

OPTIMIZACIÓN ESTRUCTURAL DEL AISLADOR TÉRMICO DE UN MOTOR MONOPROPELENTE DE USO ESPACIAL

Salomone, Javier E. ^{(1)(2)(*)}

Giusti, Sebastián M. ⁽³⁾

Manavella, Luciano ⁽²⁾

Jazni, Jorge E. ⁽¹⁾⁽⁴⁾

Cova, Walter J. D. ⁽¹⁾⁽⁴⁾

⁽¹⁾ Instituto Universitario Aeronáutico, Centro de Investigaciones Aplicadas, Departamento Sistemas Electromecánicos

⁽²⁾ Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba, Departamento Mecánica

⁽³⁾ Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba, Departamento Civil - CONICET

⁽⁴⁾ Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba, CUDAR

^(*) Dirección Postal: Chubut 33 - B° Alberdi - C.P.: X5000LYA - Córdoba - Pcia. Córdoba - Argentina -
E-mail: jsalomone@scdt.frc.utn.edu.ar

RESUMEN

Los motores monopropelente basan su funcionamiento en la descomposición catalítica del combustible, generándose calor y emisión de gases. El diseño de la interface entre la válvula de control de suministro de combustible y el lecho catalítico es de fundamental importancia ya que de esto depende la duración de los sellos blandos y por ende la vida útil del dispositivo.

Los avances en el campo de las técnicas de simulación numérica permiten visualizar *a priori* el comportamiento estructural de elementos geoméricamente complejos y fuertemente comprometidos desde el punto de vista de las sollicitaciones mecánicas. Para el presente análisis se considerarán las condiciones ambientales de funcionamiento durante la misión como también los requerimientos mecánicos para la puesta en órbita. Se presentan los resultados obtenidos por aplicación de técnicas de Optimización Topológica basadas en el concepto de derivada topológica. Esta técnica permite obtener una expansión asintótica de un funcional de desempeño evaluado sobre la configuración original. El principal término de esta expansión es reconocida como la derivada topológica del funcional y mide la sensibilidad de la función de desempeño a la introducción de una perturbación singular en la topología que define el problema. Finalmente, se discuten de los resultados obtenidos y se presentan conclusiones y consideraciones acerca de futuros desarrollos.

1.- INTRODUCCION

Este tipo de motores es usualmente utilizado como efector para realizar correcciones de órbita y de actitud de satélites artificiales, en nuestro caso se trata de un satélite del tipo LEO. El presente trabajo se basa en los antecedentes del diseño de un motor monopropelente de 1.5 N de empuje expuesto por Salomone *et al.* en [1, 2].

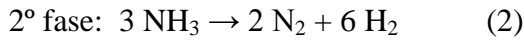
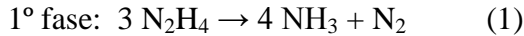
El propelente, en este caso hidracina, es conducido mediante un tubo de alimentación de

aleación platino-iridio que pasa al interior de la cámara de combustión del motor a través de un orificio practicado en la pared anterior de la misma.

En la zona de ingreso el tubo está soldado a la pared de la cámara para su fijación y sellado de la interfaz. A continuación, ya en el interior de la cámara, se encuentra el inyector mediante el cual el propelente es distribuido en el seno del lecho catalítico.

Cuando el combustible entra en contacto con el catalizador, se produce el quiebre de las moléculas según la siguiente reacción:

La hidracina en presencia del catalizador se descompone en 2 fases [3]:



En la primera fase el combustible se disocia catalíticamente en amoníaco y nitrógeno produciéndose una reacción exotérmica, mientras que en la segunda el amoníaco se disocia en nitrógeno e hidrógeno siendo esta fase una reacción de tipo endotérmica.

La liberación de energía neta durante la descomposición depende fundamentalmente del porcentaje de amoníaco disociado y la podemos calcular como:

$$\Delta H = 3484 - (1910 * X) \text{ J/gr.} \quad (3)$$

donde X es el porcentaje de amoníaco disociado, en nuestro caso asumiremos una descomposición del amoníaco de un 40% [3], cantidad esta que depende de la longitud del lecho catalítico.

