

ANALISIS ESTRUCTURAL DE LA PILETA DEL REACTOR PARA EL RRRP

José G. Alberro^{*}, Alberto D. Abbate[†]

^{*}INVAP S.E. – Div. Modelística
Perito P. Moreno 1084
8400, Bariloche, R. N., Argentina
e-mail: alberro@invap.com.ar, web page: <http://www.invap.com.ar>

[†]INVAP S.E. – Div. Modelística
Perito P. Moreno 1084
8400, Bariloche, R. N., Argentina
e-mail: aabbate@invap.com.ar, web page: <http://www.invap.com.ar>

Key words: Diseño, Análisis, Elementos Finitos, Pileta del Reactor, INVAP

Abstract. *El propósito de este trabajo es describir el análisis estructural de la Pileta del Reactor perteneciente al RRRP (Replacement Research Reactor Project) construido por INVAP para ANSTO (Australian Nuclear Science and Technology Organisation), que implicó esfuerzos coordinados de diseño, ingeniería, análisis, fabricación y montaje. La Pileta del Reactor es un tanque cilíndrico con agua en su interior el cual se considera un componente vital para el funcionamiento del reactor por contener el tanque reflector con el núcleo, guías de haces de neutrones, chimenea superior, tuberías y estructuras para los diferentes servicios. Dicha pileta se encuentra embebida en el hormigón pesado fijada al mismo mediante anillos rigidizantes y empotrada en su base. Para su estudio se utilizaron programas de elementos finitos comerciales con el fin de calificar el diseño y la construcción de dicha estructura. Mediante modelos se representó la complejidad de su geometría. El análisis fue dividido en dos partes, global y local. En el análisis global se estudia la integridad estructural de la pared de pileta considerando los diferentes estados de carga a los que esta sometida: presión hidrostática, expansión térmica y sismo. En el análisis local se observa el comportamiento estructural de la pileta en puntos específicos debido a la interacción entre componentes donde el criterio fue derivar las cargas directamente al hormigón sin arriesgar la integridad estructural de la pared de pileta. El análisis de presión de agua fue validado con una prueba hidrostática.*

1 INTRODUCCIÓN

El propósito de este trabajo es describir el análisis estructural de la Pileta del Reactor perteneciente al RRRP (Replacement Research Reactor Project) construido por INVAP para ANSTO (Australian Nuclear Science and Technology Organisation) en Sydney Australia, que implicó esfuerzos coordinados de diseño, análisis, fabricación y montaje.

2 DESCRIPCIÓN

El Reactor de Investigación de Reemplazo es una facilidad nuclear de propósitos múltiples: producirá radioisótopos, brindará servicios de irradiación, y en ella se llevarán a cabo investigaciones con haces de neutrones.

El RRR es un reactor de 20 MW de potencia térmica, del tipo de pileta abierta, está enfriado con agua y usa agua pesada como reflector.

En el edificio del reactor se encuentran todos los sistemas nucleares además de las dos piletas, la del reactor en si y la de servicio.

La Pileta del Reactor es una de las principales estructuras que conforman la contención del núcleo y por ende debe cumplir con las siguientes funciones de seguridad: a) asegurar que el Sistema Primario de Enfriamiento disponga de suficiente cantidad de agua (refrigerante) para remover el calor del núcleo por circulación forzada durante operación normal o por convección natural cuando el reactor se encuentra apagado y b) brindar protección por exposición a la irradiación a los operarios.



Figura 1: Piletas de Reactor y de Servicio

La pileta del reactor es un tanque cilíndrico de acero inoxidable de 14 m de altura por 5 m de diámetro.

El tanque se encuentra embebido en un bloque de hormigón pesado, denominado como “Reactor Block”, anclada al mismo mediante anillos rigidizantes y perfiles inferiores.

Las Figuras 2 y 3 muestran imágenes de los planos y las Figuras 4 y 5 de la pileta ya fabricada durante la operación previa al montaje en el Reactor Building.

