

# Simulación estructural de una contención nuclear mediante elementos 'shell' de carácter general, aplicando una presión de diseño

Structural simulation of a nuclear containment using general purpose shell elements, applying a design pressure

Presentación: 6-7/10/2020

Doctorando:

**José A. Santelli**

Grupo de investigación GITEVE. Centro de Investigación CIDIV, Facultad Regional Gral. Pacheco, Universidad Tecnológica Nacional - Argentina  
[jsantelli@docentes.frgp.utn.edu.ar](mailto:jsantelli@docentes.frgp.utn.edu.ar)

Director/es:

**Fernando Flores**

Co-director/es:

**Walter Castelló**

**Javier Raffo**

## Resumen

Utilizando un elemento finito especialmente formulado sin una teoría de láminas específica, o sea aplicable a cualquier situación de placa/lámina, se realizó el modelado y la aplicación de la correspondiente presión de diseño a una estructura tipo contención nuclear, modelando además todos los tubos correspondientes a las penetraciones, así como la cimentación y la construcción interna. Primero se hicieron modelos simplificados en diferentes situaciones para obtener valores de referencia. Los resultados obtenidos arrojan unos valores de tensión (membrana+flexión+pico) sobre todo el conjunto, sin necesidad de efectuar submodelos, en un tiempo de cálculo de aprox. 3200 segundos/2 Cores para una malla de aprox. 180 mil nodos.

Palabras clave: elementos finitos de lámina, contención nuclear

## Abstract

Using a specially formulated finite element without a specific shell theory, that is, applicable to any plate / sheet situation, modeling and applying the corresponding design pressure to a nuclear containment type structure was performed, also modeling all the corresponding tubes penetrations, as well as foundations and internal construction. Simplified models were first developed in different situations to obtain reference values. The results obtained show stress values (membrane + bending + peak) over the entire assembly, without the need to run sub-models, in a calculation time of approx. 3200 seconds / 2 Cores for a mesh of approx. 180k nodes.

Keywords: shell finite elements, nuclear containment

## Introducción

### Descripción del sistema bajo estudio

La contención de los reactores nucleares presurizados de diseño alemán, consisten en una lámina 'shell' esférica, sin columnas, esto es 'free standing', con un diámetro (en general) de unos 56 m. (en el caso bajo estudio, es de 50 m) y un espesor de pared (en general) de unos 38 mm (en el caso bajo estudio, el espesor varía entre los 20 y los 30 mm.). Está apoyada sobre una fundación de hormigón, que apoya desde el punto inferior, hasta (en general) unos 40° por debajo del ecuador de la esfera.

La contención consiste en unas 500 láminas rectangulares curvadas, las cuales se sueldan entre sí. El material es el acero ferrítico 15 Mn Ni 63.

Hay bastantes penetraciones en la contención, por donde pasan tubos, cables, y también exclusas de personal, equipos, etc. En estos lugares, la contención ha sido reforzada incrementando el espesor de la sección, así como el del caño que penetra.

Existe también una compuerta removible que se utiliza para el traslado de equipamiento, la cual, en su unión atornillada con la contención, presenta un espesor doble, ya que la compuerta en sí tiene el mismo espesor que la contención.

Durante el diseño, el cual se basa en casos de accidente, la presión máxima dentro de la contención se estimó alrededor de 5 bar (que varía y está determinada generalmente por el espesor mínimo). La contención se diseña para resistir esta carga sin ninguna pérdida significativa de estanqueidad.

En el caso de este trabajo, se toma como ejemplo esta presión de diseño de 5 bar, extraída de Referencia<sup>i</sup> (Göller et al., 1987) , que es un trabajo en donde se realiza el ensayo de una estructura de contención (a escala) hasta su colapso por deformación plástica..

## Desarrollo

### Desarrollo del trabajo

Debido a las características particulares de este tipo de recipiente de presión, con unas dimensiones excepcionalmente grandes, y un espesor relativamente pequeño (la relación volumen respecto al espesor de pared es mucho mayor que en un tanque estándar), y unas penetraciones no-estructurales pero indispensables para el funcionamiento del reactor, se realizará la modelización en las siguientes etapas:

- Cálculo analítico de la tensión sobre una esfera
- Cálculo de la intersección de un tubo y una esfera utilizando una teoría de lámina axisimétrica
- Cálculo de la intersección tubo/esfera no-axisimétrica, con el caño descentrado.
- Cálculo de la contención completa

## Estimación de las tensiones de forma analítica

### Tensión sobre una esfera sometida a presión interna

Partiendo de la formula analítica para tensión en una cáscara de revolución cargada simétricamente:

$$\sigma_1 = \frac{qR_2}{2t} \quad (1)$$

obtenemos una tensión de membrana de 260,42 MPa. En este caso se puede considerar como primera aproximación este valor de referencia.

