

## MODELADO 3D DEL CONJUNTO RPV DE CNAI Y SIMULACIÓN DE ACCIDENTE LOCA05A

### INSTRUCTIONS TO PREPARE AN ARTICLE ACCORDING TO THE AMCA-STYLE

**Santiago M. Rabazzi<sup>a</sup>, Alejandro E. Albanesi<sup>b</sup>, Javier W. Signorelli<sup>a</sup>**

<sup>a</sup> *Instituto de Física de Rosario, Universidad Nacional de Rosario, CONICET, Av. 27 de Febrero 210bis, Rosario, Santa Fe, Argentina, <http://www.ifir-conicet.gov.ar>*

<sup>b</sup> *Centro de Investigación de Métodos Computacionales (CIMEC), CONICET/UNL, Predio CONICET Santa Fe - Colectora Ruta Nac Nro 168, Paraje El Pozo, Santa Fe, Argentina, <http://www.cimec.org.ar>*

**Palabras clave:** Instrucciones, estilo AMCA, Mecánica Computacional, artículo.

**Resumen.** Este trabajo presenta el desarrollo de un modelo computacional tridimensional de elementos finitos para el recipiente a presión del reactor nuclear CNAI. Como caso de aplicación, se muestra una configuración de un evento transitorio termomecánico que implica un enfriamiento rápido manteniendo presiones elevadas, también conocido como Choque Térmico Presurizado (PTS). El análisis de elementos finitos se llevó a cabo utilizando Code-Aster. Este comenzó con un estudio termoelástico, acoplando los resultados térmicos basados en Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) a un modelo global. Posteriormente, se realizó submodelo en la región de la boquilla de alimentación, empleando un modelo elastoplástico con endurecimiento no lineal isotrópico. Finalmente, se calcularon las tensiones resultantes en distintos ángulos a lo largo del radio interior de la boquilla, con el propósito de calcular el Factor de Intensidad de Tensiones (SIF) para fisuras.

**Keywords:** Instructions, AMCA style, Computational Mechanics, article.

**Abstract.** This work presents the development of a three-dimensional finite element computational model for the pressure vessel of the CNAI nuclear reactor. As an application case, it showcases a configuration of a thermomechanical transient event involving rapid cooling while maintaining elevated pressures, also known as Pressurized Thermal Shock (PTS). The finite element analysis was conducted using Code-Aster. It began with a thermoelastic study, coupling thermal results based on Computational Fluid Dynamics (CFD) to a global model. Subsequently, a submodel was performed in the feed nozzle region, employing an elastoplastic model with isotropic nonlinear hardening. Finally, resultant stresses were calculated at various angles along the inner radius of the nozzle to determine Stress Intensity Factors (SIF) for potential cracks.

## 1 INTRODUCCIÓN

El Recipiente de Presión o Reactor Pressure Vessel (RPV) es el encargado de soportar todos los conjuntos internos de la Central Nuclear Atucha I (CNAI), como Tanque de Moderador (MT), Canales Combustibles, Barras de Control, Cuerpos de Rellenos, Lanzas de Inyección, etc. Así mismo, contiene al fluido moderador y sistemas de cañerías que componen los circuitos de refrigeración primario (boquillas) y secundario (toroides).