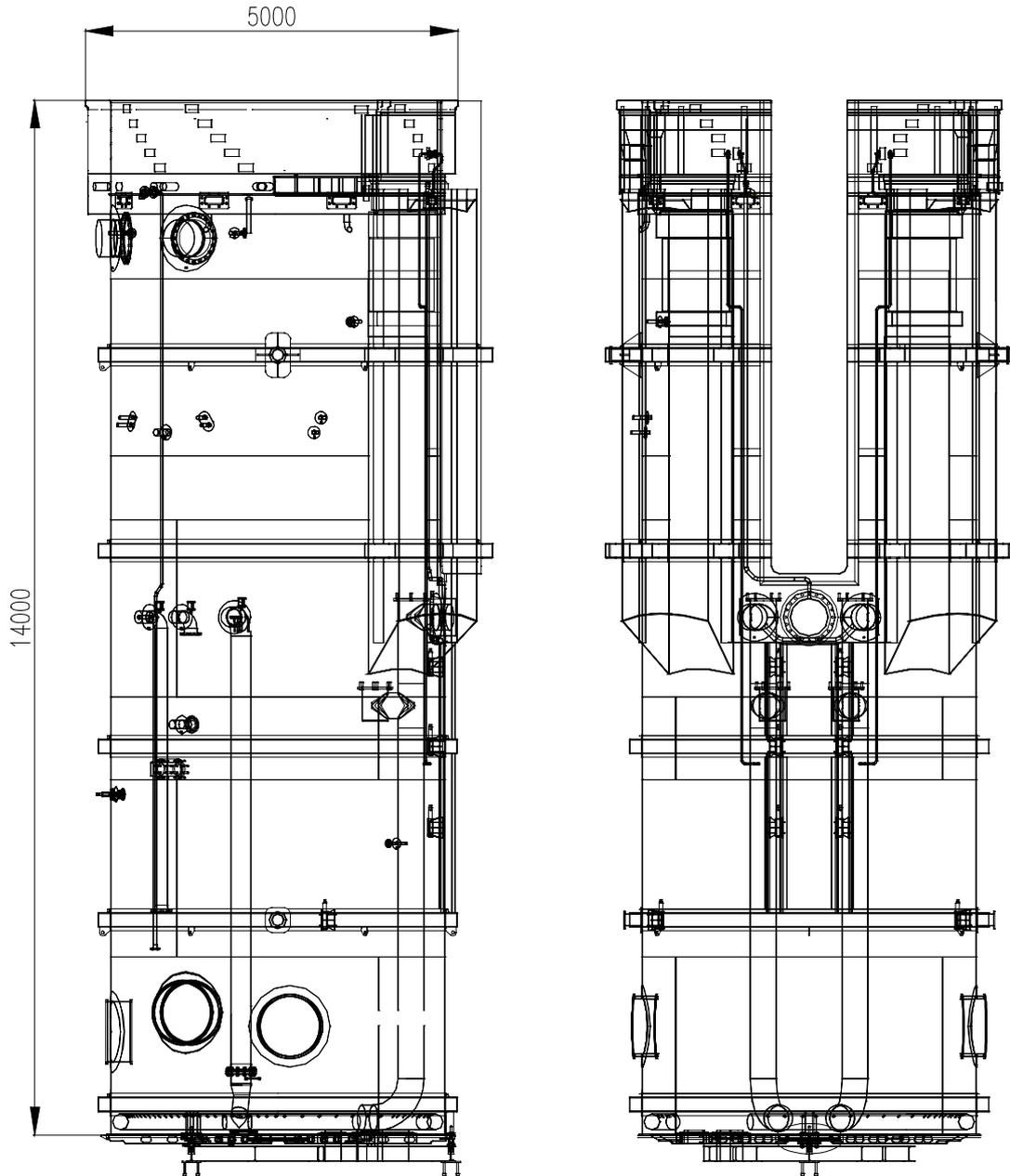


Figura 2: Pileta del Reactor – Vistas

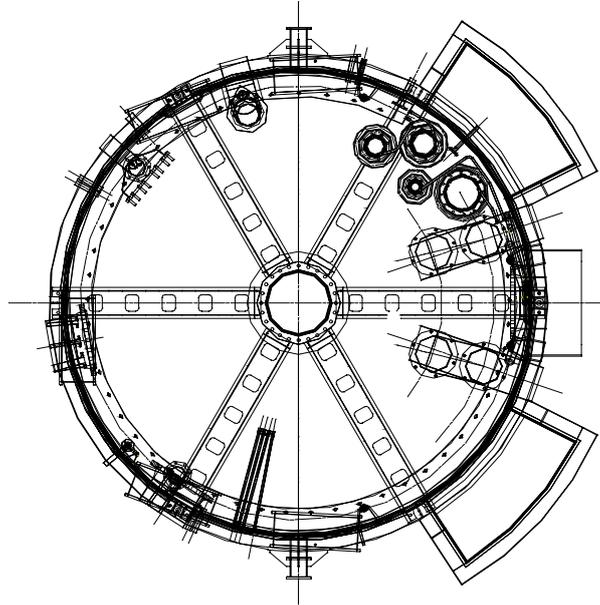


Figura 3: Pileta del Reactor - Planta



Figura 4: Pileta del Reactor fabricada junto al edificio del reactor



Figura 5: Pileta del Reactor fabricada

Se destacan de su diseño:

- Base constituida por una chapa de 12 mm de espesor y 6 perfiles radiales para aportar rigidez y resistencia al fondo de la pileta.
- Cubierta cilíndrica (shell), que forma la contención estanca, de acero inoxidable de 6mm de espesor en forma global
- 5 anillos rigidizantes horizontales (perfiles C) ubicados a diferentes alturas.
- Refuerzos por detrás de chapa de pileta (lado Hormigón) para los soportes internos

encargados de fijar las estructuras. Estos refuerzos están apropiadamente embebidos en el hormigón.

- Penetraciones reforzadas con anillos soldados (ponchos).
- Cámaras de alojamiento de las tuberías del sistema de transporte neumático.
- Las principales penetraciones de procesos se ubican por encima del nivel rompe sifón (prevención de LOCA).
- Canal de ventilación, instrumentación y de desborde en la zona superior.
- Canal de transferencia para conexión con la pileta de Servicio.

La Pileta contiene componentes vitales para el funcionamiento del reactor como son:

- Núcleo y sus estructuras asociadas
- Tanque reflector con sus posiciones de irradiación
- Riser (conduce el agua del primer sistema de enfriamiento y aloja las guías de las placas de control).
- Tubos guía de haces de neutrones
- Fuente fría de neutrones
- Tubería
- Estructuras para los diferentes servicios

En la figura 6 se muestran los distintos componentes dentro de la Pileta; en el centro está el tanque reflector con el núcleo y la chimenea, en la parte de abajo se encuentran las tuberías del sistema de refrigeración primaria y las tuberías para los neumáticos. A los costados se ven los racks de almacenaje y por debajo de ellos se pueden observar los tubos guías de haces de neutrones.

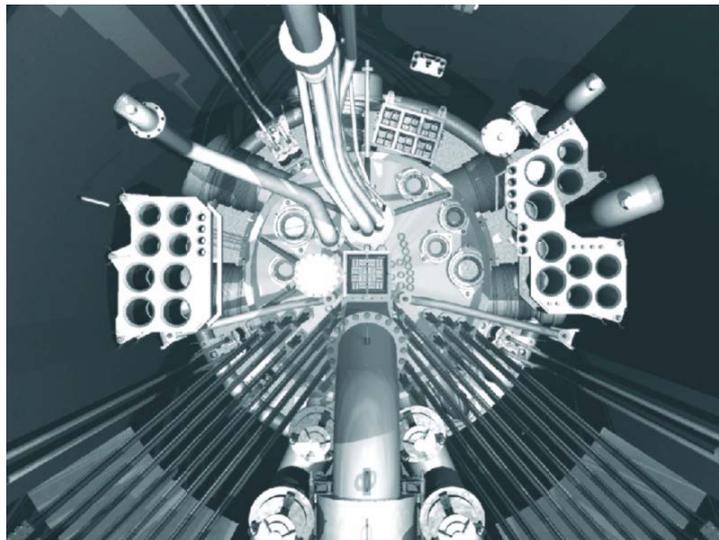


Figura 6: Vista superior: Componentes dentro de la Pileta del Reactor

3 ANÁLISIS

3.1 Introducción

El análisis de la Pileta del Reactor consiste en la demostración de la integridad estructural de la misma para los siguientes estados de carga:

- Evento sísmico
- Presión hidrostática montado
- Prueba hidrostática
- Expansión térmica (operación normal y distintas condiciones especiales)
- Solicitaciones locales en apoyos por sismo, impacto, izaje.

Para realizar el análisis del comportamiento estructural de la Pileta se utilizaron programas de elementos finitos comerciales (códigos Ansys y Nastran) y cálculos analíticos para establecer órdenes de magnitud y comparar resultados.

Mediante modelos se representó la complejidad de su geometría, tales como: penetraciones para tuberías, cámaras para ingreso de tuberías neumáticas, abertura que permite la comunicación con el canal de transferencia.

El análisis estructural fue dividido en dos partes, global y local.

En el análisis global se estudia la integridad estructural de la pared de pileta (6 mm de espesor) considerando los diferentes estados de carga a los que esta sometida: presión hidrostática, expansión térmica (operación normal y distintas condiciones especiales) y sismo.

En el análisis local se examina el comportamiento estructural de la pileta en puntos específicos debido a la interacción entre componentes (tuberías, soportes internos de estructuras, anillos rigidizantes, canal de ventilación, instrumentación y desborde).

Con respecto a las cargas concentradas (acometidas de tuberías, soportes de estructuras de gran magnitud) el concepto fue derivar las mismas directamente al hormigón sin arriesgar la integridad estructural de la pared pileta.