## Tensión sobre la unión de la esfera con un caño (elementos de cáscara axisimétricos)

Si se plantea el problema de la concentración de la tensión en las penetraciones, comenzaremos por estudiar el problema axil-simétricamente, es decir, tomando al eje de simetría del caño propiamente dicho como eje de simetría, y aplicando la presión en una sección de la esfera de presión, como se muestra a continuación:

### Geometría del modelo axil-simétrico

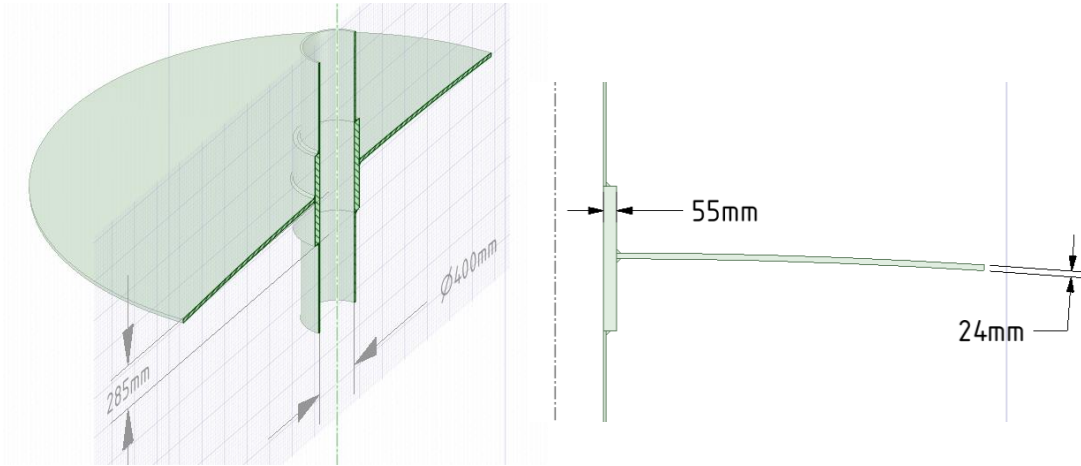


Figura 1. Geometría del modelo axil-simétrico.

Evidentemente, para que lo anterior se cumpla, eje de simetría del caño debe pasar por el punto central de la esfera, porque si no, no existiría simetría axil. Consideremos de momento un caso en donde esto así ocurriera.

### Resultados modelo axisimétrico

A continuación, se determina la tensión de membrana (en los elementos alejados de la zona de intersección):

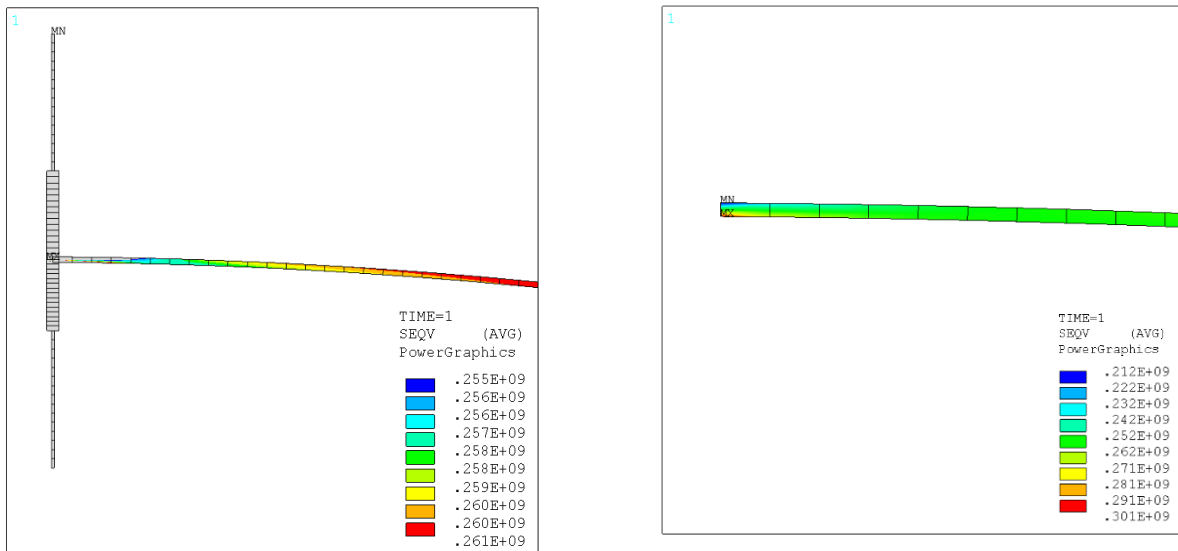


Figura 2. Der. Tensiones con la escala ajustada para suprimir las tensiones de flexión y reflejar la tensión de membrana alejada del caño. Izq: Tensión de membrana+flexión en la intersección del caño y la esfera.