Así:

$$\Delta H = 3484 - (1910 * 0,4) = 2720 \text{ J/gr.} \quad (4)$$

El motor en estudio se alimenta con un caudal másico de combustible de 0,8 gr/s por lo que genera en el lecho catalítico una cantidad de energía por unidad de tiempo:

$$Q = \Delta H \cdot \dot{m} = 2720 \text{ J/gr} * 0,8 \text{ gr/s} = 2176 \text{ Watt} \quad (5)$$

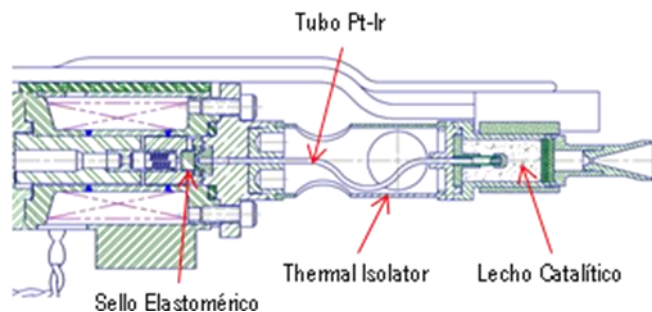


Figura 1. Motor monopropelente.

La Figura 1 muestra en corte los elementos componentes de la válvula proximal, el thermal isolator, elastómero, el tubo de Pt-Ir y el lecho catalítico.

El calor generado en el lecho catalítico es disipado mediante: (a) radiación al espacio que rodea al lecho, (b) conducción hacia el vehículo a través del tubo de alimentación y por el aislador térmico hacia la válvula proximal que conforma el conjunto motor. Alojada en la misma se encuentra el sello elastomérico que es sensible a temperaturas elevadas y es el elemento que se pretende proteger realizando un diseño óptimo del aislador térmico.

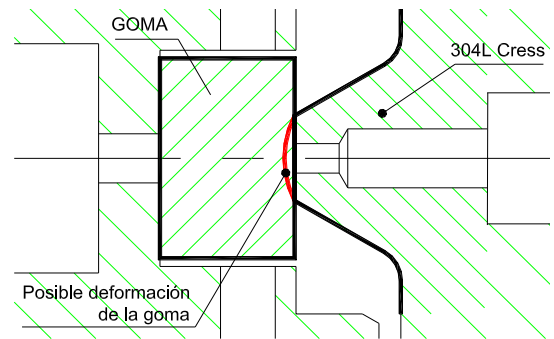


Figura 2. Detalle del cierre de la válvula.

El objetivo del presente trabajo es optimizar el diseño del aislador de manera que permita maximizar la disipación térmica por radiación y minimizar la conducción hacia el asiento de la válvula manteniendo su peso dentro de valores aceptables. Además, es necesario que el conjunto optimizado soporte las condiciones ambientales y las solicitaciones mecánicas que resulta de la puesta en órbita del componente.-

La optimización del aislador térmico será llevada a cabo mediante el uso de una técnica de optimización topológica basada en los conceptos de derivada topológica [8]. Esta técnica está basada en concepto del análisis de sensibilidad topológica [8,11] y permite obtener una expansión asintótica topológica de un funcional de desempeño evaluado sobre la configuración original. El término principal de esta expansión es conocido como la derivada topológica del

funcional y mide la sensibilidad de la función de desempeño ante la introducción de una perturbación singular en la topología que define el problema. Esto permite establecer la sensibilidad al cambio de topología en cada punto del dominio de proyecto.

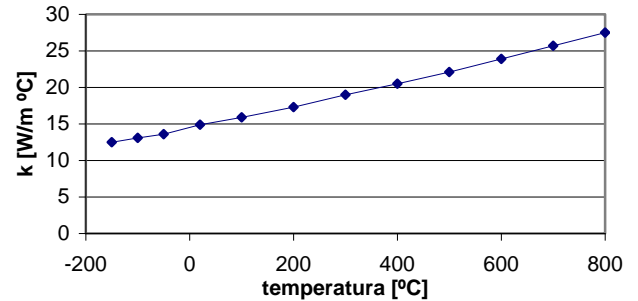
De manera general, un cambio topológico es materializado con la introducción de un hueco en el punto donde la sensibilidad alcanza su máximo o mínimo valor, según sea el objetivo que se persigue con la optimización. En este sentido, la noción de un cambio topológico comentada anteriormente, puede ser extendida para estudiar cómo dos materiales diferentes interactúan entre sí, permitiendo establecer la sensibilidad a un cambio en las propiedades constitutivas del material subyacente en cada punto del dominio de proyecto. Es de destacar que esta técnica ya ha sido aplicada satisfactoriamente en áreas tales como: problemas inversos [6], segmentación y mejoramiento de imágenes [7], optimización de estructuras [10,13] y diseño de materiales [11].

2.- METODOLOGIA

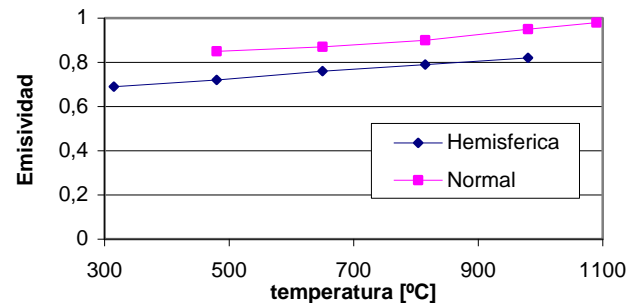
Para el abordaje apropiado del tema y dada su complejidad es necesaria la aplicación de las siguientes hipótesis simplificadoras:

- El material con que se realiza el aislador térmico es INCONEL y si bien tanto la emisividad como la conductividad térmica del INCONEL presentan dependencia con la temperatura como lo muestra la Figura 3, aunque en el presente trabajo dicha variación no será considerada. Si serán consideradas las propiedades constitutivas del material para la temperatura de operación que se sitúan alrededor de 500 °C.
- Se asumirá una modelización geométrica bidimensional por facilidad de implementación en el software de cálculo. Para ello se utilizará el desarrollo del cilindro que constituye el aislador

genérico transformándolo en un dominio geométrico de 2 dimensiones. Además, se tendrán en cuenta las condiciones de simetría.



(a) Conductividad térmica.



(b) Emisividad.

Figura 3. Propiedades del INCONEL 600 en función de la temperatura.

- Se considerará como fuente térmica el calor generado por la reacción química, los sumideros serán en conducción asumiendo $T_{amb}= 353^{\circ}K$ y $T_{vac}= 10^{\circ}K$.
- Para radiación se adoptará el valor del factor de vista como $f_v=1$ a la vez que la transferencia de calor por radiación se supondrá que se realiza solamente por la cara expuesta al espacio exterior.

Tal como lo mencionáramos en la sección anterior, la técnica a utilizar durante el proceso de optimización está basada en los conceptos del análisis de sensibilidad topológica y de la derivada topológica. A continuación, se describirán someramente los puntos principales de dichos conceptos.

Considérese un dominio geométrico bidimensional, denotado como Ω , con contorno cerrado y suave denotado por $\partial\Omega$. Asociada a ese dominio Ω se tiene una función de desempeño denominada $\psi(\Omega)$. Si en un punto arbitrario del dominio $\hat{x} \in \Omega$ introducimos un disco circular B_ε de radio ε y de un material diferente, el dominio perturbado por la introducción de esta perturbación singular queda ahora definido como $\Omega_\varepsilon = (\Omega \setminus B_\varepsilon) \cup B_\varepsilon$, ver Figura 4.

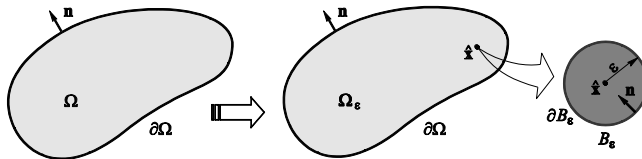


Figura 4. Dominios de análisis.

Suponiendo que la función de desempeño $\psi(\Omega)$ posee las propiedades de regularidad necesarias, es posible escribir una expansión asintótica topológica de la siguiente manera:

$$\psi(\Omega_\varepsilon) = \psi(\Omega) + f(\varepsilon)D_T(\hat{x}) + o(f(\varepsilon)), \quad (6)$$

donde $f(\varepsilon)$ es una función regularizadora tal que $f(\varepsilon) \rightarrow 0$ cuando $\varepsilon \rightarrow 0^+$; $D_T(\hat{x})$ es la derivada topológica asociada al punto \hat{x} y $o(f(\varepsilon))$ denota los términos de orden superior de la expansión en $f(\varepsilon)$. Con base en la expresión anterior, se tiene que la derivada topológica es definida extendiendo el concepto usual de derivada como:

$$D_T(\hat{x}) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\psi(\Omega_\varepsilon) - \psi(\Omega)}{f(\varepsilon)}. \quad (7)$$

Esta función, llamada derivada topológica, es utilizada en aplicaciones concretas como una dirección viable de descenso en algoritmos de optimización topológica [4,10].