Las tensiones obtenidas fueron comparadas con los valores admisibles requeridos por el código ASME Boiler and Pressure Vessel Code teniendo en cuenta los diferentes niveles de servicio (A, B, C y D). Los niveles de servicio se basan en las condiciones en que queda un componente luego de haber sido solicitado por un cierto estado de carga (sin daño, reparación, remoción, etc.). Para el caso de la pileta se establecieron los siguientes:

Solicitud	Nivel de servicio
Presión hidrostática montado	A
Prueba hidrostática	A
Expansión térmica (operación normal)	A
Evento sísmico	B
Expansión térmica (transitorios)	B
Expansión térmica (accidente)	D

Tabla 1: Niveles de servicio

El análisis de presión de agua fue validado con una prueba hidrostática.

3.2 Modelo de EEFF

Mediante modelos se representó la complejidad de su geometría, tales como: penetraciones para tuberías, cámaras para ingreso de tuberías neumáticas, abertura que permite comunicación con canal de transferencia.

El modelo fue construido con los programas Ansys y Nastran y se presenta en Figura 7, Figura 8, Figura 9 y Figura 10. Se utilizaron elementos de cáscara rectangulares y triangulares.

Se consideraron los siguientes componentes:

- Chapa cilíndrica
- Chapa piso
- Canal de ventilación, instrumentación y desborde
- Cámaras para las tuberías neumáticas
- Refuerzos para las cámaras
- Canal de transferencia
- Refuerzos para canal de transferencia
- Anillos rigidizantes y chapa de interface
- Refuerzos para penetraciones
- Blindajes

Se incluyen las siguientes penetraciones:

- Abertura para canal de transferencia
- Abertura para las tuberías del sistema neumático
- Penetraciones para el Sistema de enfriamiento del núcleo
- Penetraciones para los servicios de la Fuente fría de neutrones
- Penetraciones de servicios para fuente caliente
- Penetraciones para los tubos guía de haces de neutrones
- Penetración para los mecanismos de control

No fueron incluidas en el modelo las penetraciones de diámetro menor a 350 mm. La razón de esta metodología es que las mismas no pueden ser representadas correctamente debido a la discretización del modelo. Por esta causa, estas penetraciones fueron estudiadas localmente en forma separada utilizando modelos de detalle.

Las penetraciones para instrumentación y drenaje tampoco se modelaron pues las mismas son muy pequeñas y no introducen tensiones locales significativas.

