

DETERMINACIÓN DE TENSIONES EN EL PROCESO DE LLENADO DE UN TANQUE CRIOGÉNICO SIN PRE-ENFRIAMIENTO

M. D. Saini^a, L. M. Mundo^a, A. Patanella^a, M. Actis^a

matias_saini@outlook.com, luis.mundo@ing.unlp.edu.ar, ajpatane@ing.unlp.edu.ar, mactis@ing.unlp.edu.ar

^a CTA – Centro Tecnológico Aeroespacial, Universidad Nacional de La Plata Calle 116 e/47 y 48 (1900) La Plata, Argentina.
<http://www.cta.ing.unlp.edu.ar>

RESUMEN

En el presente trabajo se desarrolla un método de cálculo de las tensiones térmicas generadas en el proceso de llenado de un tanque criogénico sin pre-enfriamiento, mediante la implementación de un modelo a escala para el análisis y se verifican los resultados numéricos obtenidos con los relevados en un ensayo experimental.

1.- INTRODUCCION

Los tanques criogénicos son depósitos diseñados para poder transportar líquidos criogénicos temperaturas de -150°C (123 K). Estos tanques por lo general poseen grandes restricciones de diseño, debido a que los mismos se encuentran sometidos a presiones internas dado que el líquido se encuentra generalmente en su punto crítico generando gas constantemente; los mismos deben soportar cargas estructurales y ser a su vez livianos, como lo hacen en su versión aeroespacial. En este ámbito resulta necesario el estudio de todos los factores que puedan llegar a influir en su diseño, como lo es en este caso el estudio de las tensiones generadas en el llenado de estos tanques. Los gradientes térmicos son producidos por la diferencia de temperatura generada cuando el líquido criogénico entra en contacto con el tanque disminuyendo rápidamente la temperatura de la zona de contacto mientras que el resto del tanque inicialmente se encuentra a una temperatura mayor. Este gradiente térmico provoca, a su vez, un gradiente de deformaciones y tensiones que pueden llegar a producir la falla local en el depósito.

2.- METODOLOGIA

Para el desarrollo general del trabajo se establece un modelo de estudio en común, el cual funcione como base para la realización de los diferentes ensayos y cálculos numéricos. La geometría y el material del mismo fueron seleccionados con el fin de que cumpla con una serie de requisitos mínimos que permitan, en parte, la simplificación del cálculo y que sean acordes a los tipos de tanque utilizados en los vehículos lanzadores, estos son:

- Espesor delgado, tal que se lo pueda considerar como un cilindro de paredes delgadas.
- Material con alta capacidad para la transferencia térmica, de ser posible Aluminio.
- Volumen chico, para facilitar la realización de un shock térmico controlado.

Dadas las restricciones y requisitos el modelo finalmente consta de un tanque de aluminio de 100mm de altura, con un diámetro medio de 98mm y un espesor de 3.2mm, cuyas propiedades se desconocen, igualmente dado que el mismo se lo confecciona a partir de una sección de tubo extruido industrial adquirido por el laboratorio, a partir de los proveedores se pueden acotar el tipo de aleación, la cual puede variar entre la 1100, 3003 o 5052 (Propiedades de materiales en [4]). En la Figura 1 se muestra un esquema del tanque junto a sus dimensiones.

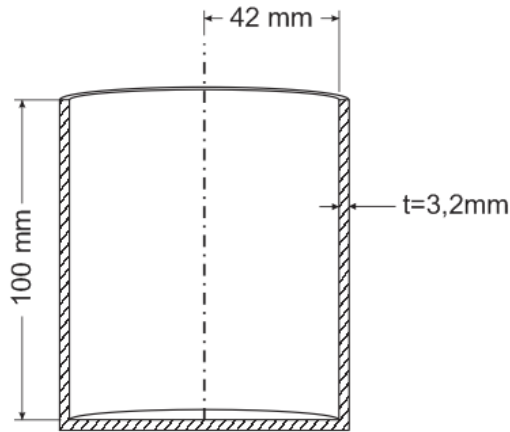


Figura 1 – Dimensiones del modelo de estudio.

Respecto a la aislación del tanque se utiliza una lámina de espuma de polietileno, de 10mm de espesor, para el recubrimiento tanto en las paredes exteriores como en su base. El objetivo de la misma es evitar fenómenos de transferencia de calor con el medio, como podría ser la convección en la pared exterior del tanque con el aire. Esto se realiza con el fin de simplificar el problema y poder abocarnos únicamente al estudio de lo que sucede en su interior.

2.1.- Resolución Experimental

Instrumentación

Para poder concretar el objetivo del trabajo presente es necesario instrumentar nuestro modelo de ensayo de manera que nos permita evaluar las tensiones producidas en el ensayo y los gradientes térmicos que las generan. Para lo mismo se utilizan *Strain Gages CEA 13-250UN-350* [5] para medir las deformaciones y termocuplas tipo T [6], para medir las temperaturas. Los mismos se colocaron a diferentes niveles, como se puede observar en la Figura 2 y a las galgas también en diferente sentido para poder determinar tanto las deformaciones en el sentido longitudinal como transversal del tanque.