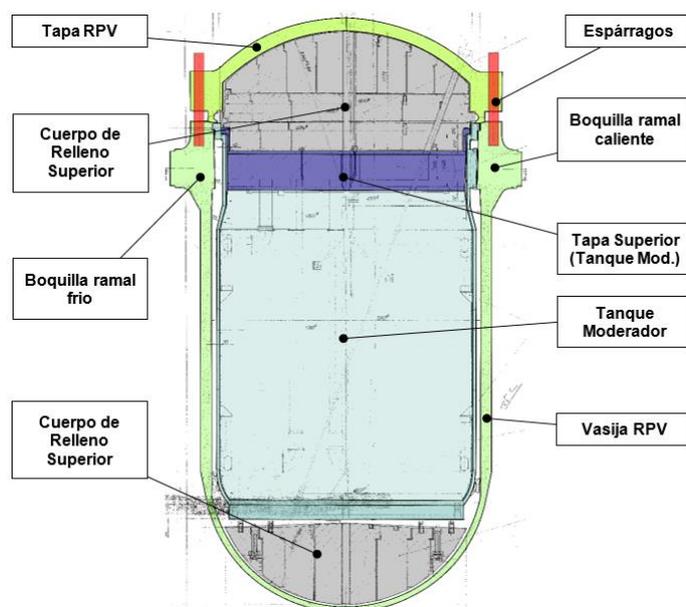


Figura 1: Descripción conjuntos reactor nuclear CNAI

En la Figura 1 se muestran los principales componentes del reactor nuclear CNAI. Como se observa, la Tapa de Cierre del RPV se encuentra sujeta mediante espárragos a la Vasija del RPV. La debida precarga suministrada evita la descompresión del conjunto a presión y, a su vez, mantiene en posición al Tanque y Tapa del Moderador, Tapa de Cierre RPV y Cuerpos de Relleno Superior.

El presente trabajo tiene por objetivo mostrar el desarrollo de un modelo computacional de elementos finitos 3D del recipiente de presión de CNAI. Como caso de aplicación se muestra la configuración de un evento transitorio termomecánico que combina enfriamientos rápidos manteniendo presiones elevadas, también conocidos como Presurized Thermal Shock (PTS).

El modelado de las piezas, como el mallado de las mismas, se realizaron con los módulos de diseño contenidos en el software Salome\_Meca 2019/2021. El estudio por elementos finitos se realizó en Code-Aster (14.4.0).

Se realizó primeramente un estudio termoelástico, acoplando resultados CFD a un modelo global. Posteriormente, se realizó un análisis puntual (submodelo) en la región de la boquilla de alimentación, con un modelo elastoplástico con endurecimiento no lineal isotrópico.

## 2 DESARROLLO

### 2.1 Descripción del transitorio

En una central nuclear existen sistemas de seguridad que se activan en caso de un accidente de pérdida de fluido refrigerante o Loss of Coolant Accident (LOCA). Dos de estos sistemas lo constituyen el tanque Acumulador y las bombas del sistema integral de protección (SIP). El primero de estos actúa como reserva de fluido de refrigeración asegurando la reposición del

volumen de líquido perdido, mientras el segundo de estos sistemas garantiza la circulación del fluido evitando sobrecalentamientos.

Ambos sistemas inyectan fluido refrigerante en distintos puntos del Loop Seal, esto es, en la cañería de salida del generador de vapor, previo a la bomba principal. El propósito de la inyección de agua es desplazar el agua caliente presente en el Loop Seal y en la bomba hasta alcanzar la rama fría que está conectada al recipiente de presión (RPV). Durante este recorrido, el agua se va enfriando debido al intercambio de calor con las estructuras circundantes, como las tuberías y la bomba principal, y se mezcla con el agua existente antes de llegar a la rama fría.

La inyección de los acumuladores comienza a los 535 segundos y finaliza a los 1600 segundos, mientras que las inyecciones de los SIP comienzan a los 1217 segundos y no se interrumpen durante el transitorio. Se seleccionan instantes específicos y relevantes para el estudio en la boquilla del recipiente de presión. Los mismos se resumen a continuación:

INST	Detalle
0	Condición normal.
105	Salto de presión significativo.
505	Salto térmico debido a inyección de Acumuladores.
605	Evolución transitoria intermedia.
1005	Evolución transitoria intermedia.
1305	Salto térmico debido a inyección de bombas SIP.
1705	Evolución transitoria final.
1905	Evolución transitoria final (último instante de cálculo).

Tabla 1: Instantes de cálculo seleccionados

La elección de los instantes responde a instantes relevantes de la evolución del transitorio, la Figura 2 muestra evolución de la presión y la temperatura (datos de entrada) evaluadas en un punto en el radio interior de la boquilla rama fría en estudio.

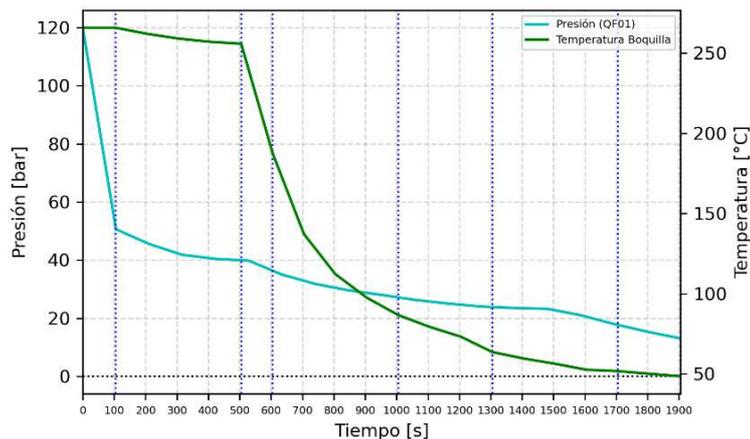


Figura 2: Evolución de la presión y la temperatura interior en la rama fría del recipiente de presión.

## 2.2 Geometría

Considerando la simetría del modelo se optó por simular un cuarto del conjunto RPV. El mismo contiene una de las boquillas de la rama fría (BRF). Los planos y la información de diseño pertinente fueron provistas por Nucleoeléctrica Argentina S.A. (NA-SA).

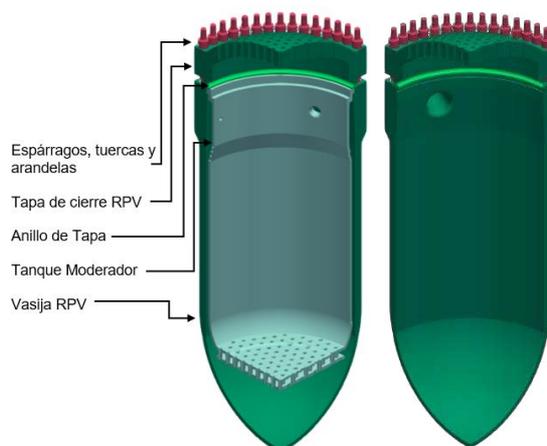


Figura 3: Vista de piezas modeladas para la simulación. Der: Se quitó el tanque del Moderador para visualizar la boquilla en estudio.

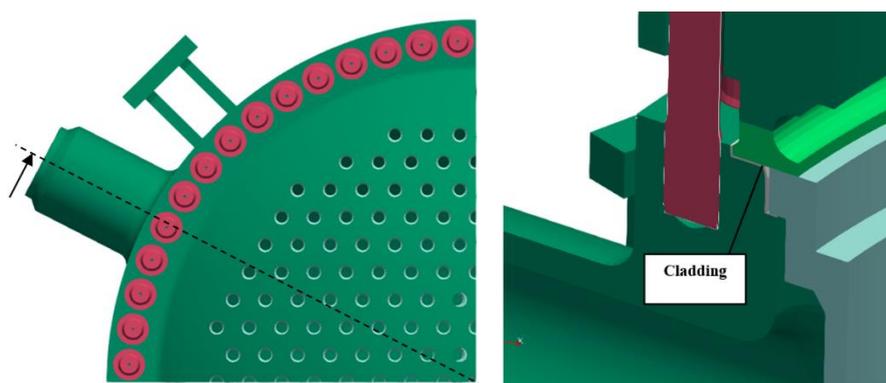


Figura 4: (Izq.) Vista superior del conjunto RPV. (Der.) Vista de corte longitudinal a la boquilla, para detalle de asientos y *cladding*.

Tal como es posible observar, los cuerpos de relleno (superior e inferior), Tapa Superior del Tanque del Moderador, Canales Combustibles y demás internos, no se tuvieron en cuenta en el modelo de elementos finitos. No obstante, se incluyeron los mismos mediante algún tipo de condición de borde mecánica que replica su efecto según se detalla posteriormente.

Se incluyó la Tapa de Cierre del RPV a fin de caracterizar correctamente la influencia de los espárragos con su debida precarga, en la zona de la boquilla. Tanto la cara interna de la vasija del RPV como la Tapa de Cierre están recubiertas por una capa de 5 [mm] de acero austenítico, que actúa como protector contra la corrosión. Este recubrimiento o *cladding* se tuvo en cuenta de forma parcial, únicamente en la zona del asiento del Tanque Moderador, a fin de satisfacer condiciones de diseño y contacto. El peso propio aportado por esta capa en todo el conjunto es despreciable y no se tuvo en cuenta en la simulación. Así mismo, el campo de temperatura aplicado es resultado calculado en el material base del RPV.

### 2.3 Mallado

Una vez realizados los diseños en software paramétrico se procedió a realizar el mallado o discretización en elementos finitos de los componentes. La experiencia indica que las mallas con mayor número de elementos 3D hexaédricos por sobre tetraedros tienen mejor desempeño

en estudios termo mecánicos.

No obstante, esto insume mayor tiempo de trabajo a la vez que se requieren ciertos criterios de mallado y posterior configuración del análisis. Es necesario particionar las distintas piezas en subdominios para facilitar su mallado, priorizando planos de simetría, superficies de revolución, etc. Atendiendo a las consideraciones detalladas, se generaron distintas mallas enteramente con elementos 3D, como se observa a continuación. Se incluye cantidad de nodos y elementos 3D resultantes:

Componente	Nodos	Tetraedros	Hexaedros	Pirámides	Prismas
<i>Asiento RPV</i>	439,951	0	413,023	0	0
<i>Espárragos y tuercas</i>	404,527	328,470	283,860	16,560	360
<i>Tanque Moderador</i>	245,333	0	197,456	0	1,940
<i>Virola RPV Inferior</i>	123,677	0	102,600	0	2,970
<i>Tapa RPV</i>	120,939	0	101,568	0	3,024
<i>Soporte Radial</i>	10,082	0	7,492	0	0
<i>Anillo de estanqueidad</i>	7,280	0	5,400	0	0
<b>Total</b>	<b>1,351,789</b>	<b>328,470</b>	<b>1,111,399</b>	<b>16,560</b>	<b>8,294</b>

Tabla 2: Resumen componentes por subdominios de malla de elementos finitos.

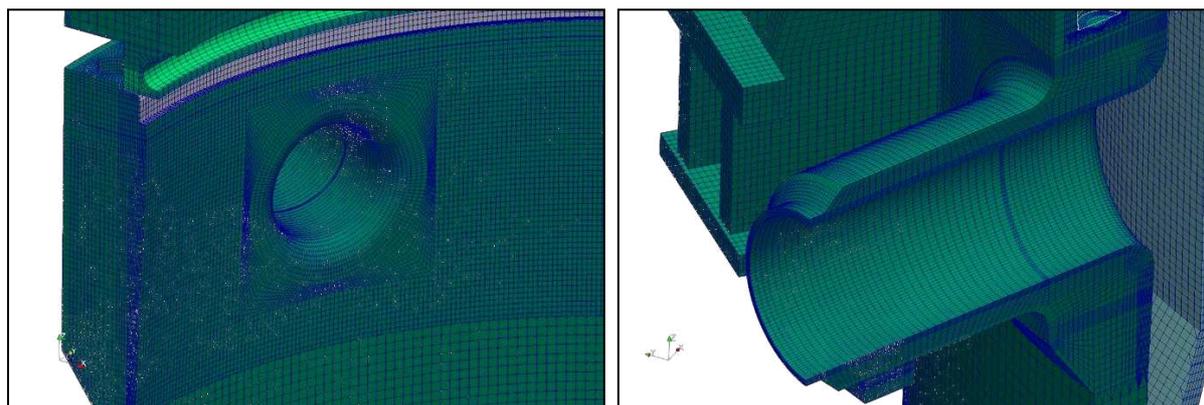


Figura 5: Mallas de elementos finitos en zona de boquilla

## 2.4 Materiales

- **DIN 22 NiCrMo 37:** Este acero se encuentra presente tanto en la Tapa de Cierre como en la Vasija del RPV. El mismo es equivalente a un acero ASTM SA-508 Gr. 2 Cl. 1. Así mismo, se empleará este mismo material en el volumen representativo del *cladding*.
- **ASME SA-29 Gr. 1022:** Este material se encuentra presente en el Anillo de Estanqueidad o de Tapa. Según el plano M20-0022 corresponde a un Acero DIN 20 Mn 5. Este material es equivalente a un acero A-29 Gr. 1022.
- **ASME SA-540 B29 Cl.3:** Este acero se encuentra presente en espárragos, tuercas y arandelas del conjunto del RPV.
- **DIN 1.4550:** Este acero es empleado en el Tanque del Moderador. Este componente se tuvo en cuenta para considerar el efecto de dilatación térmica relativa respecto al RPV.

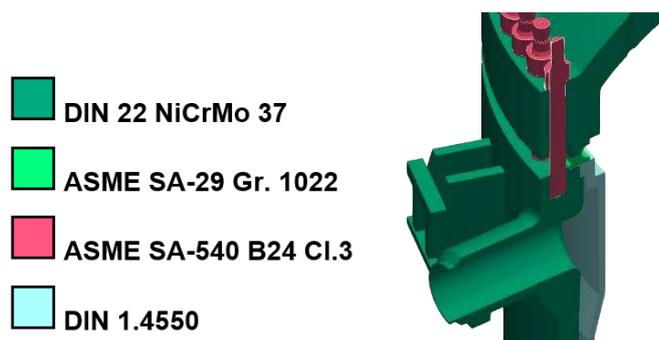


Figura 6: Materiales de los distintos dominios

Con motivo de analizar en detalle los resultados en la región de la boquilla de alimentación, se realizó un estudio termoplástico, como se mencionó anteriormente. A continuación, se muestran las distintas curvas de deformación/endurecimiento del material base de la boquilla:

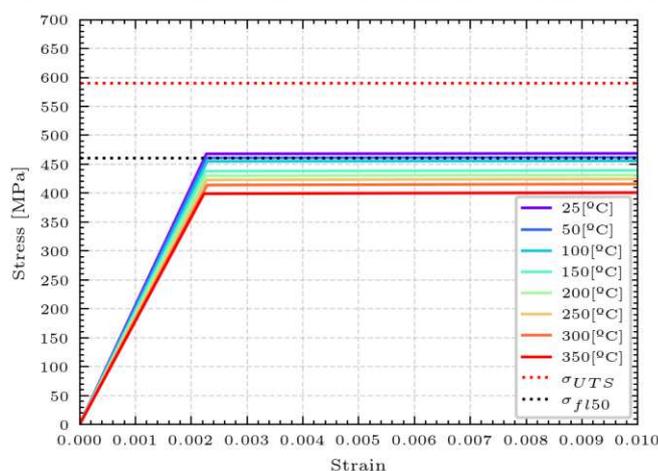


Figura 7: Curvas tensión deformación para distintas temperaturas DIN 22 NiCrMo 37

## 2.5 Condiciones de Borde

Tal como se mencionó anteriormente, se haciendo uso de la simetría del modelo en planos frontales y laterales, se impusieron las siguientes condiciones de borde a los lados del modelo:

- Restricción del desplazamiento en dirección eje x ( $DX = 0$ ), en las caras planas pertenecientes al plano  $X = 0$ .
- Restricción del desplazamiento en dirección eje Y ( $DY = 0$ ), en las caras planas pertenecientes al plano  $Y = 0$ .
- Bloqueo el desplazamiento vertical (eje z) en las caras indicadas del soporte radial y la boquilla del RPV.

## 2.6 Contactos

En esta sección se resume el modelo de contacto empleado y los distintos conjuntos en contacto en el RPV.

Se tienen las siguientes superficies en contacto por interacción entre conjuntos:

- Contacto entre Tapa RPV y Anillo Sello: **Pegado Rígido.**
- Contacto entre Anillo Sello y asiento en Vasija RPV: **Pegado Rígido.**
- Contacto entre Anillo Sello y cara superior de TM: **Pegado Rígido.**
- Contacto entre TM y asiento en Vasija RPV: **Pegado Rígido.**

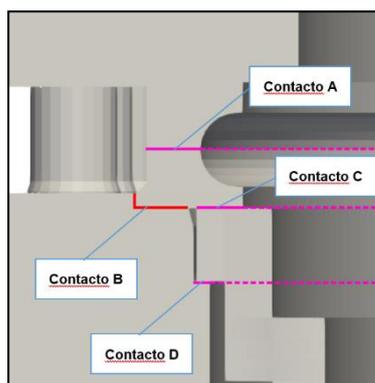


Figura 8: Superficies en Contacto.

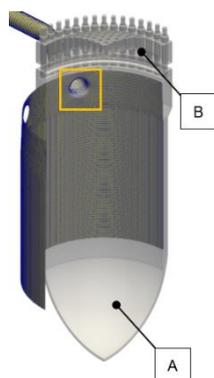
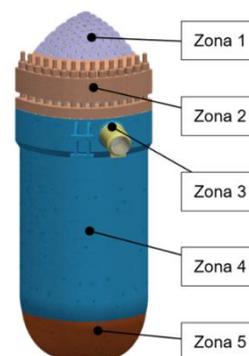


Figura 9: Detalle superposición de malla (Lencina, 2017) sobre presente trabajo y superficies de imposición manual de temperatura

Figura 10: Esquema indicativo de subgrupos de caras exteriores recipiente de presión con coeficiente de transferencia  $h$ .

## 2.7 Cargas externas

### Cargas Térmicas:

**Cara interior de RPV y boquilla:** Temperatura impuesta transitoria. Proyección de temperatura resultado de (Lencina, 2017). Ver Figura 9.

**Cara interior fondo de RPV:** Temperatura impuesta, según promedio resultados en última línea de nodos (Lencina, 2017). Ver Figura 9, zona A.

**Cara interior Tapa de Cierre RPV:** Temperatura impuesta en INST = 0, igual a 266 [C], correspondiente con Condicion Normal. Luego, adiabatica para el resto de los instantes. Ver Figura 9, zona B.

**Caras exteriores del RPV y boquilla:** Ver Figura 10. Se aplican condiciones de borde tipo intercambio térmico con una temperatura exterior, mediante la aplicación de distintos coeficientes de transferencia, obtenidos de (Bourguigne, 2017). Más precisamente la fórmula utilizada es:

$$\lambda(T) \frac{dT}{dn} = h (T_{ext} - T) \quad (1)$$

**Tanque Moderador:** Temperatura impuesta según RELAP – NASA.

### Cargas mecánicas:

**Peso propio:** Se tuvo en cuenta acción de la gravedad sobre los distintos dominios activos. Con respecto a los conjuntos ausentes (Cuerpo de Relleno Inferior, Cuerpo de Relleno Superior, Tapa Superior de Tanque Moderador, 254 Canales Combustibles), se calcularon los volúmenes y peso propio. Se incorporaron al modelo como una fuerza distribuida por área.

**Presión interior RPV y Tanque Moderador:** Se aplicaron presiones transitorias, cuyos datos fueron provistos por NASA. Por fuera del RPV, se aplicó presión atmosférica.

**Fuerzas sobre soldadura de Boquilla:** Producto de las dilataciones de las cañerías se generan esfuerzos adicionales en las soldaduras de las boquillas. Se tuvieron en cuenta como una fuerza impuesta, y sus valores fueron provistos por NA-SA. La evolución en el tiempo se puede ver en la Figura 11. Para incorporar los momentos flectores al modelo 3D, se generó una malla de cáscara (QUAD9) coincidente con la sección de soldadura en estudio. Finalmente, se vinculando se vincularon ambas mallas generándose la fuerza equivalente sobre la soldadura.

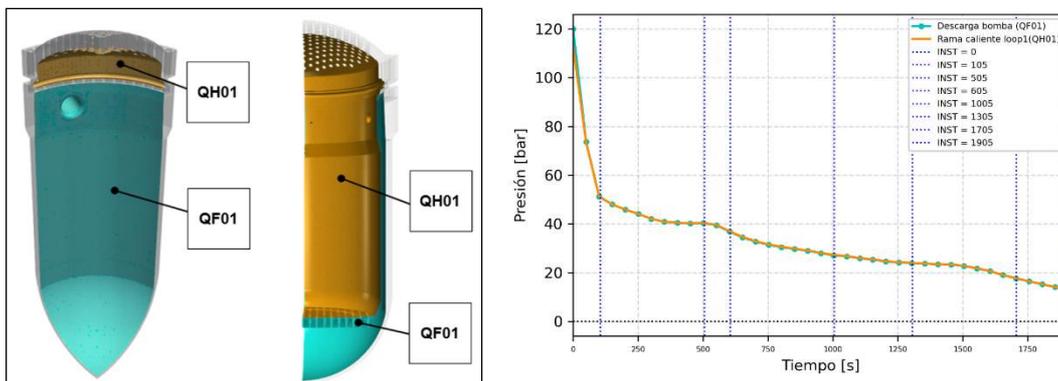


Figura 11: (Izq.) Caras con presión similar. (Der.) Evolución de presiones en durante el evento.

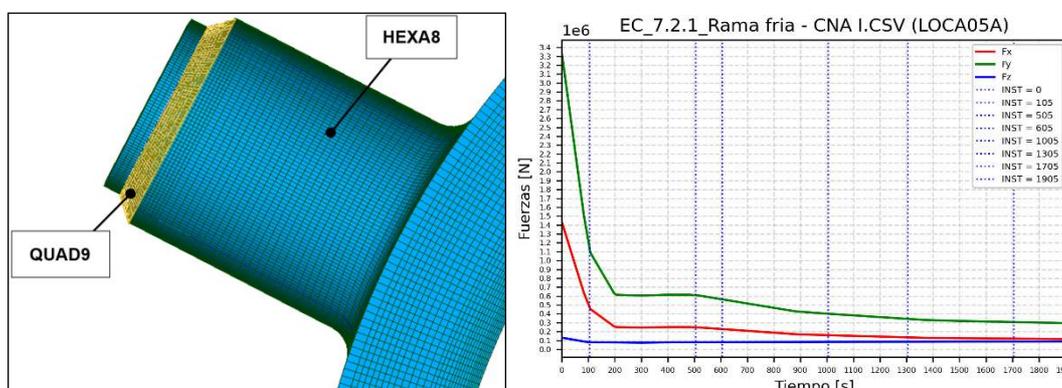


Figura 12: (Izq.) Elementos cascara y área de aplicación esfuerzos soldaduras. (Der.) Evolución de Fuerzas.

### 3 RESULTADOS

Se muestran resultados de tensiones equivalente de Von Mises en los Esparragos y Tapa de Cierre del RPV para la fase de precarga (Figura 13, izq), en la cual todo el modelo se encuentra a 50 [°C].

Tal que se obtuvieron resultados por sobre el límite de fluencia en la zona de la boquilla, se ejecutó el submodelo elastoplástico, como se mencionó. Se obtuvo que la deformación plástica acumulada no supera el 14%, (Figura 13, der).

El origen de los picos de tensiones es mayormente debido al gradiente térmico. En la

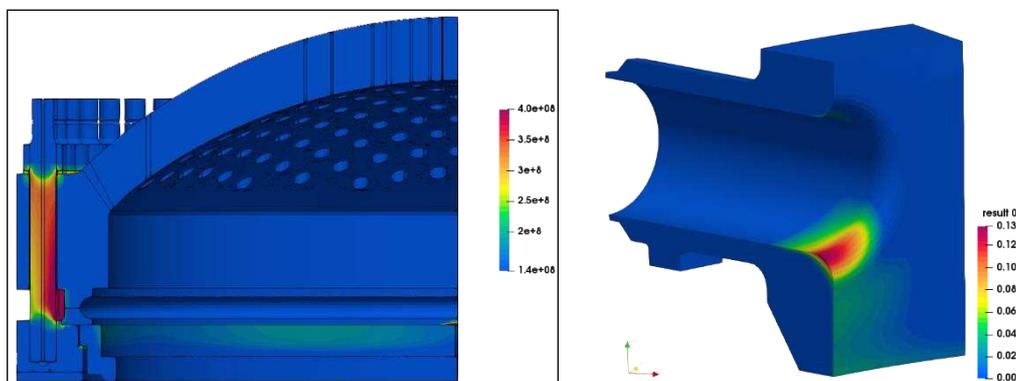


Figura 13 (Izq.): Tensión equivalente en Esparragos [Pa]. (Der.): % deformación plástica acumulada.

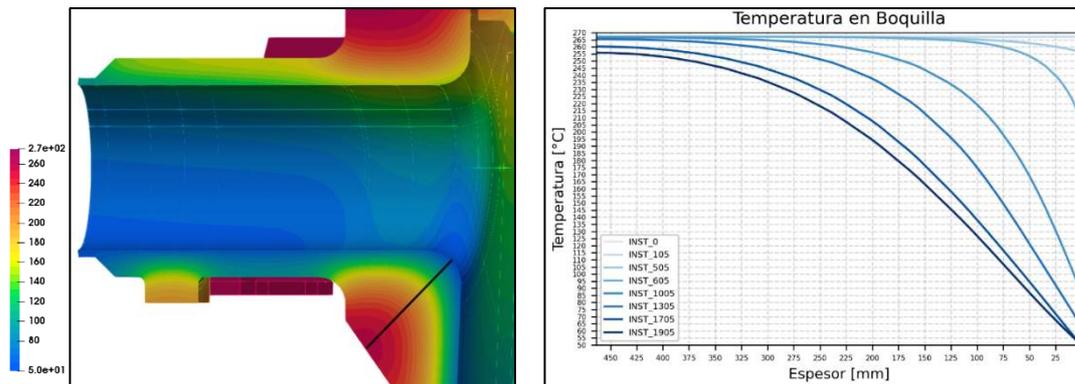


Figura 14: (Izq) Temperatura boquilla en INST = 1905 [s] y línea de extracción de resultados (color negro). (Der.) Temperatura a distintos instantes del transitorio, extraídos sobre la línea indicada.

## 4 CONCLUSIONES

Dadas las condiciones de borde impuestas tanto en temperatura como en presión para un accidente tipo LOCA generan picos de tensiones en la zona del radio interior de la boquilla en el modelo elástico global. El origen de estas tensiones se debe principalmente al gradiente térmico producto del enfriamiento brusco.

El submodelo de boquilla, con material elastoplástico, indica que la deformación plástica acumulada no supera el 14%, siendo este un valor bajo en cuanto a deformación respecta. La tensión equivalente obtenida presenta valores más acordes.

Las boquillas de entrada y salida de los recipientes de presión de centrales nucleares, en general, son críticos y requieren particular atención al momento de asegurar la integridad estructural. Por tal motivo, las validaciones incluyen postular fisuras para el cálculo de SIF. A futuro, continuando con el presente trabajo, se presenta la postulación de dichas fisuras dentro del modelo de elementos finitos, tal como se muestra en (Chih-Hsuan & Hsoun-Wei, 2022). En este, se realiza una comparación con respecto al Apéndice G Sección XI del código ASTME para Calderas y Recipientes sometidos a presión.

## 5 REFERENCIAS

Bourguigne, G. (2017). IT-GI-SM-56-2017-Rev0: CALCULO DE TENSIONES Y FATIGA DE ESPARRAGOS DE CIERRE DE LA TAPA DE RPV DE CNAI. Villa Martelli, Buenos Aires: Nucleoeléctrica Argentina SA.

Chih-Hsuan, L., & Hsoun-Wei, C. (2022). Stress intensity factor assessment for reactor pressure vessel nozzles containing postulated corner cracks. *Engineering Fracture Mechanics*, 275. doi:<https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2022.108838>

Lencina, L. J. (2017). ND-23A-17: Determinación de la evolución temporal de la temperatura de la pared del RPV de Atucha 1, para el escenario de rotura de 50 cm<sup>2</sup> en rama caliente del circuito 2 con Corriente de Emergencia para el análisis del PTS. Villa Martelli, Buenos Aires: NA-SA UG-PN.

## 6 AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la colaboración en el presente trabajo al Departamento de Ingeniería en Materiales de Nucleoeléctrica Argentina S.A.