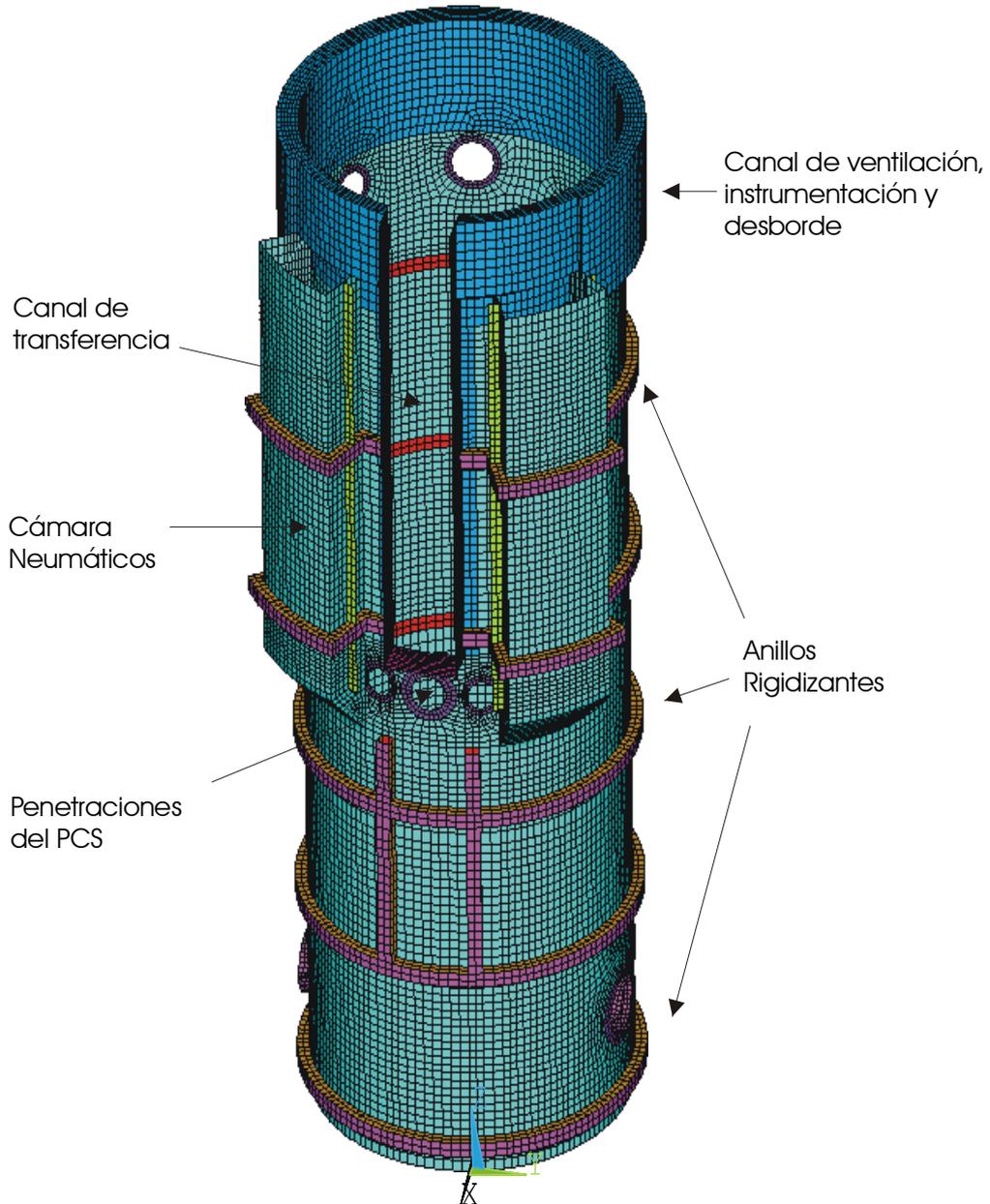


Figura 7: Modelo de EEFF

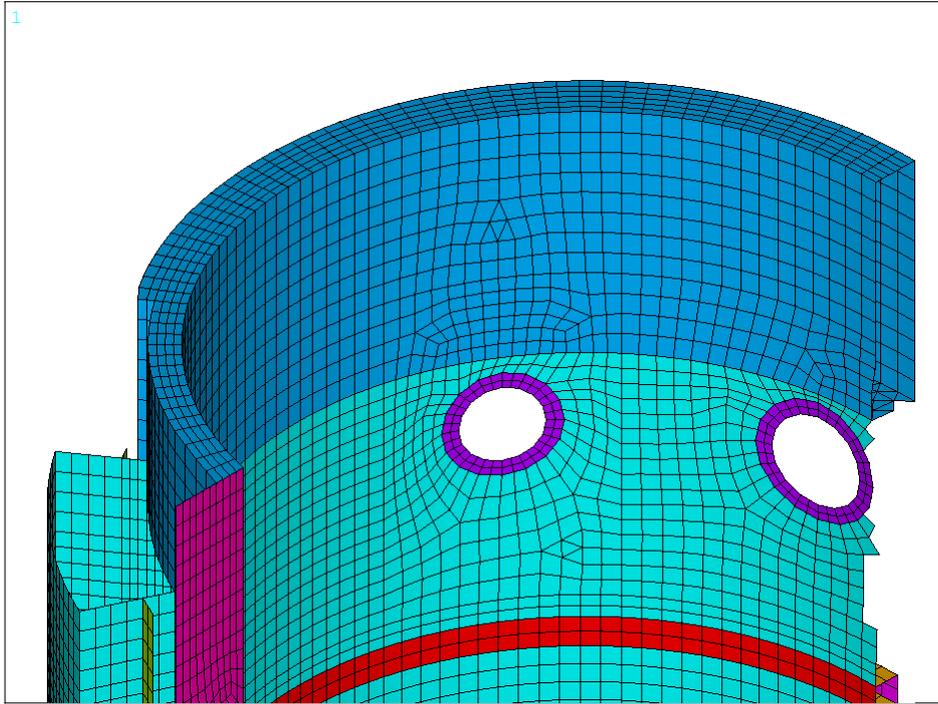


Figura 8 – Modelo de EEFF: Penetraciones de Servicios

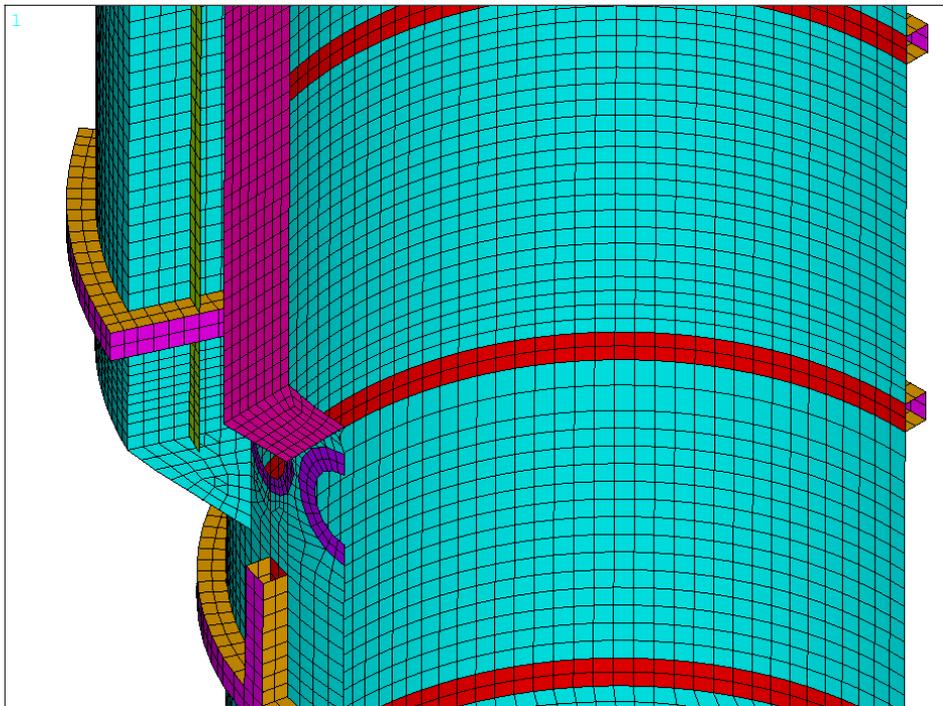


Figura 9 – Modelo de EEFF: Zona central, Canal de transferencia y Cámara del sistema de transporte neumático

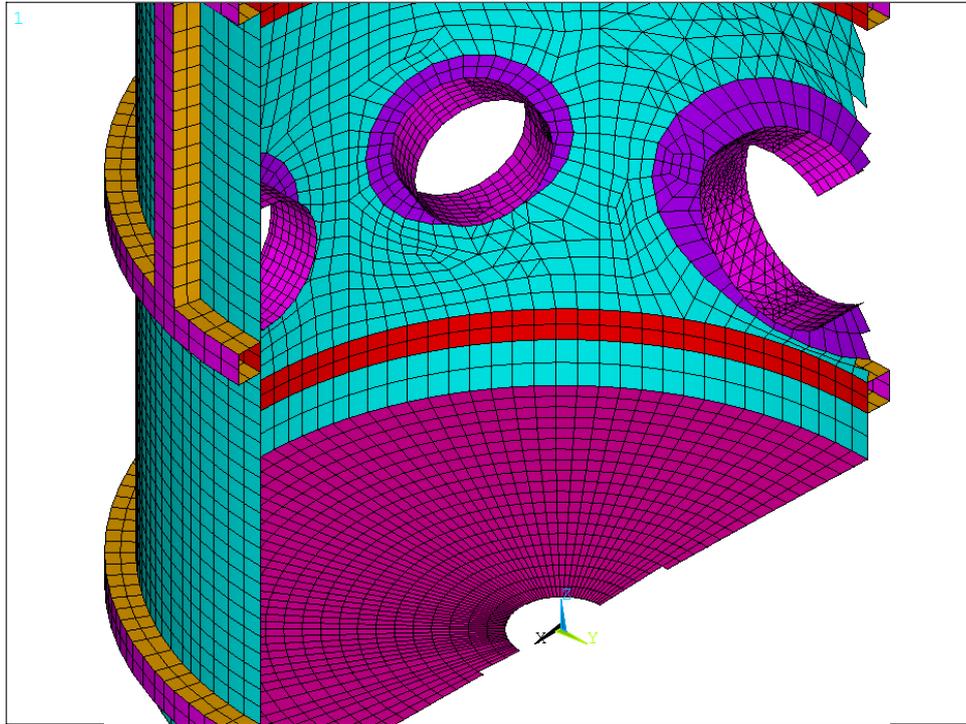


Figura 10: Modelo de EEFF – Penetraciones de los tubos guía de neutrones

3.3 Condiciones de Contorno

El modelo de elementos finitos de la Pileta del Reactor fue calculado teniendo en cuenta las condiciones de carga que se listan a continuación:

- Evento sísmico
- Presión hidrostática
- Expansión térmica
- Solicitaciones locales en apoyos

Evento sísmico

La Pileta es un componente categoría sísmica 1 y, como tal, debe soportar las aceleraciones correspondientes al sismo severo (safe shutdown earthquake), que son las máximas aceleraciones definidas para el reactor.