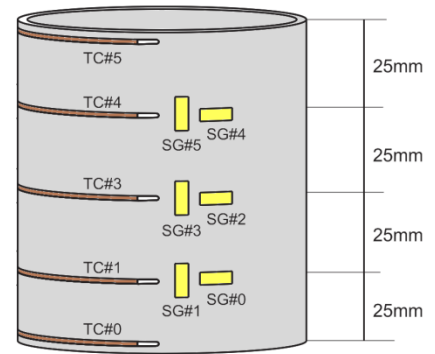


Figura 2 – Esquema de la instrumentación.

La medición de temperatura resulta necesaria para la corrección de las galgas extensiométricas por el error de *Thermal Output* [5], el mismo es inducido por la diferencia de dilatación que existe entre la pared del tanque y la galga, sumado a la variación de la resistencia eléctrica que tiene la misma respecto a la temperatura.

En definitiva el ensayo consiste en la medición de estas dos variables mientras se va llenando el depósito con un líquido criogénico. A su vez se desea realizarlo de manera tal de poder aislar efectos que dificulten la verificación de este ensayo mediante el cálculo. El primero es la variación del nivel del líquido criogénico durante el ensayo, se prefiere que el mismo sea constante y conocido en toda la duración del mismo. Consecutivamente se quieren evitar los fenómenos de convección que genera el gas, producido por la ebullición, en las paredes superiores, sobre el nivel de líquido, ya que este resulta difícil de modelar. Finalmente lo que se busca es aislar la parte superior del tanque.

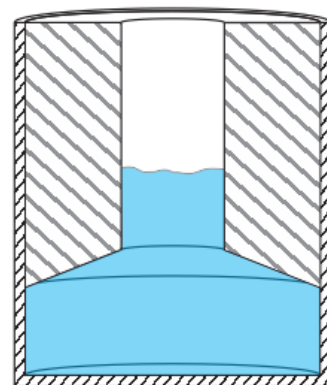


Figura 3 – Esquema de ensayo con líquido criogénico.

Para evitar los efectos mencionados anteriormente se confecciona una pieza cilíndrica hueca de polietileno expandido, que se introduce a presión dentro del tanque, aislando la pared superior del mismo y a su vez permitiendo el llenado. Esta pieza posee una altura de 75mm, lo que permite mantener el nivel de nitrógeno a 25mm, como se observa en el esquema presentado en la Figura 3.

En cuanto a la medición de la temperatura en la pared interior del tanque, se colocan dos termocuplas del tipo T, una en la base junto a la pared y otra a los 25mm. A continuación se presenta una fotografía del modelo de ensayo ya con la pieza de polietileno expandido incorporada y las termocuplas internas colocadas (ver Figura 4).



Figura 4 – Foto de ensayo con nitrógeno líquido.

El líquido seleccionado para la realización de este ensayo es nitrógeno. El mismo para condiciones normales de presión posee una temperatura de punto crítico de -195°C .

2.2- Resolución Numérica

Debido a que el problema posee una simetría axial, se procede directamente a realizar un modelo axial-simétrico, lo que implica generar únicamente la geometría del plano radial del tanque y aislante, como se puede observar en la Figura 5.

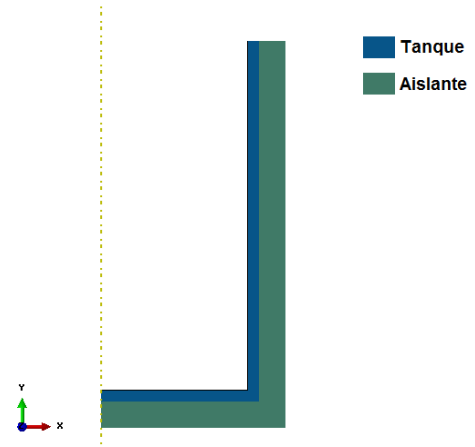


Figura 5 – Geometría de modelo FEM.

Se desarrolla un análisis con acoplamiento termo-elástico [3] que se realiza cuando las soluciones mecánicas y térmicas del problema se afectan entre sí, y por lo tanto, es necesario obtener ambas dos de manera simultánea. El cálculo es del tipo estándar, cabe destacar igualmente que respecto a la determinación de la distribución de temperaturas del modelo puede ser transitorio o estático.

Dado que el cálculo acopla las soluciones térmicas y mecánicas es necesario que los elementos posean ambos grados de libertad, y sumado a que el problema se modela con simetría axial se utilizan los elementos del tipo *CAX8RT*: son elementos cuadriláteros axial-simétricos de segundo orden (*An 8-node axial-symmetric thermally coupled quadrilateral, bi-quadratic displacement, bilinear temperature, reduced integration*). El mallado final posee 5 elementos en el espesor de 3.2mm (ver Figura 6), lo que implica una dimensión de elemento de $0.64 \times 0.64 \text{mm}$.