La tensión de membrana en el extremo derecho de la gráfica anterior es de 261 MPa.

La tensión máxima (membrana+bending), llega hasta los 301 MPa.

### Tensión sobre la unión esfera-caño descentrada (3D)

#### Geometría

Para poder determinar tensiones más allá de un estado tensional dominado por membrana y con un pico por flexión en la intersección, a continuación, se estudia el efecto de que el sistema no sea axisimétrico. Se propone el siguiente modelo geométrico:

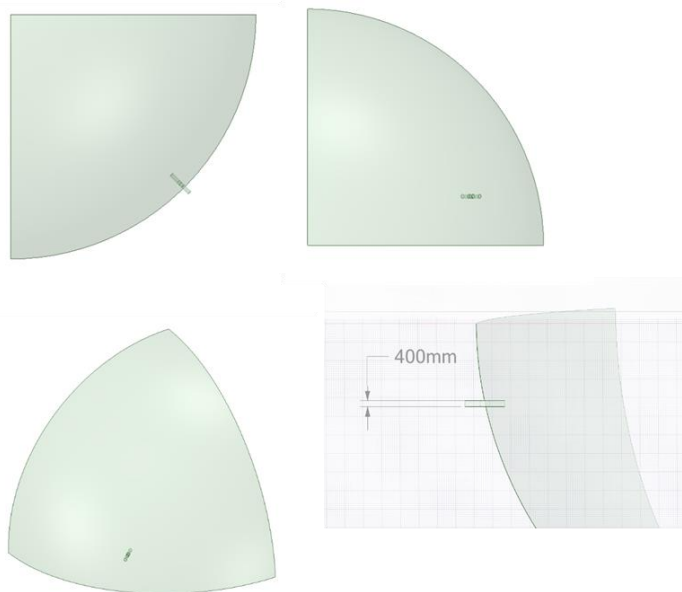


Figura 3. Modelo de 'shells' de esfera y caño descentrado.

**Elemento finito de lámina de uso general - Elemento SHELL181 de Ansys**

SHELL181(Referencia<sup>ii</sup> (Bathe & Dvorkin, 1986)) es adecuado para analizar estructuras de cáscaras delgadas a moderadamente gruesas. Es un elemento de cuatro nodos con seis grados de libertad en cada nodo: traslaciones en las direcciones x, y y z, y rotaciones sobre los ejes x, y y z. (Si se usa la opción de membrana, el elemento solo tiene grados de libertad de traslación). La opción triangular degenerada solo debe usarse como elementos de relleno en la generación de mallas.

El elemento es adecuado para aplicaciones lineales, de gran rotación y / o grandes deformaciones no lineales. El cambio en el espesor de la cáscara se tiene en cuenta en análisis no lineales. En el dominio de elementos, se admiten esquemas de integración completa y reducida. SHELL181 tiene en cuenta los efectos seguidores (rigidez de carga) de las presiones distribuidas. SHELL181 - 4-Node Shell

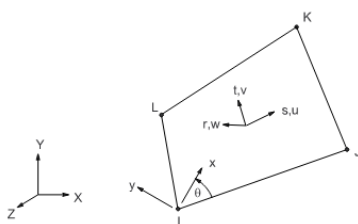


Figura 4. Integration Points In-plane: 1 x 1 or 2 x 2. Thru-the-thickness:1, 3, 5, 7, or 9 per layer for data input for section general shell option