La Pileta del Reactor esta rígidamente vinculada al bloque del Reactor (la pileta es usada directamente como encofrado durante el hormigonado del block), lo que significa que ésta se mueve en forma conjunta con el block. De esta forma, las máximas tensiones debido al Evento Sísmico estarán dadas por las máximos desplazamientos del block del reactor. En otras palabras, el Evento Sísmico es analizado cargando en el modelo desplazamientos impuestos.

En la Figura 11 se representa el diagrama de desplazamientos impuestos (por el block del

reactor) para una de las direcciones horizontales. A su vez, estos desplazamientos impuestos provienen de un modelo de análisis del edificio completo.

Se aplican los desplazamientos impuestos para las dos direcciones horizontales y luego se combinan linealmente para obtener los resultados.

Con respecto a las restricciones o vínculos para el modelo, se consideró que durante la deformación de la pileta los anillos rigidizantes se mantienen horizontales (Figura 12).

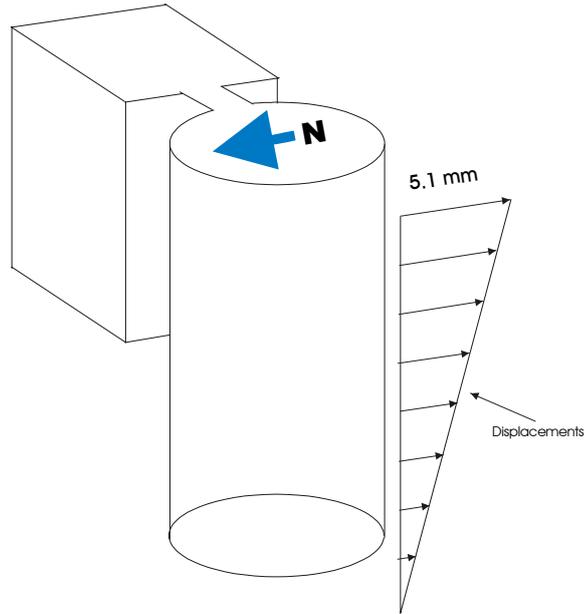


Figura 11: Esquema de desplazamientos impuestos para Evento Sísmico

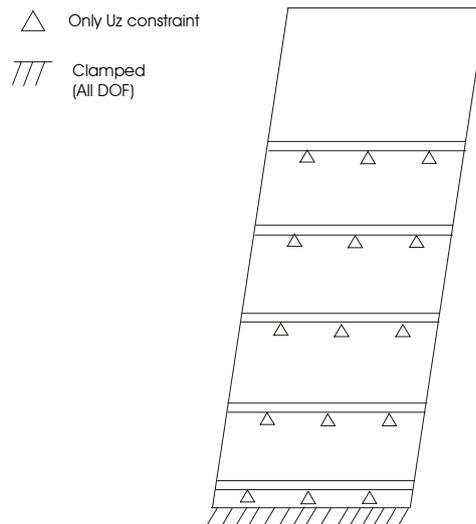


Figura 12: Esquema de vinculación para Evento Sísmico

Presión hidrostática

La Pileta del Reactor debe soportar la presión hidrostática (esquema de presión presentado en Figura 13) bajo dos situaciones:

- Montado (Operación Normal):** La Pileta esta embebida y rígidamente restringida en el piso, anillos rigidizantes, canal de transferencia y penetraciones.
- Prueba hidrostática:** La pileta solo esta apoyada en el piso. Se diseñaron estructuras de refuerzo ya que el canal de transferencia es una abertura que por su tamaño debió estar cerrada y reforzada durante la prueba. En la Figura 19 se pueden observar los refuerzos de la pileta ya construida.

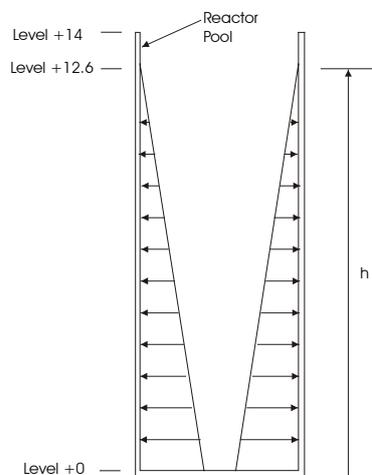


Figura 13: Esquema de carga para presión hidrostática

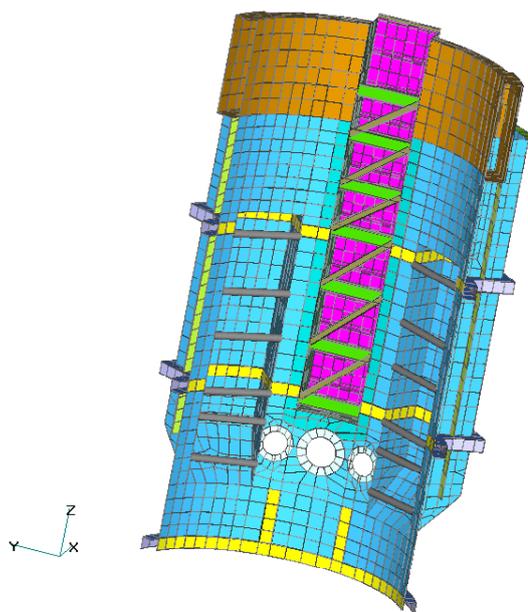


Figura 14: Modelo de EEF – Refuerzos en canal y cámaras para prueba hidrostática

La máxima presión (en el fondo de la pileta) es de 12.6 ton/m².

Si bien en rigor la shell de la pileta está “apoyada” en el hormigón del Reactor Block con lo cual sería el hormigón el que resiste el empuje horizontal del agua, se diseñó y verificó la pileta despreciando dicho soporte estructural del hormigón y confiando la resistencia a la presión hidrostática solamente a la pileta.

Expansión térmica

En la Tabla 2 se presentan las temperaturas correspondientes a los diferentes casos de carga, nombrados como: “normal operation”, “anticipated operational transient” y “accident condition”.

Bajo estos casos de carga se producen tensiones en la Pileta puesto que la misma no se puede expandir libremente por estar embebida en el bloque del reactor. El coeficiente de expansión térmica del Acero Inoxidable es 1.55e-05 m/m°C mientras que para el Hormigón es 1.00e-05 m/m°C además de estar el block vinculado al resto de edificio. Esto hace que, ante un calentamiento, la pileta se dilata más que el hormigón por lo que se generarán tensiones de compresión en la shell.

En el análisis además se incorpora la expansión del bloque del reactor. Para considerar los desplazamientos del bloque del reactor se llevó a cabo un modelo de elementos finitos del mismo (Figura 16).

La metodología de análisis de la expansión térmica es la siguiente:

- a) Se analiza la Pileta absolutamente restringida y sometida a las diferentes temperaturas. En este caso se obtienen las tensiones máximas debido al confinamiento total de la pileta.
- b) Se aplican en la pileta los desplazamientos impuestos por la expansión del bloque del reactor (debido a las temperaturas de los diferentes casos de carga).
- c) Finalmente, se suman estos dos casos de carga y de esta forma se obtienen las tensiones resultantes, es decir que las tensiones del caso a) se reducen.