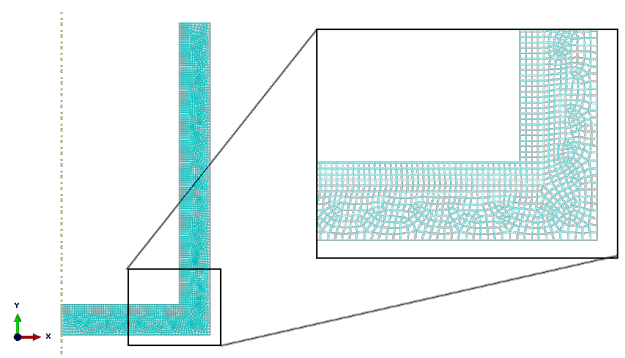


Figura 6 – Mallado.

Cuando se realiza un cálculo térmico transitorio con elementos de segundo orden resulta necesario determinar un paso de tiempo que garantice la estabilidad del cálculo, dado por la expresión (1), donde el mismo depende de las propiedades del material y la dimensión característica del elemento.

$$\Delta t > \frac{\rho c_p}{6k} \Delta l^2 \quad (1)$$

De asignar un paso de tiempo inferior al mismo pueden aparecer oscilaciones no deseadas en la solución del problema, en particular en zonas de contorno donde se asigna una rápida variación de temperatura. Cabe destacar, a su vez, que no existe un límite superior en el valor del paso temporal, el proceso de integración es incondicionalmente estable, siempre y cuando no existan no-linealidades que causen problemas de convergencia.

Dada la dimensión de los elementos se puede determinar el intervalo de tiempo mínimo que garantice la estabilidad como fue mencionado anteriormente, para los diferentes materiales utilizados en las modelizaciones (ver Tabla 1). Se puede observar que el tiempo mínimo es más chico que la décima de segundo, por lo tanto se puede afirmar que el mallado no condiciona la estabilidad de los resultados deseados.

Tabla 1 – Paso de tiempo mínimo.

Material	Δt_{\min} [seg]
1100 O	0.00075
3003 O	0.00086
5052 O	0.00117
2024 T4	0.00137

Condiciones de borde

Se establecen en la Figura 7 las condiciones de borde aplicadas sobre el modelo, en donde se aísla la pared interna superior del tanque, se aplica la temperatura del líquido en la pared interna y base del tanque, y por último se aplica un coeficiente de convección natural sobre la pared exterior del aislante respecto a una temperatura ambiente.

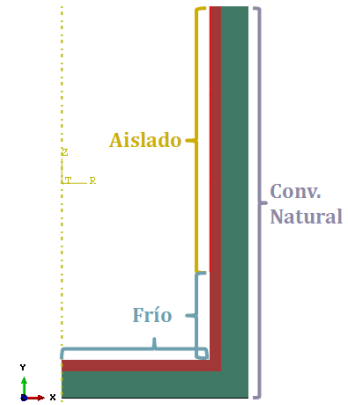


Figura 7 – Condiciones de Borde

3.- DESARROLLO

3.1- Resultado Ensayo

Del ensayo se relevó la evolución de las temperaturas, las mismas se encuentran graficadas en la Figura 8. Lo primero que se destaca al observar la evolución es que la temperatura mínima alcanzada es aproximadamente -142°C , la cual se encuentra lejos de la temperatura esperada para el nitrógeno líquido, dado que para el punto crítico del mismo, a presión ambiente, la misma debería ser de -195°C , a su vez para que la medición sea correcta sería necesaria una presión de 30 bares.

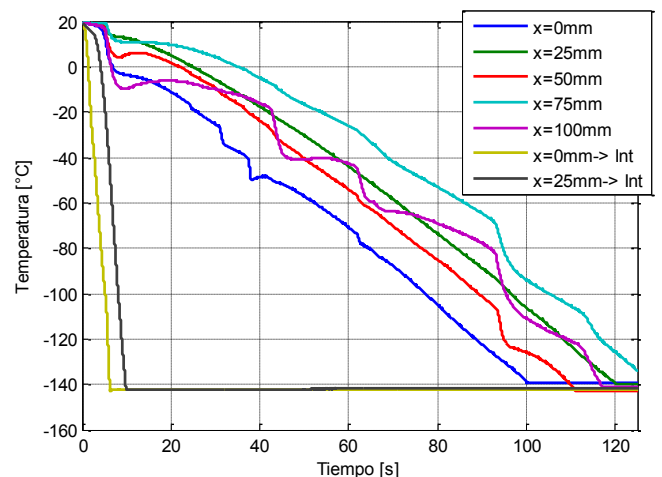


Figura 8 – Evolución de temperaturas, ensayo de enfriamiento.

Al observar el comportamiento de las temperaturas interiores, independientemente de los errores de medición, se observa que el salto de temperaturas no es instantáneo, sino que las termocuplas, estando en contacto directo con el nitrógeno tardan aproximadamente 6 segundos en medir la temperatura de equilibrio, y a su vez hay una diferencia de 4 segundos hasta que la

termocupla a los 25mm de altura llegue a esa misma temperatura. Se descarta que este tiempo de retardo sea producto del tiempo de respuesta de las termocuplas ya que las mismas en presencia de un medio líquido poseen un retardo máximo del orden del segundo.

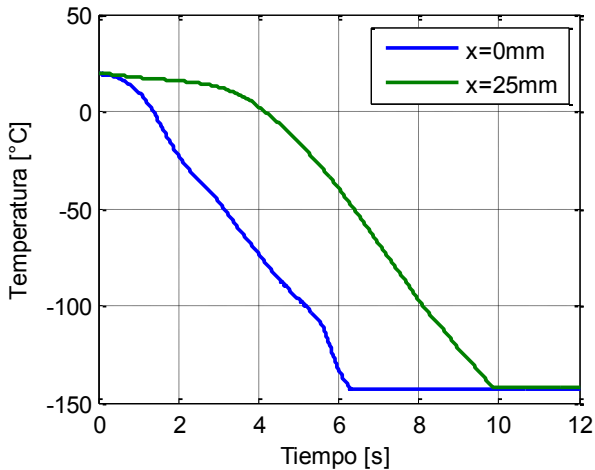


Figura 9 – Termocuplas internas, ensayo de enfriamiento.

En cuanto a los gradientes producidos en el espesor (ver Figura 10), se observan que los mismos resultan muy grandes, siendo del orden de los 140°C en 3.2mm lo que generaría unas deformaciones del orden de los 1500μS y tensiones de 162MPa.

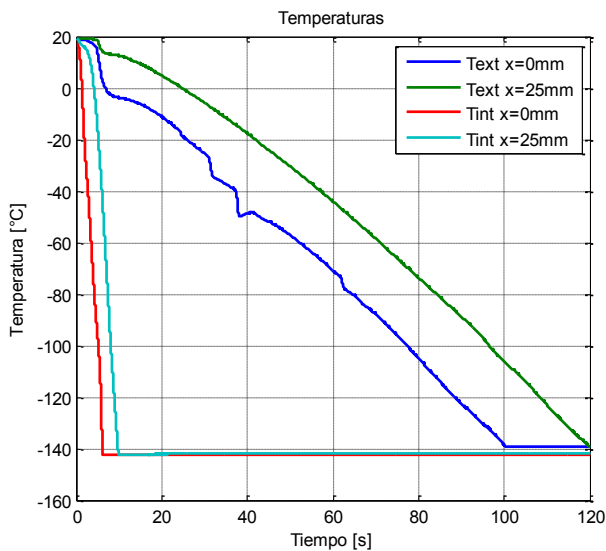


Figura 10 – Diferencias de temperatura en el espesor, ensayo de enfriamiento.

Se determina por lo tanto que existe una fuente de error en la medición de la temperatura, consecuentemente no se puede determinar correctamente el *Thermal Output* para así corregir las deformaciones medidas por las galgas extensiométricas. Igualmente se proceden a

graficar la diferencia de deformaciones en el sentido transversal y longitudinal del tanque para las tres diferentes alturas de relevamiento (ver Figura 11), ya que esto nos permite independizarnos de la medición de la temperatura al cancelarse las componentes que dependen de ella en la deformación. Al observar la evolución de estas variables se observan que todas sufren un máximo en el intervalo de los primeros 10 segundos de ensayo, disminuyendo luego hasta que dejan de adquirir, debido a que las galgas bajan de la temperatura de funcionamiento normal.

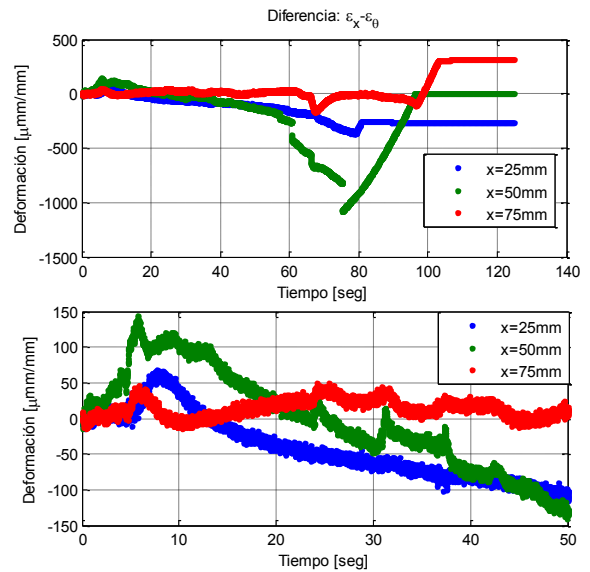


Figura 11 – Diferencia de deformaciones, ensayo de enfriamiento.

3.2.- Análisis por elementos finitos

En esta sección se van a presentar los resultados de las modelizaciones en elementos finitos desarrolladas para representar el problema del ensayo de enfriamiento, el llenado del tanque con nitrógeno líquido criogénico. Por otra parte también se quiere determinar la influencia la de la variación de las propiedades de los materiales propuestos en los resultados de la modelización transitoria, dado que la mayor variación entre las diferentes aleaciones se encuentra en la conductividad la cual resulta determinante al momento de calcular la distribución temperatura. Se espera que cuando más conductivo sea el material menor sean los gradientes producidos, por lo tanto las deformaciones elásticas y tensiones.

Modelización 1

La primera modelización realizada consiste en la aplicación instantánea de la temperatura del nitrógeno líquido (-195°C) en las paredes interiores del tanque hasta el nivel de $x=25\text{mm}$. La parte superior del tanque, dado la presencia de la pieza de telgopor, se la modela como aislada y finalmente se aplica un coeficiente de convección natural típico a la pared exterior del aislante con una temperatura del aire de 20°C . Esta misma temperatura ambiente es asignada como temperatura inicial de equilibrio del conjunto tanque-aislante. Se utiliza la aleación Al 5052 O como material, con sus propiedades constantes respecto a la temperatura.

Como primera instancia se procede a presentar el gráfico de evolución de temperaturas exteriores del ensayo de enfriamiento realizado y del resultado de esta primera modelización a la par (ver Figura 12). Entre los mismos se observan grandes diferencias, principalmente en la variación de las temperaturas en los niveles $x=0\text{mm}$ y $x=25\text{mm}$, las cuales en el modelo FEM las mismas varían abruptamente siguiendo la evolución de temperaturas que se produce en el interior del tanque. En cambio en el ensayo solo siguen la evolución de las temperaturas internas en los primeros segundos, luego presentan un comportamiento totalmente diferente respecto a la modelización, al nivel de que tardan casi lo mismo que las demás termocuplas en llegar a la temperatura de equilibrio.

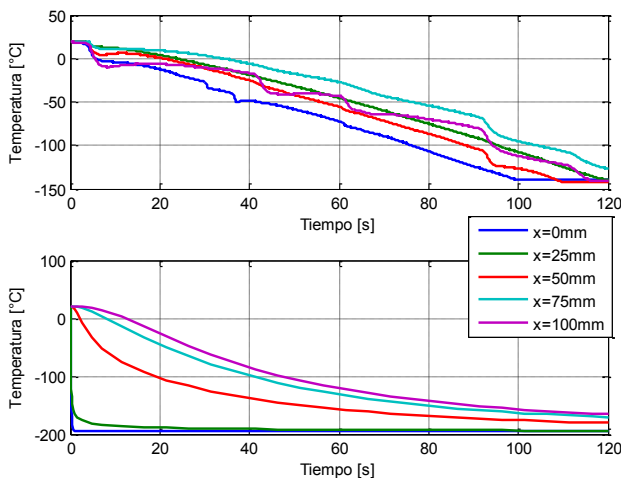


Figura 12 – Evolución de temperaturas, ensayo de enfriamiento vs. modelización 1.

Al evaluar las deformaciones de la modelización, ver Figura 14, se observan que los

máximos se producen en los instantes iniciales, para el nivel del líquido ($x=25\text{mm}$), decreciendo luego hacia el final de la simulación.

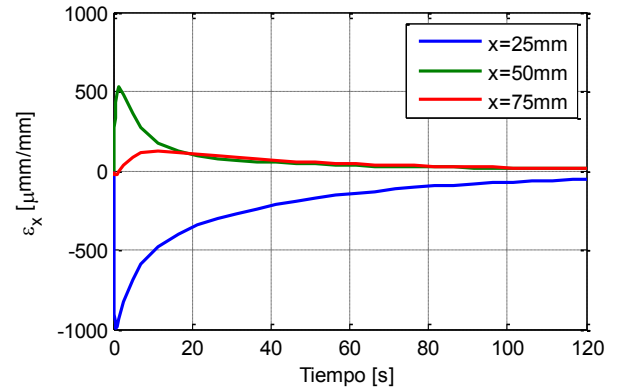


Figura 13 – Evolución de deformaciones longitudinales, 1ra modelización FEM.

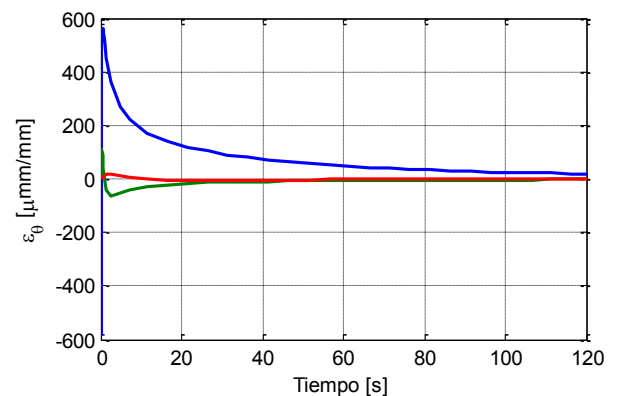


Figura 14 – Evolución de deformaciones transversales, 1ra modelización FEM.

Para finalizar la comparación se procede a graficar la diferencia de deformaciones, ver Figura 15. Nuevamente no se llega a correlacionar los valores obtenidos en el ensayo con los generados en la modelización.

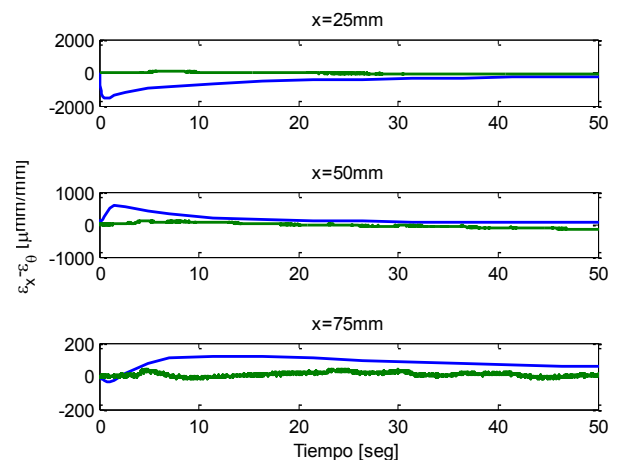


Figura 15 – Diferencia de deformaciones, ensayo de enfriamiento vs modelización 1.

Modelización 2

En esta segunda instancia se propone la incorporación de un retardo en la aplicación de la condición de temperatura en el interior del mismo, debido al comportamiento observado de las termocupas interiores en el ensayo de enfriamiento. Para lo mismo se aplica una a variación gradual de la temperatura hasta llegar a la temperatura criogénica en un intervalo de 6 segundos.

Al estudiar la evolución de temperatura de los diferentes puntos en la pared exterior para esta modelización (ver Figura 16) se observa que nuevamente en los niveles inferiores del tanque, 0 y 25mm, la temperatura baja abruptamente, a la par de la temperatura en el interior del tanque, mientras que para los niveles superiores la evolución no es tan abrupta y se asemeja a la obtenida en la modelización anterior.

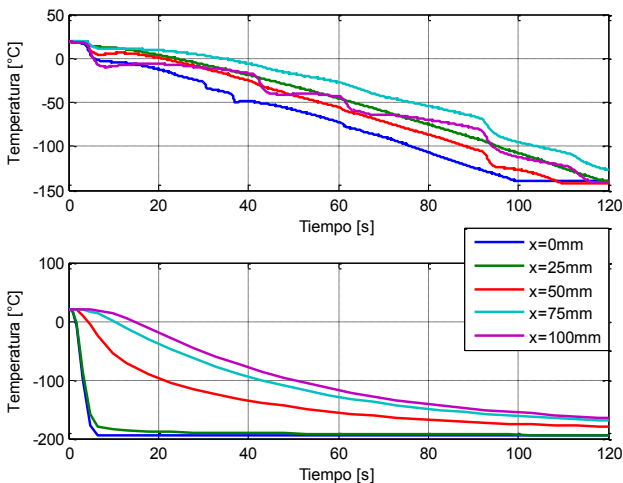


Figura 16 – Evolución de temperaturas, ensayo de enfriamiento vs. Modelización 2.

En cuanto a la evolución de las deformaciones se observa que los máximos son menores a los obtenidos con la aplicación instantánea de temperatura, y a su vez estos se encuentran desplazados en tiempo, produciéndose los mismos a los 5 segundos aproximadamente, instante antes de que se llegue a la temperatura mínima en el interior del tanque.

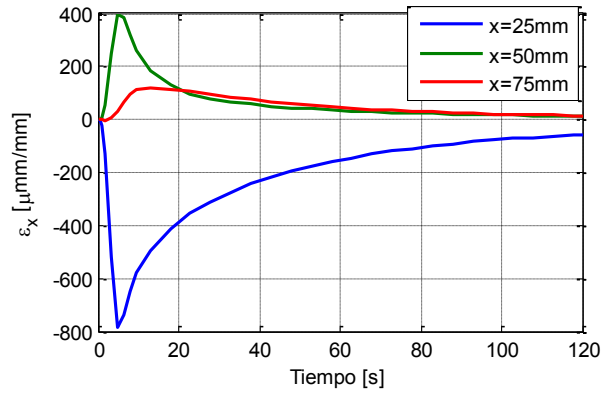


Figura 17 - Evolución de deformaciones longitudinales, 2da modelización FEM.

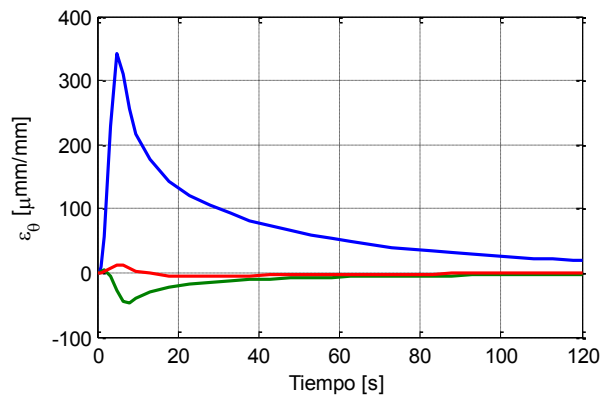


Figura 18 – Evolución de deformaciones transversales, 2da modelización FEM.

Por último se procede a comparar las diferencias de deformaciones obtenidas a partir de esta modelización con la relevada en el ensayo (ver Figura 19). En el gráfico se vuelve a observar que a pesar de disminuirse el nivel de deformaciones siguen existiendo grandes diferencias entre estos dos resultados.

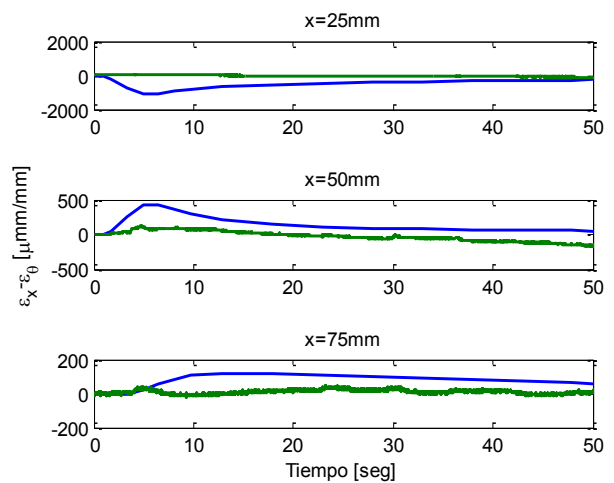


Figura 19 – Diferencia de deformaciones, ensayo de enfriamiento vs modelización 2.

Finalmente se concluye que la modelización del problema resulta compleja y no se puede terminar de validar, dado que a partir de la evolución de las temperaturas obtenida en el ensayo de enfriamiento se imposibilita la corrección de las deformaciones y tampoco se logra verificar que las condiciones de bordes impuestas sean correctas y por lo tanto se generen los gradientes reales.

Variación de las Propiedades

Como última parte se propone observar la diferencias obtenidas en el cálculo transitorio del llenado del tanque modelo a partir de variar el tipo de aleación. Los cálculos se realizan en base a la modelización 2, en la cual se aplica un retardo de 6 segundos hasta aplicar la temperatura criogénica en el interior del tanque. Los materiales utilizados se encuentran detallados en la Tabla 2, en la misma se destaca la presencia de una aleación de 6061-var, en la misma se procedió a cargar la variación de propiedades de esta aleación respecto a la temperatura. Para cada aleación se procedió a obtener de los resultados el tiempo para el cual se producía la máxima sollicitación y el valor de esta.

Al estudiar los resultados se destaca la diferencia que se obtiene para una misma aleación, 5052, al modelar diferente la aplicación de la temperatura del líquido criogénico, siendo esta cuatro veces mayor para la primera modelización, con aplicación instantánea de temperatura. En cuanto a las variaciones de los materiales se observa una correlación directa entre los valores de tensión alcanzados con la conductividad, generándose mayores esfuerzos para las aleaciones menos conductivas. Por último se verifica que al tener en cuenta las variaciones de las propiedades del material respecto a la temperatura se logran tensiones menores, esto se debe a que para este tipo de aleaciones el coeficiente de expansión térmica decrece más rápido de lo que aumenta la rigidez, lo que permite obtener resultados conservativos al aplicar las propiedades del material a temperatura ambiente. Esta conclusión resulta importante ya

que muchas veces, y más en etapas de anteproyecto, estas variaciones se desconocen.

Tabla 2 – Cargas máximas en modelos de enfriamiento para diferentes materiales.

Mod.	Material	K [W/m.K]	σ_{vm} máx. [MPa]	Tiempo [Seg]
1	5052	138	324.4	0.017
2	5052	138	78.24	4.9
2	6061	152	70.19	4.9
2	6061 -var	-	62.12	4.15
2	1100	222	65.76	4.5
2	3003	193	68.03	4.5

Por último se procede a estudiar para el caso de la modelización 2, con la aleación 5052 y para el tiempo en el que se produce la máxima sollicitación, los gradientes térmicos que la producen y las deformaciones y tensiones que generan estos gradientes en la longitud del tanque. A continuación se presenta la distribución del gradiente longitudinal (**Figura 20**) y en el espesor (**Figura 21**). Se observa que este último tiene un valor relativamente constante antes del nivel del líquido ($x=25\text{mm}$) y que a partir de este sufre un pico de 25°C para luego estabilizarse siendo nulo para el resto de la longitud del tanque.

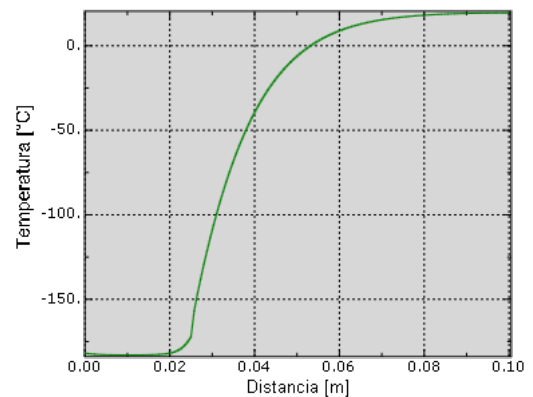


Figura 20 – Gradiente longitudinal de temperatura máximo, modelización de enfriamiento 2

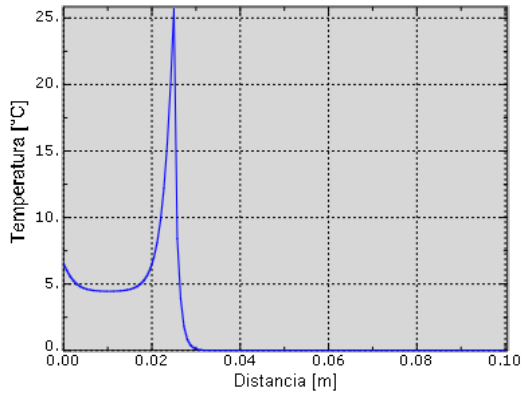


Figura 21 – Gradiente en el espesor de temperatura máximo, modelización de enfriamiento 2.

A continuación se encuentran graficada la distribución de deformaciones en la pared exterior, ver Figura 22, y la distribución de tensiones de von mises, Figura 23. En este último gráfico se observan como las tensiones máximas se producen en la pared interior, a lo igual que se había observado anteriormente.

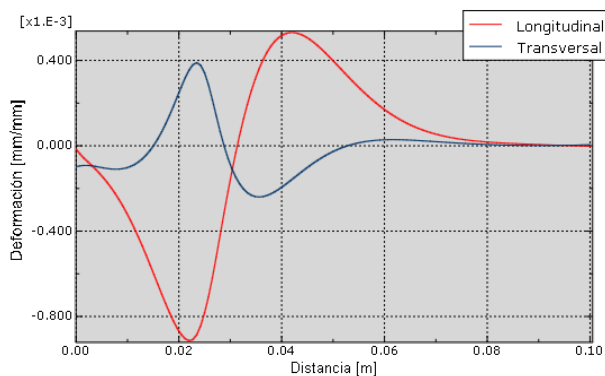


Figura 22 – Deformaciones en pared exterior, modelización de enfriamiento 2.

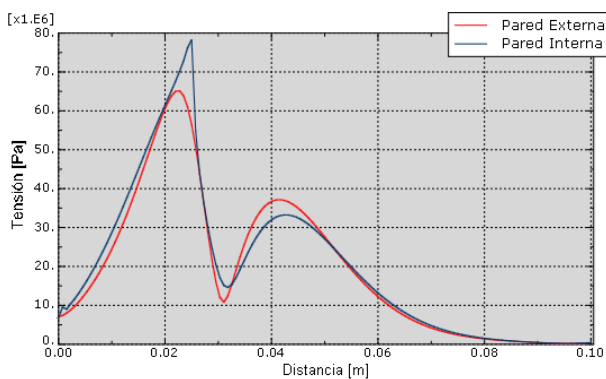


Figura 23 – Distribución de tensiones de von Mises, modelización de enfriamiento 2.

4.- CONCLUSIONES

Debido a los diferentes errores producidos en el ensayo de llenado del tanque con líquido criogénico no se logran verificar experimentalmente los resultados. Igualmente, se obtuvieron, a partir de los mismos, una serie de lineamientos que permitiría un mejoramiento en el desarrollo de este tipo de ensayos, como la importancia de obtener una correcta medición de la temperatura que permita conocer la evolución dinámica de temperaturas para luego realizar las correcciones necesarias en la medición de las deformaciones.

Igualmente se observa que las tensiones producidas en los diferentes casos evaluados no resultan despreciables, y más en un contexto de un desarrollo aeroespacial en el cual los factores de seguridad no son considerables. Por lo tanto resulta imprescindible tenerlas en cuenta para el dimensionamiento, o evitar que estos gradientes sean abruptos, realizando un pre-enfriamiento con los vapores producidos por el líquido criogénico.

Dado a no se lograron cumplir en la totalidad los objetivos propuestos se propone la realización de una serie de trabajos futuros para lograr cumplir con los mismos, basados en los conocimientos incorporados a partir de la realización de este trabajo.

- Modelización numérica del acoplamiento fluido-termo-estructural, que permita una mejor aplicación de las diferentes condiciones de borde.
- Mejorar la aislación del tanque modelo mediante la utilización de espuma de poliuretano expandible.
- Utilizar termocuplas de menor diámetro, con el fin de reducir los tiempos de retardo en la medición. También se propone mejorar la fijación de los sensores al tanque y utilizar pasta térmica en la unión para asegurar una buena transmisión de calor entre el objeto de medición y el sensor.

- De ser posible se aconseja la utilización de galgas extensiométricas que permitan medir en los rangos de temperaturas criogénicas de manera normal, no solo dinámicamente, y a su vez se recomienda utilizar las que poseen incorporadas un sensor de temperaturas.
- Por último se recomienda cambiar la geometría del tanque modelo, aumentando su tamaño para así evitar la influencia de las condiciones de borde en la medición.

5.- REFERENCIAS

[1] A. C. Ugural (1999). *Stresses in Plates and Shells*, 2nd ed., McGraw-Hill, New York. Capítulo 14.

[2] R. F. Barron, B. R. Barron (2012). *Design for Thermal Stresses*, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey. Capítulo 8.

[3] *Abaqus Analysis User's Guide – Part III Cap.6.5.3 Fully coupled thermal-stress analysis.*

[4] Material Property Data, Matweb, www.matweb.com.

[5] Micro-Measurements, www.micro-measurements.com. TN-504-1 – *Strain Gage thermal Output and Gage Factor Variation with Temperature*. TN-513-11 – *Measurement of Thermal Expansion Coefficient Using Strain Gages*. Datasheet 125UN – *General Purpose Strain Gages – Linear Pattern*.

[6] OMEGA Engineering, www.omega.com/techref/Z-section.html.