**Resultados esfera-caño descentrados**

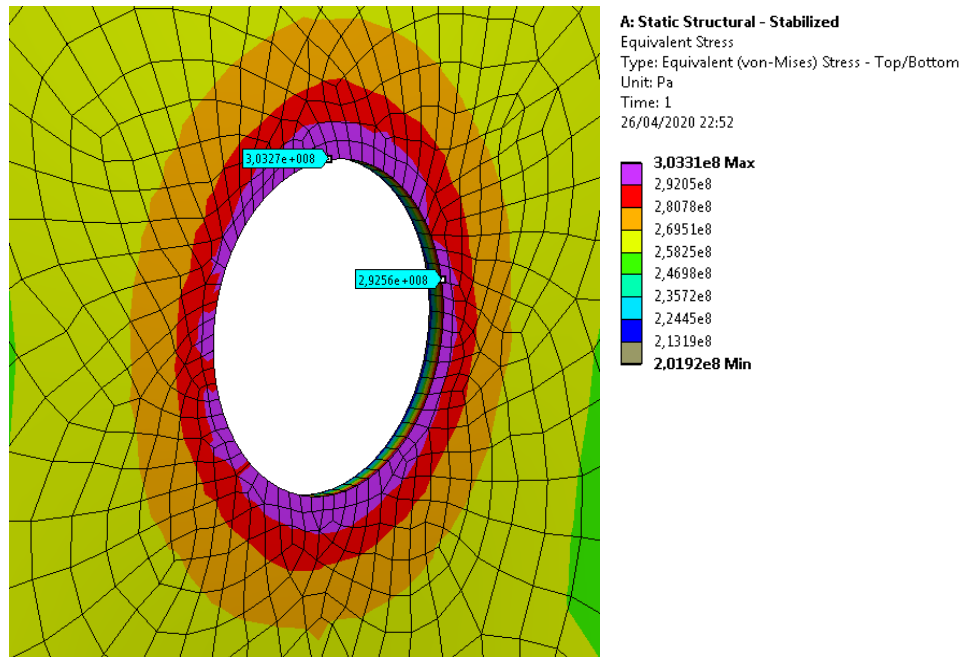


Figura 5. Resultados de tensión de membrana+flexión+ pico para el modelo de caño descentrado.

## Cálculo de tensiones en un modelo de contención completo

En el análisis de la contención en forma completa, esto es, interactuando con todas sus penetraciones, apoyada sobre una base elástica (concreto), y sometida al peso propio de las construcciones internas, requiere un trabajo muy detallado, en el cual, además los tipos de elementos vistos en los modelos simplificados, se debe acudir a la ayuda de elementos sólidos, contacto MPC, fuerza nodal aplicada en forma de fuerza másica (peso propio), además del modelado CAD de toda la estructura, con sus correspondientes soldaduras en donde haya diferencias de espesores, y todos los agujeros correspondientes.

### Geometría

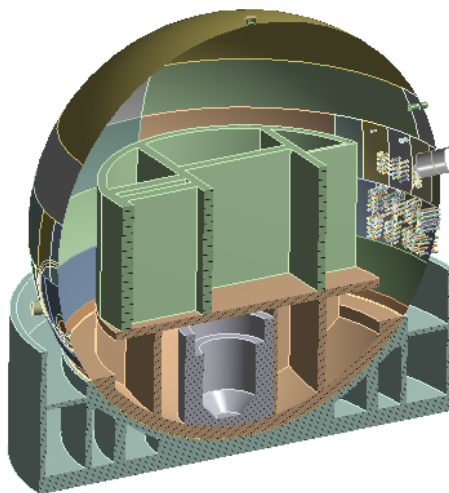


Figura 6. Geometría del modelo completo

En la geometría, se modelaron la contención completa con sus correspondientes divisiones en aquellos lugares donde el espesor se ve reforzado, exclusiva de personal, exclusiva de emergencia, exclusiva de pruebas, apertura de equipos, base cemento, junta, base interior, tubo de protección biológica, construcción superior.

Elemento finito SHELL281 de Ansys

## Resultados



Figura 7. Resultados en un panel de la contención de central nuclear.

En la figura anterior, se puede apreciar la influencia de la proximidad de los agujeros, así como la diferencia en el diámetro de los mismos, teniendo un mapa de tensiones más fiel de lo que pasa en un sistema complejo.

#### Tabla comparativa

Modelo	Membrana [MPa]	Membrana+Flexión [MPa]	Membrana+Flexión+Pico [MPa]
Analítico (fórmula tensión sobre una esfera)	260,42	260,42	260,42
Modelo de lámina axisimétrica	261	301	301
Modelo shells penetración descentrada	260,84	292,56	303,2
Modelo completo (tensión medida en espesor de 30 mm)	251,71	283,97	302,38

Tabla 1: Comparativa de resultados de todos los modelos analizados en el trabajo.

#### Referencias

<sup>i</sup> Göller, B., Krieg, R., Messemer, G., & Wolf, E. (1987). On the failure of spherical steel containments under excessive internal pressure. *Nuclear engineering and design*, 100(2), 205-219.

<sup>ii</sup> Bathe, K. J., & Dvorkin, E. N. (1986). A formulation of general shell elements—the use of mixed interpolation of tensorial components. *International journal for numerical methods in engineering*, 22(3), 697-722.