Condition	Region A	Region B	Region C	Time
<i>Assembly / Maintenance</i>	20°C	20°C	20°C	Steady
<i>1.Normal Operation</i>	50°C	38°C	38°C	Steady
<i>2.Anticipated Operational Transient (Loss of SCS with FSS)</i>	50°C	45°C	40°C	0.5 h
<i>3.Accident Condition (Loss of SCS with SSS)</i>	90°C	90°C	60°C	30 h
<i>4.Accident Condition (LOCA)</i>	100°C (steam + air)	100°C (water level +5.85m)	60°C	5 h

Tabla 2: Expansión térmica

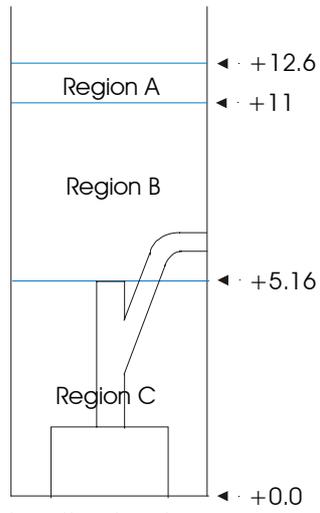


Figura 15: Regiones de aplicación de temperaturas – niveles en [m]

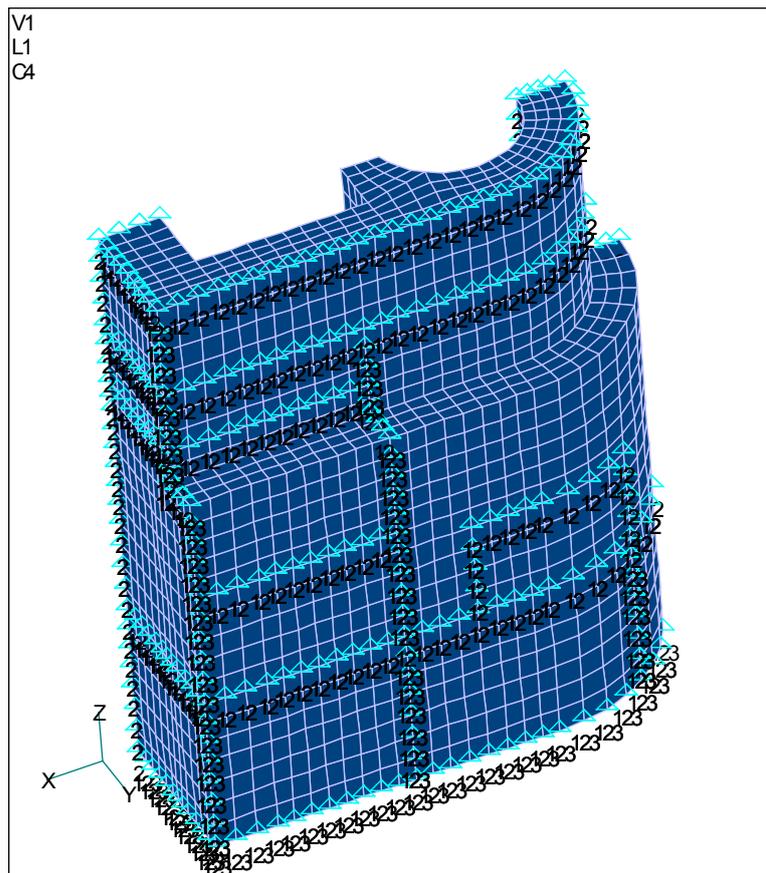


Figura 16: Modelo de EEFF del bloque del reactor

Solicitaciones locales en apoyos

Se diseñaron soportes para las estructuras internas de pileta, tales como el riser, los racks para combustibles y muestras a irradiar, los racks de instrumentación nucleónica y otros.

Para el análisis de los mismos se construyeron modelos de elementos finitos locales de detalle como el que se muestra en la Figura 17.

El criterio para el diseño de los mismos fue el de transferir las cargas directamente al bloque de hormigón y de este modo no solicitar la pared de pileta donde los mismos van soldados. Para cumplir dicho objetivo se diseñaron estructuras por detrás de la pared de pileta en coincidencia con la posición de los soportes las cuales quedan embebidas en el hormigón. En la Figura 18 se muestra un plano del soporte y su correspondiente refuerzo y en las Figura 19 y Figura 20 se pueden ver los mismos ya fabricados.

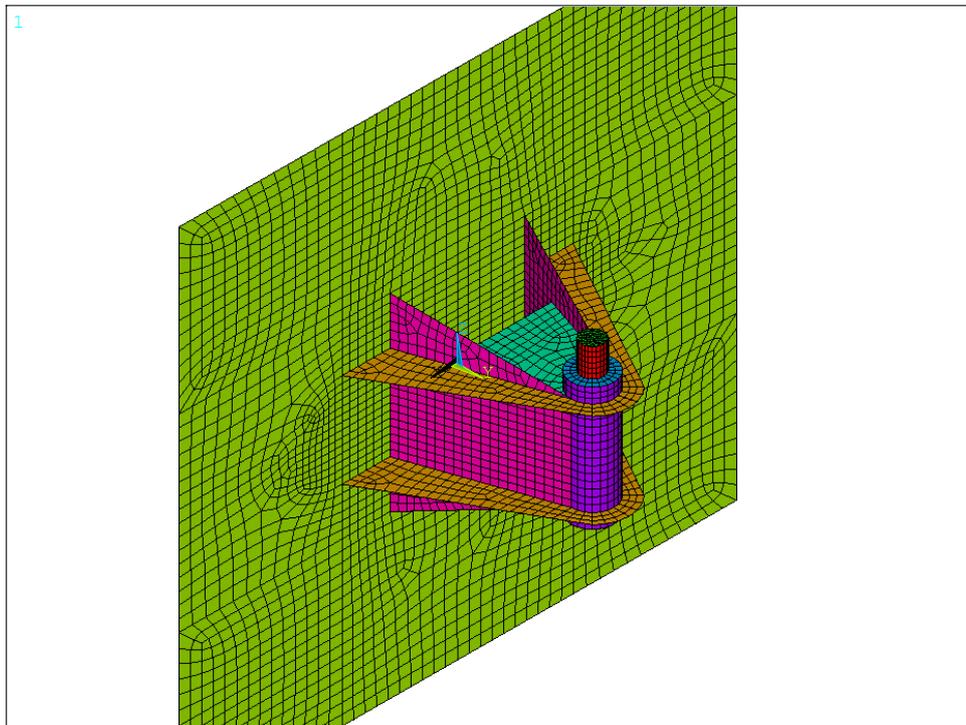


Figura 17: Modelo de EEF de soporte

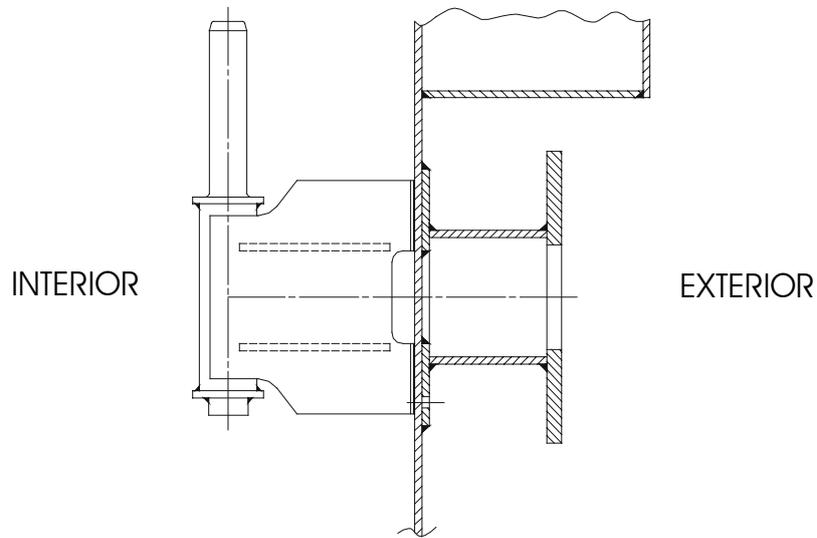


Figura 18: Refuerzos para soportes

También se diseñaron estructuras internas para soportar la prueba de presión hidrostática (sin respaldo del Reactor Block) y solicitaciones durante el transporte. Dichos refuerzos se muestran en Figura 19 y los mismos fueron modelados para confirmar su diseño.



Figura 19 – Interior de la pileta: soportes internos soldados en la chapa cilíndrica y refuerzos para transporte y prueba hidrostática



Figura 20: Soportes por detrás de la pared de pileta

3.4 Resultados

Las tensiones obtenidas fueron comparadas con los valores admisibles requeridos por el código ASME Boiler and Pressure Vessel Code teniendo en cuenta los diferentes niveles de servicio (A, B, C y D).

En las siguientes figuras se muestran gráficos de tensiones y desplazamientos para diferentes estados de carga.

Los resultados corresponden a los casos de cargas individuales mas las correspondientes combinaciones de casos.

Se confirma que las tensiones máximas están por debajo de los valores admisibles requeridos por el código ASME Boiler and Pressure Vessel Code.

Para validar el análisis de presión se realizó una prueba hidrostática la cual resulto exitosa.

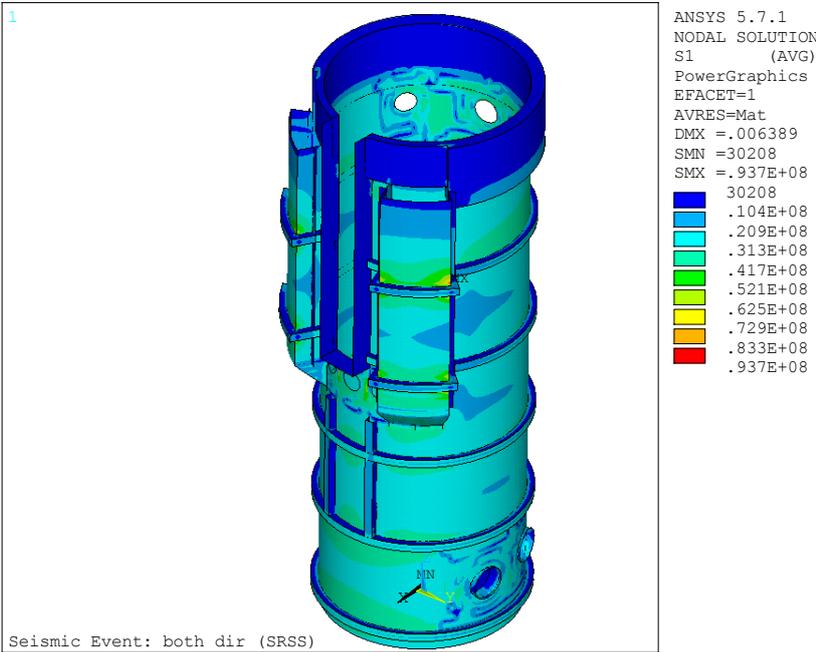


Figura 21: Evento Sísmico - Máximas tensiones principales [Pa]

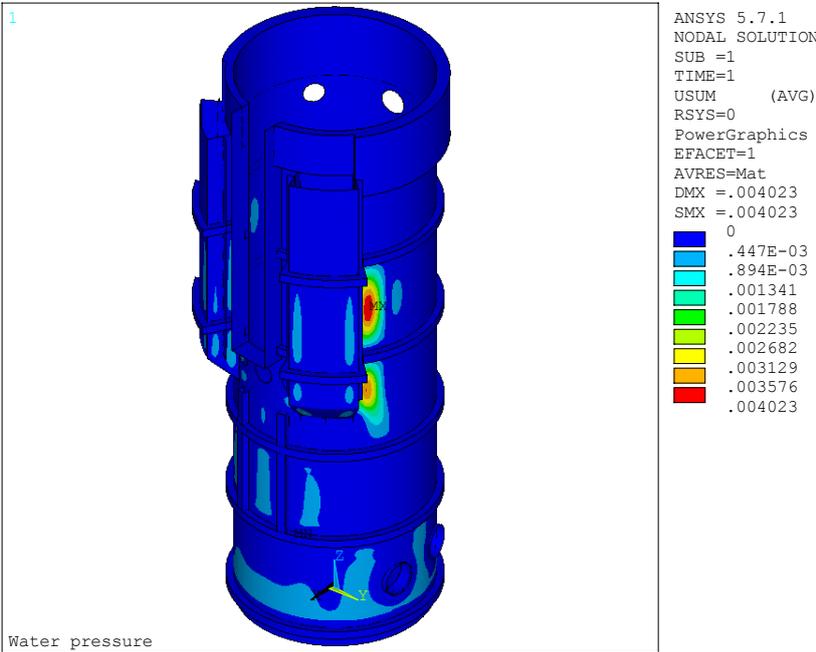


Figura 22: Presión hidrostática (operación normal) – Máximos desplazamientos [m]

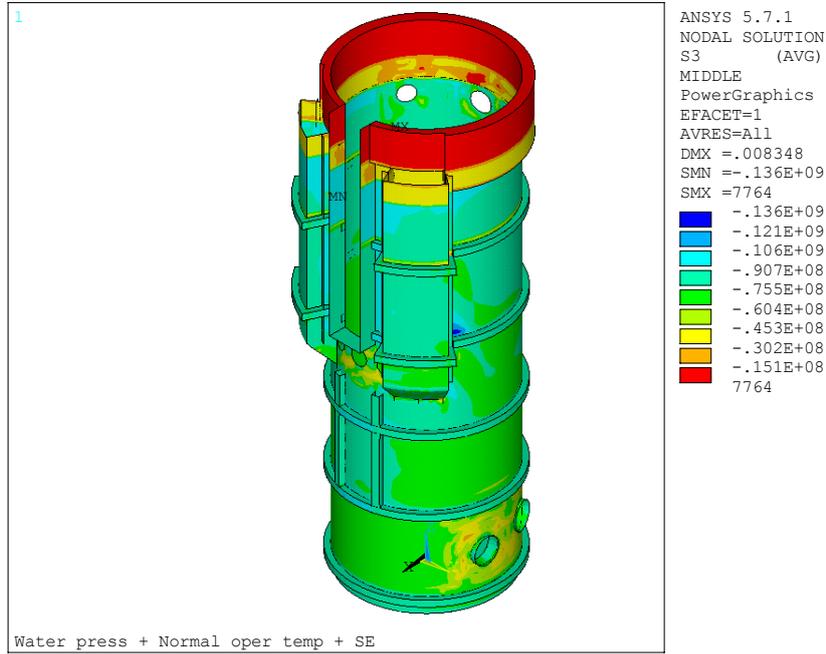


Figura 23: Caso combinado de cargas; Presión hidrostática + expansión térmica + sismo – Tensiones máximas principales [Pa]

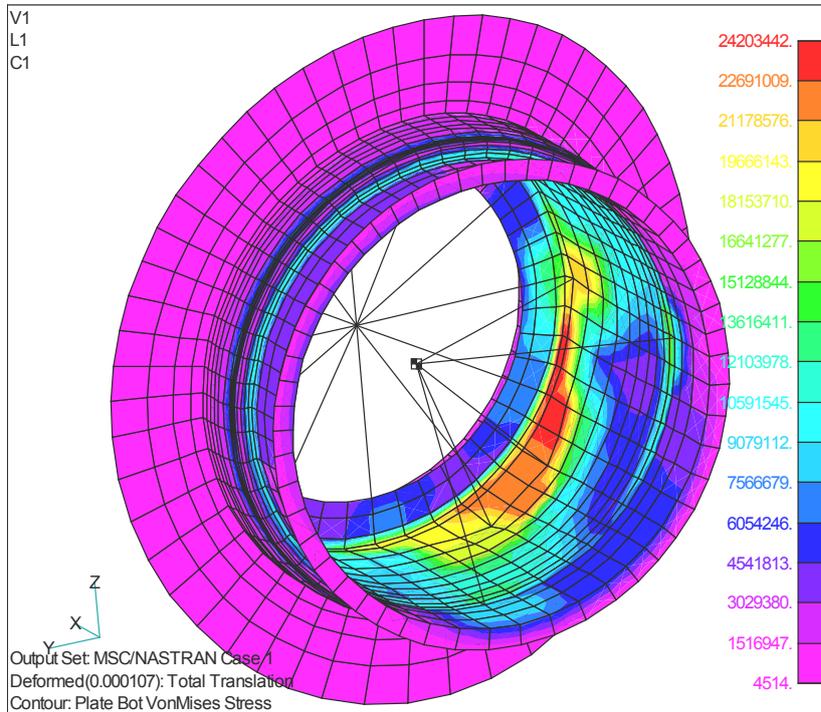


Figura 24: Modelo de detalle penetraciones de los tubos guía de neutrones - Sismo – Tensiones máximas principales [Pa]

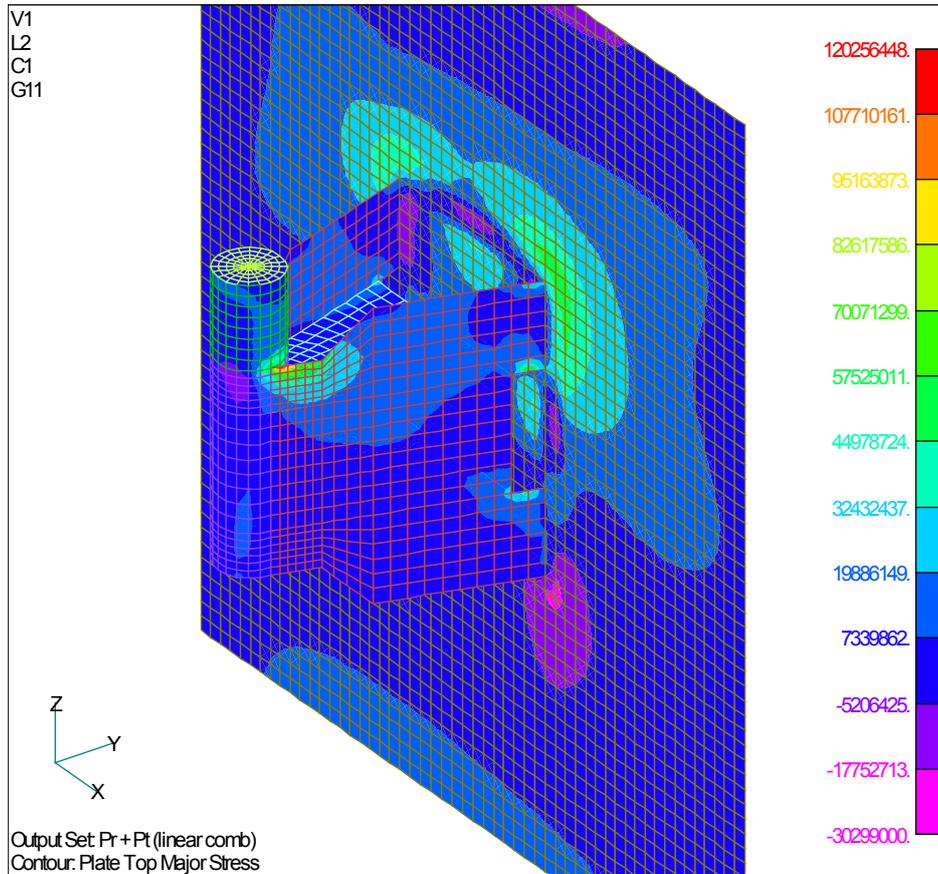


Figura 25: Soporte tipo D utilizado para rack de instrumentación nucleónica – Tensiones máximas principales [Pa]

4 CONCLUSIONES

La pileta del reactor fue analizada mediante modelos de elementos finitos, con los cuales se llevaron a cabo la asistencia al diseño y la calificación estructural de la misma.

La Pileta del Reactor fue evaluada bajo evento sísmico, presión hidrostática y expansión térmica.

Todas los casos de carga y sus combinaciones son adecuadamente resistidos por su estructura de acuerdo a los valores admisibles requeridos por el código ASME Boiler and Pressure Vessel Code.

Para validar el análisis de presión de agua fue realizada una prueba hidrostática.