes de los estados tensionales:

