

## EFFECTS CAUSED BY THE TEMPERATURE PROFILE IN THE UPPER DOME OF A WATER TUBE TYPE STEAM GENERATOR

### EFFECTS CAUSED BY THE TEMPERATURE PROFILE IN THE UPPER DOME OF A WATER TUBE TYPE STEAM GENERATOR

César A. Lanz<sup>a</sup>, Daniel H. Felix<sup>a</sup> y Simon Nogueira<sup>b</sup>

<sup>a</sup>*Departamento de Ingeniería, Instituto de Ingeniería (IIUNS)-CIC, Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Argentina, clanz@uns.edu.ar, dhfelix@uns.edu.ar, <http://www.uns.edu.ar>*

<sup>b</sup>*Departamento de Ingeniería, Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Argentina, simonnogueira90@gmail.com, <http://www.uns.edu.ar>*

**Palabras clave:** recipientes a presión, elementos finitos, calderas, termomecánica.

**Resumen.** En este trabajo se analiza el comportamiento estructural del domo superior de un generador de vapor acuotubular de tipo D. El equipo en cuestión es capaz de generar vapor a razón de 40 Tn/h a una presión de 2 MPa y a 217°C, utilizando gas natural como combustible. Se determinan y analizan tanto el campo de tensiones como el de deformaciones, afectados por la distribución no uniforme de temperatura en la región radiante próxima a la superficie del domo. Se trata de profundizar en el conocimiento del comportamiento estructural del domo, para corroborar la integridad mecánica, que si bien ya es cubierta por la normativa de diseño, resultará particularmente útil como herramienta de previsión de la vida útil del equipo. El estudio hace foco también en el efecto que le impone la presencia de los tubos de intercambio térmico, los cuales llegan y se vinculan a la parte inferior del domo, considerándolos como una situación de simple empotramiento. La temperatura de los gases de la combustión de dicho dispositivo, posee a lo largo del domo, una ley de variación particular impuesta por los efectos de la radiación del calor en la zona del cono refractario del dispositivo quemador.

**Keywords:** pressure vessels, finite elements, boilers, thermomechanics

**Abstract.** In this work, the structural behavior is analyzed through numerical simulation, of the upper dome of a type D water-tube steam generator. The equipment in question is capable of generating steam at a rate of 40 Tn/h at a pressure of 2 MPa and 217°C, using natural gas as fuel. Both the stress field and the strain field affected by the non-uniform temperature distribution in the radiating region near the dome surface, are determined and analyzed. The aim is to delve into the structural behavior of the dome, corroborating the mechanical integrity, which, although it is already covered by the design regulations, will be particularly useful as a tool for forecasting the useful life of the equipment. The study also focuses on the effect imposed by the presence of the heat exchange tubes, which arrive and are linked to the lower part of the dome, considering them as a situation of simple embedding. The temperature of the combustion gases of said device has, along the dome, a particular law of variation imposed by the effects of heat radiation in the area of the refractory cone of the burner device.

## 1. DESCRIPCIÓN DEL GENERADOR DE VAPOR

A nivel industrial, el vapor es empleado fundamentalmente como fuente de temperatura en procesos de la más variada índole, o bien como fuente de trabajo para generación de potencia. En ambos casos la generación del mismo requiere equipos preparados material y estructuralmente para trabajar con las condiciones termodinámicas que cada uso requiera. Cuando se trata de generar vapor en grandes cantidades, los generadores de tipo acuotubular representan una solución técnica a las inconveniencias de trabajar con los grandes volúmenes y altas presiones necesarias para el caso, [Molanes \(2009\)](#). Los mismos, son utilizados para satisfacer la alimentación de vapor a turbinas en ciclos de generación de energía eléctrica, tanto en ciclos clásicos como en ciclos combinados por recuperación de calor (HRSG).

Además ese vapor es el fluido térmico requerido para satisfacer las transformaciones o reacciones en equipos de proceso o en reactores de plantas industriales, los cuales requieren una fuente de energía térmica, [Gaffert \(2010\)](#), [Carazas et al. \(2011\)](#).

Básicamente una caldera de este tipo, está formada por uno o más cilindros (domos), [Ibarra Hernández et al. \(2011\)](#) y una serie de tubos, en donde se produce el intercambio térmico que da lugar a la vaporización del agua de alimentación de estos equipos. El equipo objeto de nuestro trabajo, que genera 40 Tn/h a una presión de 20 atmósferas (2 MPa), en la cuál, el vapor saturado se encuentra a una temperatura de 217°C, posee un domo superior de 914 mm de diámetro exterior y una longitud de 10.900 mm. En la presente propuesta de diseño, se contemplan dos espesores para la chapa del domo superior. La chapa utilizada es de acero al carbono, de calidad ASTM 516, Gr 70, y los espesores contemplados son de 25,4 mm y 38,1 mm. Según el [ASME-II-BPVC \(2013\)](#) (PG 28.3 Parte D-Subparte 1, Tabla Y-1), el acero mencionado posee una tensión de rotura a la tracción de 485 MPa y una tensión de limite elástico de 260 MPa.

Del domo se toma el caudal de vapor que se utiliza para alimentar los equipos que van a utilizar ese fluido energético, [ASME-I-BPVC \(2017\)](#), [Moss \(3° edic. 2004\)](#).

En el esquema de la Fig. 1 se muestra un detalle de la configuración del equipo, en el que se observa el cilindro que conforma el domo superior y la manera en que se conecta con los tubos de intercambio térmico. Puede apreciarse también que los extremos del domo superior cilíndrico se cierran con sendos cabezales semiesféricos. El resto del esquema muestra los tubos de intercambio térmico, que son los encargados del flujo ascendente y descendente del agua y/o la mezcla con burbujas de vapor.

En el esquema de la Fig. 2 se puede apreciar la disposición transversal de los tubos en el domo. Estos tubos de 51 mm de diámetro, son del tipo sin costura, fabricados en acero ferrítico austenítico, de calidad ASTM SA 213-T22, [Purbolaksono et al. \(2010\)](#). En la Tabla 1 se muestra la composición química de los materiales empleados.

Para la transformación del agua en vapor, se utiliza el calor generado por la combustión de gas natural en un equipo denominado quemador. El flujo de gases extremadamente calientes, es expulsado por el quemador, en una dirección paralela al eje geométrico, (ideal) del domo superior. La mayor parte de la transferencia de la energía térmica, (calor) es realizada en los tubos de intercambio térmico, y en menor proporción, en el domo superior, que también es sometido a la acción del calor. La temperatura exterior del domo superior, no es constante, sino que tiene una distribución a lo largo del mismo que, como hipótesis de estudio, se asume con variación lineal. Debido a esta variación en el campo térmico, las dilataciones que se producen en diferentes secciones del domo serán distintas, dependiendo de la distancia entre dichas secciones y la fuente de generación de calor.

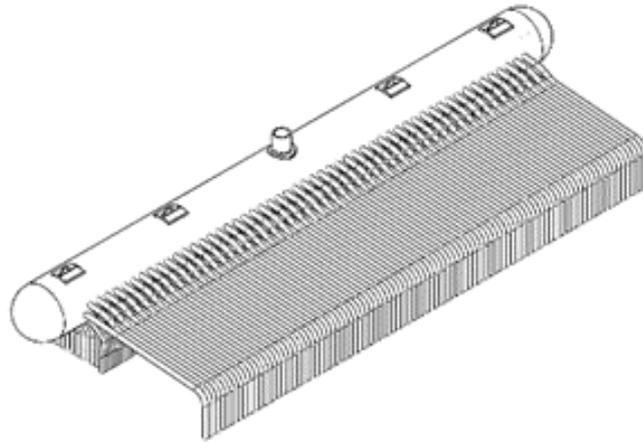


Figura 1: Vista esquemática en perspectiva, en las que se aprecia la disposición longitudinal de los tubos en el domo.

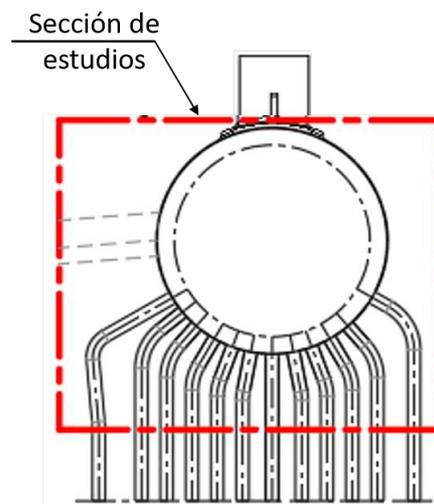


Figura 2: Vista esquemática en las que se aprecia la disposición transversal de los tubos en el domo.

## 2. VERIFICACIÓN DEL ESPESOR DEL DOMO SEGÚN EL CÓDIGO DE DISEÑO DE APLICACIÓN

Como se indicó anteriormente, los generadores acuatubulares se diseñan tomando como referencia las indicaciones del código ASME-I. El domo o cilindro superior, está construido por soldadura de arco eléctrico que satisface las normas AWS-D1.1. (2015).

Para asegurar que este componente tenga el espesor mínimo necesario  $t$ , se utilizará el modelo indicado en la parte PG-27.2.2 del código ASME-I, el cual indica que el espesor del domo mínimo recomendado, se determina mediante la Ec.(1).

$$t = \frac{P.D}{2.S.E + 2.y.P} + C \quad (1)$$

en donde,  $P$  es la presión de diseño, la cual se determina considerando que la misma es un 10 % superior a la de servicio (2,0 MPa), es decir 2,2 MPa, como es indicado por el código ASME-I;

| Elemento  | ASTM A516 Gr 70 | ASTM SA 213-T22 |
|-----------|-----------------|-----------------|
| Carbono   | 0,31            | 0,15            |
| Manganeso | 1,20            | 0,30 - 0,60     |
| Fósforo   | 0,035           | 0,025           |
| Azufre    | 0,035           | 0,025           |
| Silicio   | 0,15 - 0,40     | 0,50            |
| Cobre     | 0,02            | 0,40            |
| Nickel    | 0,0             | 0,40            |
| Cromo     | 0,0             | 1,90 - 2,60     |
| Molibdeno | 0,0             | 0,87 - 1,13     |

Tabla 1: Composición química de los aceros utilizados.

$D$  es el diámetro exterior del domo. La tensión admisible del material  $S$  se determina según PG-23-1 del ASME-I, la cual recomienda que para calcular la misma, debe tomarse el valor indicado en la Tabla 1A del código ASME-II – Parte D, la misma indica que para el ASTM A 516 Gr 70, a la temperatura de diseño le corresponde una tensión admisible  $S$  de 130 MPa.

El valor de  $E$  o eficiencia del cordón de soldadura en el caso visto, toma el valor  $E = 1$ , por considerarse radiografiado total, según PG 27.4.1. El coeficiente  $y$  es extraído de la Tabla PG-27.4.6 del código ASME-I, que para este material es de 0,4 (acero ferrítico). El valor de  $C$  corresponde al sobreespesor para atender las cuestiones de adelgazamiento de la pared del domo, el cual se adopta igual a 1.65 mm. Si ingresamos los valores antes enumerados en la Ec.(1), llegaremos a que el espesor mínimo requerido  $t$  para el domo es de 9,33 mm con lo cual, los espesores propuestos (de 25,4 mm y 38,1 mm) son muy superiores al espesor mínimo calculado.

### 3. MODELIZACIÓN DEL DOMO EN ELEMENTOS FINITOS

Con el fin de obtener una mayor comprensión del comportamiento estructural del domo, se realizó un estudio incorporando simulaciones numéricas del mismo, que tuvieran en cuenta las singularidades generadas por las conexiones de los tubos, los cuales se modelizaron con y sin avellanado, y el perfil de temperatura que obra sobre este componente.

Para este cometido se consideró simular diferentes secciones del domo incluyendo la vinculación de los tubos al mismo. En la Fig.3 se muestra una vista longitudinal con las correspondientes conexiones de los tubos de alimentación.

Se utilizó para ello el software [Salome-Meca \(2021\)](#), que posee licencia LGPL e incluye en uno de sus módulos al software de elementos finitos [CodeAster \(2021\)](#), el cuál es especialmente apropiado para realizar análisis termomecánico.

En la Fig. 4a se muestra una vista de la geometría de un sector del domo, en la que se aprecian las conexiones de los tubos de alimentación, mientras que en la Fig. 4b se muestra el correspondiente mallado. Por otra parte, en las Figs. 5a y 5b se muestran en detalle las uniones avellanadas de los tubos al domo.

En primer lugar, dada la diferencia térmica existente entre la superficie exterior y la superficie interior del domo se procedió a realizar un análisis térmico con diferentes temperaturas sobre la superficie exterior de cada uno de los sectores modelizados.

Resulta oportuno aclarar que el análisis termo-mecánico se lleva a cabo en tres etapas, siendo la primera un análisis térmico que requiere su propio mallado con elementos de primer orden

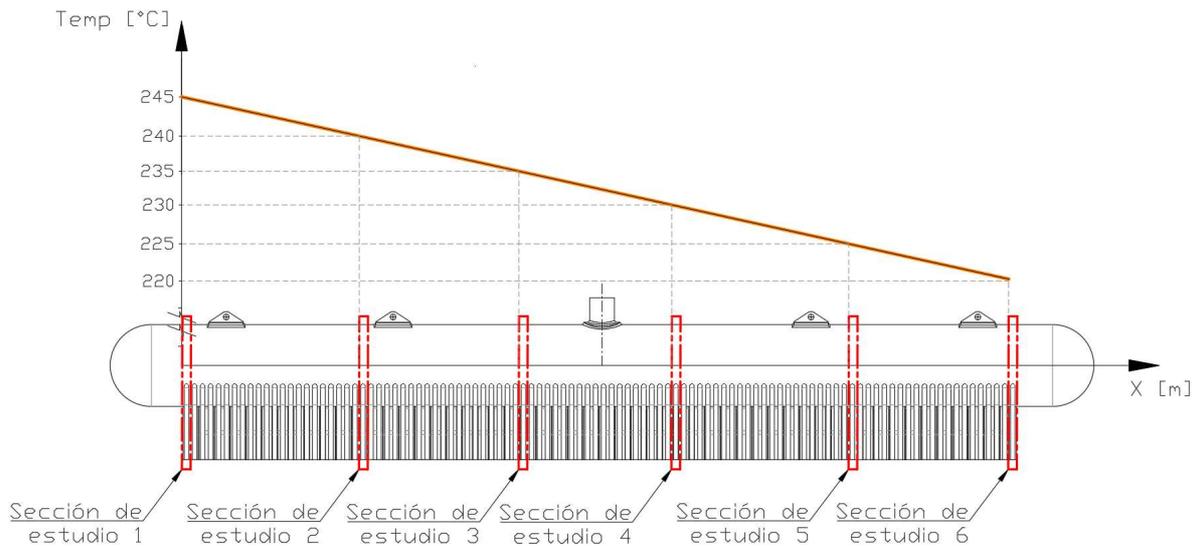


Figura 3: Perfil de temperatura exterior adoptado y secciones del domo analizadas.

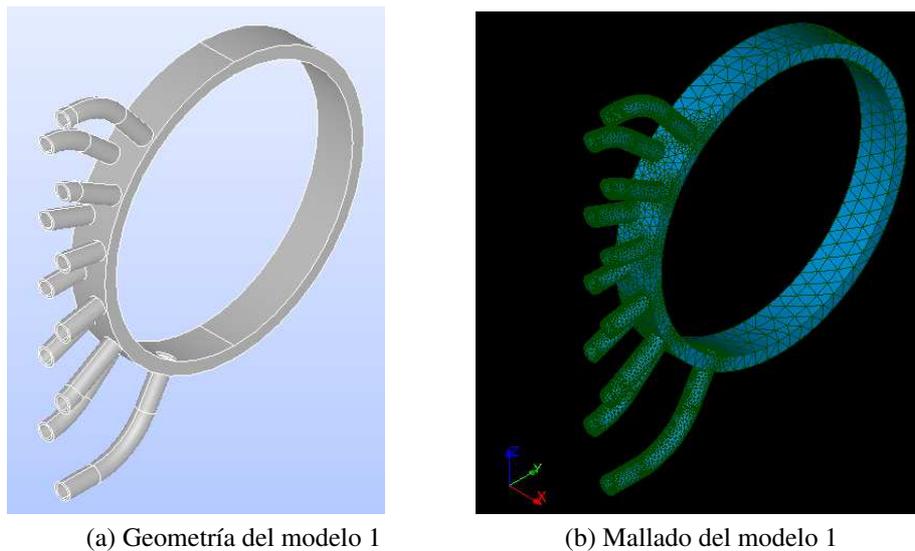


Figura 4: Geometría y mallado de un sector del domo que incluye las conexiones avellanadas con los tubos de alimentación.

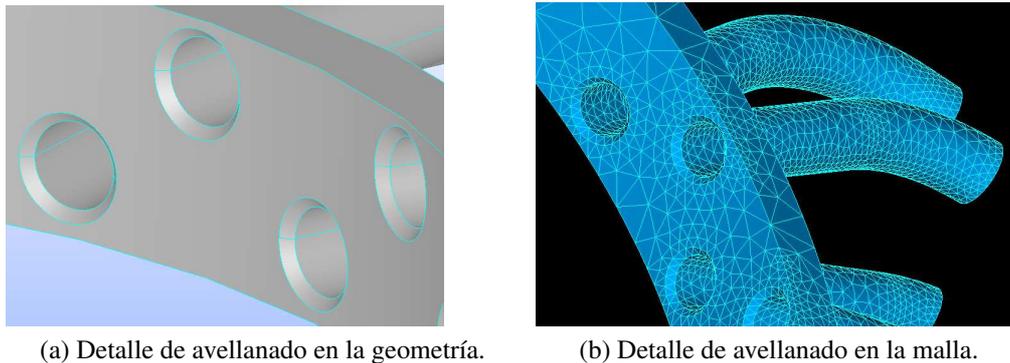
y su propio modelo. Esto se hace con la finalidad de obtener el campo de temperaturas en la chapa del domo.

Luego se emplea una segunda etapa en dónde se crea una malla de segundo orden, y se proyectan en un nuevo modelo los resultados del campo térmico obtenido en la primera etapa.

Finalmente en una última etapa se realiza el análisis mecánico integrando en él los resultados del análisis térmico de la primera etapa.

En el caso del modelo de 25,4 mm de espesor de chapa, la malla del análisis mecánico consta de: 96.196 nodos y 83.738 elementos cuadráticos conformados del siguiente modo: 3.887 elementos 1D, denominados MECA\_ARETE3, 32.392 elementos 2D triangulares, denominados MECA\_FACE6 y 47.459 elementos 3D tetraédricos, denominados MECA\_TETRA10.

Mientras que en el caso del modelo de 38,1 mm de espesor de chapa, la malla del análisis



(a) Detalle de avellanado en la geometría.

(b) Detalle de avellanado en la malla.

Figura 5: Geometría y mallado en la que se aprecia la conexión avellanada de los tubos al domo.

mecánico consta de: 93.897 nodos y 81.605 elementos cuadráticos conformados del siguiente modo: 3.752 elementos 1D, denominados MECA\_ARETE3, 31.178 elementos 2D triangulares, denominados MECA\_FACE6 y 46.675 elementos 3D tetraédricos, denominados MECA\_TETRA10.

Las propiedades del acero que conforma la chapa del domo se establecieron para el perfil de temperatura adoptado en las simulaciones [Gorenc et al. \(2005\)](#), resultando los siguientes valores: Módulo de Elasticidad,  $E = 1,89e11$ , coeficiente de Poisson  $\nu = 0,28$ , coeficiente de dilatación térmica  $\alpha = 1,236e-5$  y coeficiente de conductividad térmica  $\lambda = 14,0$ .

En la Fig. 6, se puede observar el campo de temperatura variable en el espesor de la chapa del domo, que corresponde al modelo de 38,1 mm de espesor de chapa. El gradiente térmico

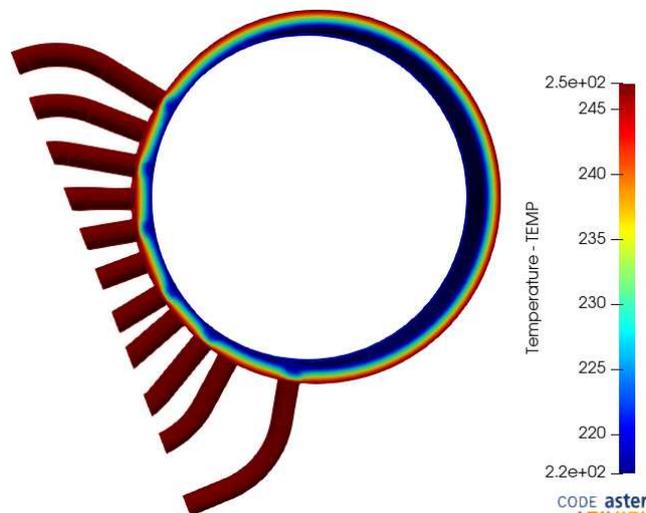


Figura 6: Campo de temperaturas correspondiente al sector "1" del domo.

esta dado en este caso por una temperatura aplicada sobre la superficie exterior de  $246,9^{\circ}\text{C}$  y una temperatura aplicada sobre la superficie interior de  $216,9^{\circ}\text{C}$ .

Luego de realizar el análisis térmico, se procedió a realizar el análisis termomecánico. Se obtuvieron así los campos de desplazamiento, de deformaciones y de tensiones.

En la Fig. 7a, se muestra a modo de ejemplo, el campo de desplazamientos  $\delta$  correspondiente a la sección de estudio denominada "1" del domo de 38,1 mm de espesor.

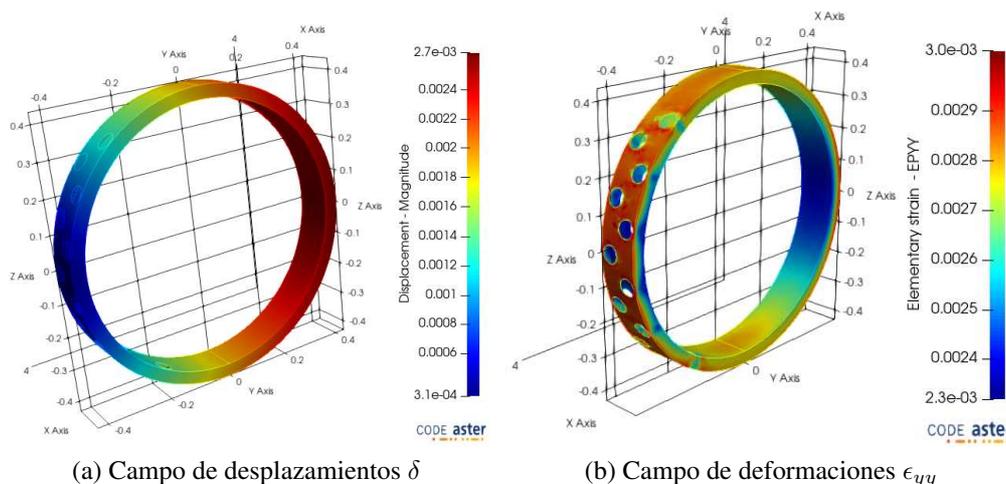


Figura 7: Amplitud de desplazamientos  $\delta$  y componente de deformación  $\epsilon_{yy}$  correspondientes a la sección "1" de la modelización del domo de 38,1 mm de espesor y con 30°C de gradiente térmico. En ambos casos calculados en los nodos.

Puede observarse que los desplazamientos máximos observados son del orden de 2,7 mm. Cabe destacar que, a los fines de la modelización, las únicas restricciones impuestas fueron los desplazamientos de los elementos correspondientes a la base de los tubos, tanto en el malla-  
do térmico como en el termo-mecánico, permitiendo así una mayor libertad para la dilatación térmica del domo. En la Fig. 7b se muestra el campo de la componente de deformación  $\epsilon_{yy}$ , obtenido con el criterio de valores en los nodos.

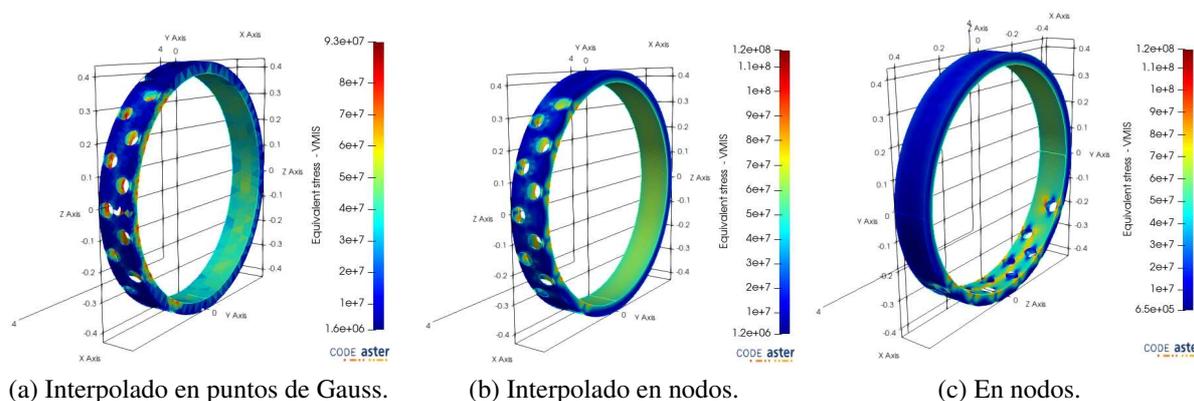


Figura 8: Campo de tensiones de VonMises calculados con 3 criterios diferentes para el domo de 38,1 mm de espesor de chapa, con un gradiente térmico de 30°C.

En la Fig. 8 se muestran los campos de tensiones de Von Mises determinados mediante tres criterios diferentes: a) Interpolando los valores correspondientes a los puntos de integración de Gauss, b) Interpolando los valores correspondientes a los nodos, y c) Con los valores calculados en los nodos. En la Fig 9 se muestra con mayor detalle, una pequeña región del interior del domo, en correspondencia con la unión a los tubos, en que se produce la concentración de tensiones mencionada. Un análisis detallado de los efectos de la concentración de tensiones puede encontrarse en Liu et al. (2004), Godoy y Arrién (2006).

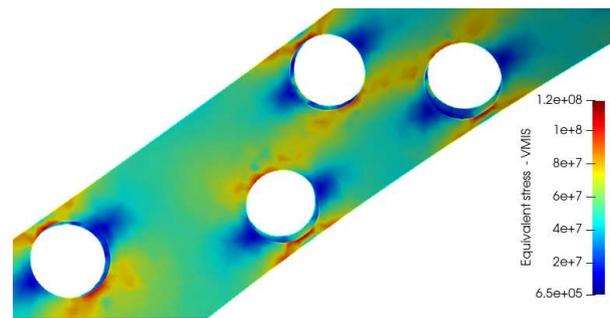


Figura 9: Vista parcial de la concentración de tensiones en las uniones de los tubos con el domo.

En la Tabla 2, se resumen en función del gradiente térmico aplicado, los valores máximos del desplazamiento  $\delta$ , de la componente de deformación  $\epsilon_{yy}$  y de la tensión de VonMises  $\sigma^{vm}$ , estos últimos obtenidos con los tres criterios mencionados anteriormente, para el modelo con espesor de chapa de 25,4 mm.

| [Sección] | $\Delta T$<br>[°C] | $\delta_{max}$<br>[mm] | $\epsilon_{yy}$<br>[mm/m] | $VM_{ELGA}$ | $VM_{NOEU}$<br>[MPa] t=25,4 mm | $VM_{ELNO}$ |
|-----------|--------------------|------------------------|---------------------------|-------------|--------------------------------|-------------|
| "1"       | 30                 | 2,64                   | 3,06                      | 128,6       | 159,1                          | 159,3       |
| "2"       | 25                 | 2,61                   | 3,04                      | 124,2       | 154,3                          | 154,5       |
| "3"       | 20                 | 2,59                   | 3,02                      | 119,8       | 149,5                          | 149,7       |
| "4"       | 15                 | 2,56                   | 3,00                      | 115,4       | 144,6                          | 146,0       |
| "5"       | 10                 | 2,53                   | 2,98                      | 111,0       | 139,8                          | 143,0       |
| "6"       | 5                  | 2,51                   | 2,95                      | 106,6       | 135,6                          | 140,0       |

Tabla 2: Magnitud de los desplazamientos y tensiones de Von Mises en el domo, en función del gradiente térmico entre las superficies exterior e interior. Espesor de chapa  $t = 25,4$  mm.

| [Sección] | $\Delta T$<br>[°C] | $\delta_{max}$<br>[mm] | $\epsilon_{yy}$<br>[mm/m] | $VM_{ELGA}$ | $VM_{NOEU}$<br>[MPa] t=38,1 mm | $VM_{ELNO}$ |
|-----------|--------------------|------------------------|---------------------------|-------------|--------------------------------|-------------|
| "1"       | 30                 | 2,65                   | 3,11                      | 93,03       | 116,7                          | 118,2       |
| "2"       | 25                 | 2,62                   | 2,93                      | 88,09       | 110,7                          | 112,2       |
| "3"       | 20                 | 2,60                   | 2,87                      | 85,08       | 104,7                          | 106,3       |
| "4"       | 15                 | 2,57                   | 2,85                      | 82,25       | 99,60                          | 100,3       |
| "5"       | 10                 | 2,55                   | 2,82                      | 79,43       | 95,57                          | 95,39       |
| "6"       | 5                  | 2,52                   | 2,80                      | 76,61       | 91,54                          | 91,39       |

Tabla 3: Magnitud de los desplazamientos y tensiones de Von Mises en el domo, en función del gradiente térmico entre las superficies exterior e interior. Espesor de chapa  $t = 38,1$  mm.

Los valores en color rojo en la Tabla 2 indican que se ha superado la tensión admisible del material, aunque debe tenerse en cuenta que esto sucede en una región muy reducida de la unión entre tubos y domo. Si bien el avellanado de dicha unión permite reducir considerablemente los efectos de la concentración de tensiones, en el caso planteado los valores de VonMises obtenidos superan el valor admisible al utilizar los criterios de interpolación en los nodos y de valores nodales. Un análisis similar se muestra en la Tabla 3 para el modelo con espesor de chapa de 38,1 mm.

#### 4. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Del estudio realizado pueden obtenerse las siguientes conclusiones:

- Puede apreciarse la influencia del gradiente térmico en todas las componentes de deformación y tensión mostradas, correspondiendo los mayores valores a los sectores sometidos a mayor gradiente, que corresponden a los ubicados en la zona más cercana del domo a los quemadores. Esta correlación muestra claramente la fuerte incidencia en la generación de deformaciones y tensiones que tiene dicho gradiente.
- La verificación de espesor realizada, aplicando las normas del código ASME-I-BPVC, muestran una diferencia significativa con los resultados que arroja la modelización. Esto se debe a que en la verificación realizada por norma no se ha tenido en cuenta ni el gradiente térmico ni los efectos de concentración de tensiones. Profundizar en las causas de estas diferencias podrá ser uno de los objetivos planteados en futuras investigaciones.
- En lo referido a la modelización, el software utilizado ha mostrado ser muy apropiado para el análisis termomecánico realizado.

#### Agradecimientos

El trabajo se desarrolló en el Departamento de Ingeniería de la Universidad Nacional del Sur (UNS) y bajo el auspicio de la Secretaría General de Ciencia y Tecnología de la Universidad Nacional del Sur (UNS), del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) y de la Comisión de Investigaciones Científicas-CIC de la Prov. de Buenos Aires.

#### REFERENCIAS

- ASME-I-BPVC. *Rules for Construction of Power Boilers*. ASME, 2017.
- ASME-II-BPVC. *Materials Part D Properties Metrics*. ASME, 2013.
- AWS-D1.1. *Structural Welding Code Steel*. Welding Society. USA, 2015.
- Carazas F.J.G., Salazar C.H., y Souza G.F.M. Availability analysis of heat recovery steam generators used in thermal power plants. *Energy*, 36(6):3855–3870, 2011.
- CodeAster. *Análisis de Estructuras y Termomecánica para Estudios e Investigaciones*. Software de Elementos Finitos desarrollado por la EDF (Électricité de France), París, Francia, 2021.
- Gaffert G.A. *Centrales de vapor*. Mc Graw Hill, 2010.
- Godoy M.L. y Arrién L.M. Influencia de discontinuidades en el estado tensional de recipientes sometidos a presión. *Mecánica Computacional*, XXV:641–649, 2006.
- Gorenc B.E., Tinyou R., y Syam A.A. *Steel Designers Handbook*. University of New South Wales Press Ltd, Sidney, Australia, 7° edición, 2005.
- Ibarra Hernández E.V., Martí Safonts D., Bonilla Rocha J.D., y Duffus Scott A. Análisis del estado tensorial en domos de la caldera acuotubular tipo cvm2 retal, utilizada en la industria azucarera cubana. *Centro Azucar*, 38(4):1–7, 2011.

- Liu Y.H., Zhang B.S., Xue M.D., y Liu Y.Q. Limit pressure and design criterion of cylindrical pressure vessels with nozzles. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 81:619–624, 2004.
- Molanes C.A. *Compendio de Vapor y Máquinas Térmicas. 1ra Edición*. Edición del autor, 2009.
- Moss D.R. *Pressure Vessel Design Manual*. Elsevier Science. USA, 3° edic. 2004.
- Purbolaksono J., Ahmad J., Khinani A., Ali A.A., y Rashid A.Z. Failure case studies of SA213-T22 steel tubes of boiler through computer simulations. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 23(1):98–105, 2010.
- Salome-Meca. *Software de licencia GNU ver 9.7.0, que integra la interfaz gráfica Salome con el código de elementos finitos no lineal Code-Aster*. 2021.