Para el desarrollo del presente trabajo, se utilizará como función de desempeño el siguiente funcional:

$$\begin{aligned} \psi(\Omega) = & \frac{1}{2} \int_{\Omega} k \nabla \theta \cdot \nabla \theta d\Omega - \int_{\Omega} b \theta d\Omega \\ & + \int_{\Gamma_N} \bar{q} \theta d\Gamma_N + \lambda |\Omega|. \end{aligned} \quad (8)$$

Los primeros tres términos del funcional $\psi(\Omega)$ representan la energía potencial total asociada al problema de conducción estacionaria de calor y el último término representa el volumen de material a ser optimizado, el cual se encuentra penalizado por el parámetro λ . En la expresión anterior, k es la conductividad térmica del material, b una fuente interna de calor, \bar{q} el flujo térmico actuante en el contorno de Neumann $\Gamma_N \in \partial\Omega$ y θ indica el campo de temperatura y es solución de la ecuación de estado asociada al dominio original (sin perturbación)

$$\begin{cases} -k\Delta\theta = b & \text{en } \Omega \\ -k \frac{\partial\theta}{\partial n} = \bar{q} & \text{sobre } \Gamma_N, \\ \theta = \bar{\theta} & \text{sobre } \Gamma_D \end{cases} \quad (9)$$

donde $\bar{\theta}$ es un valor de temperatura prescrito sobre el contorno de Dirichlet.

Como parámetro de perturbación se asumirá que el nuevo material a introducir posee una conductividad térmica diferente al actual, tal que

$$k_{nuevo} = \gamma k_{ant}, \quad (10)$$

donde γ es el cociente entre la conductividad térmica del material subyacente y el nuevo material.

La minimización del funcional $\psi(\Omega)$ propuesto anteriormente cumple con los objetivos propuestos en este trabajo, ya que: (i) la

minimización de la energía potencial total definirá la topología óptima que menor cantidad de calor conduce y (ii) el problema de maximizar la disipación de calor en forma de radiación hacia el espacio es equivalente, bajo las hipótesis enunciadas anteriormente, a maximizar la superficie expuesta (representada por el término $\lambda|\Omega|$). Por lo tanto, entre estos dos factores existe una competencia, donde la primera parte intentará minimizar la superficie de conducción y, a su vez, el último término intentará maximizar la superficie expuesta.

La derivada topológica para el funcional formulado anteriormente está dada por [3,4,11]:

$$D_T(\hat{x}) = -k \frac{1-\gamma}{1+\gamma} \nabla \theta(\hat{x}) \cdot \nabla \theta(\hat{x}) + \lambda. \quad (11)$$

Cabe destacar que la derivada topológica es un campo escalar que depende de la temperatura asociada al dominio original de proyecto (sin perturbación) y del parámetro γ que representa la magnitud de la perturbación que se desea introducir.

Es interesante mencionar que si el nuevo material sobre el que se busca establecer la sensibilidad es un aislador térmico ideal (conductividad térmica $k_{vacío} = 0$) la derivada topológica para este caso en particular se obtiene tomando límite de la expresión anterior cuando $\gamma \rightarrow 0$

$$D_T(\hat{x}) = -k \nabla \theta(\hat{x}) \cdot \nabla \theta(\hat{x}) + \lambda \quad (12)$$

De los algoritmos disponibles en la literatura especializada, se empleará uno especialmente diseñado para ser utilizado conjuntamente con derivada topológica. Este algoritmo está basado en la descripción geométrica del dominio mediante una curva de level-set [5,9], cuya forma y evolución durante el proceso de optimización es guiada por los valores de la derivada topológica. Una descripción

completa y detallada de este algoritmo puede ser encontrada en [5,11].

3.- DESARROLLO

3.1- Modelo computacional y optimización

El dominio original de proyecto es un tubo cilíndrico de 27.2 mm de largo, 10.65 mm de diámetro interior y 11.75 mm de diámetro exterior, según puede verse en la Figura 5. El material utilizado durante el procedimiento de optimización es el descrito en la Sección 2, teniendo en cuenta las hipótesis mencionadas en la misma sección.

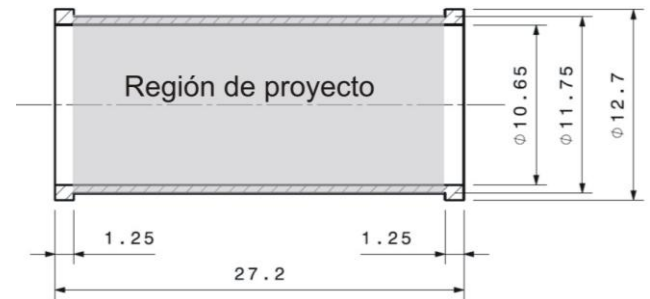


Figura 5. Región de proyecto.

Las condiciones de contorno establecidas en régimen estacionario durante el tiempo de operación del motor son:

- Temperatura prescrita de $\bar{\theta} = 60 \text{ }^\circ\text{C}$ en la interface aislador térmico-válvula proximal.
- Flujo térmico prescrito de $\bar{q} = 28 \text{ Watt/mm}^2$ en la zona del motor que está en contacto con el lecho catalítico.

Por razones económicas se desea minimizar el volumen de INCONEL 600 para la producción del motor; por lo tanto, para el procedimiento de optimización se considerará la introducción de vacíos ($\gamma = 0$) en vez de un nuevo material.

El dominio del modelo computacional y sus condiciones de contorno son mostrados en la Figura 6.

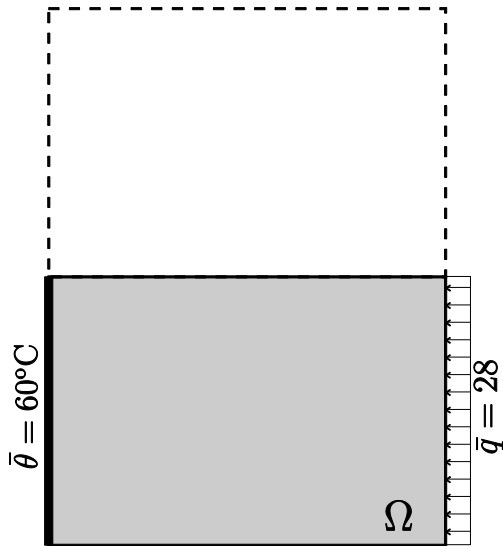


Figura 6. Modelo computacional.

La Figura 7 muestra el resultado final obtenido luego de 73 iteraciones del algoritmo de optimización. La zona sombreada representa al material INCONEL 600, mientras que la parte blanca significa vacío. Este resultado muestra un volumen final reducido a un 70% respecto del volumen inicial.

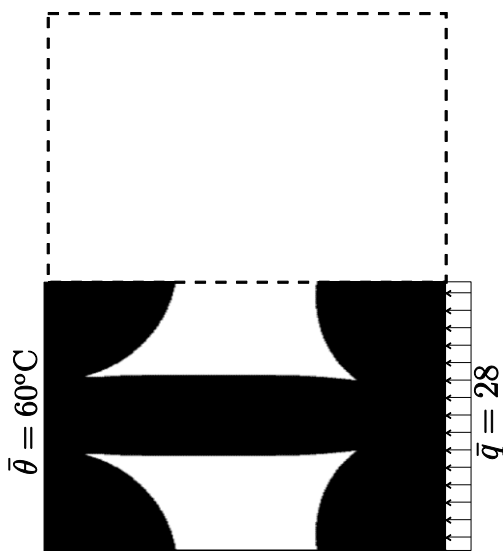


Figura 7. Resultado obtenido (iter. 73).

3.2- Interpretación de resultado

El resultado mostrado en la Figura 7, representa la topología óptima, bajo las hipótesis

utilizadas, del aislador térmico desde el punto de vista de la transferencia estacionaria de calor, Ec.(9). Por lo tanto, la configuración obtenida corresponde a un mínimo local del funcional mostrado en Ec.(8). Se constata que la topología obtenida presenta una gran superficie expuesta (disipación de calor por radiación) y una región de menor tamaño (constituida por una barra de sección no uniforme) por donde se realiza la conducción del calor generado. En la Figura 8 se muestra la configuración final del aislador térmico optimizado.

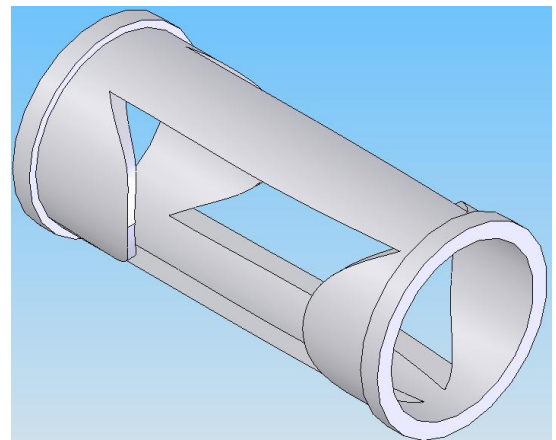


Figura 8. Solución teórica.

3.3- Validación estructural del resultado

El resultado anterior corresponde a la topología óptima del aislador térmico bajo las condiciones de transferencia estacionaria de calor. Este análisis por sí mismo no es aplicable a un desarrollo tecnológico, ya que este tipo de componente debe cumplir con ciertos criterios de resistencia estructural, propios de su funcionamiento como parte integral de un sistema mecánico más complejo. Por lo tanto, en esta sección, se procede a validar estructuralmente el componente optimizado.

El resultado teórico mostrado en la sección anterior presenta regiones de potenciales problemas desde el punto de vista estructural mecánico, como por ejemplo, ángulos muy cerrados donde se desarrollarán regiones de concentración de tensión. Por ello, se propone una solución de ingeniería basada en la solución

teórica. En la Figura 9 se muestra la configuración adoptada, donde el cambio principal introducido ha consistido en eliminar los puntos conflictivos antes mencionados.

Durante el régimen de operación del vehículo, el aislador térmico debe soportar una carga estática equivalente de 14.7N a una distancia de 32 mm medida desde la interface con el lecho catalítico. El componente estructural optimizado será ensayado computacionalmente bajo las condiciones antes mencionadas para dos posiciones diferentes del vector de cargas: (i) dirección vertical y (ii) dirección horizontal.

En la Figura 10 se muestra el modelo computacional de elementos finitos utilizado para la validación estructural.

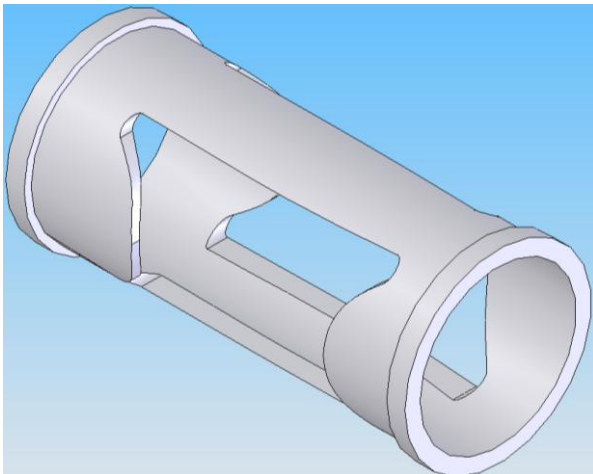


Figura 9. Solución de ingeniería.

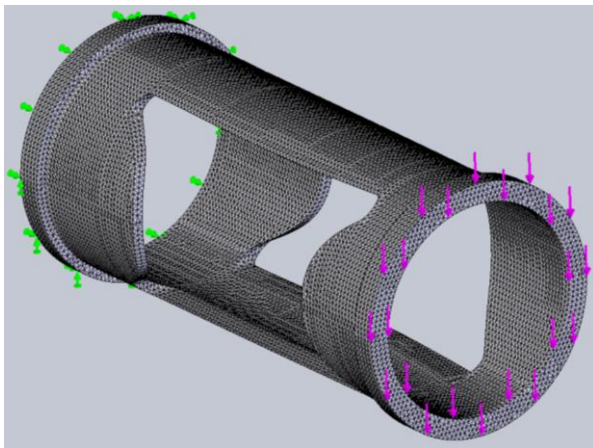


Figura 10. Modelo computacional de FEM.

En las Figs. 11 y 12 se muestran los estados de tensión correspondientes a las cargas descritas previamente.

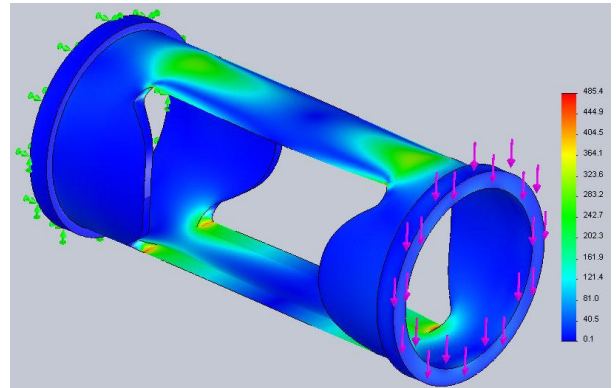


Figura 11. Tensión de von Mises en MPa: max. 485.0 (rojo) – min. 0.1 (azul). Aplicación de la carga vertical.

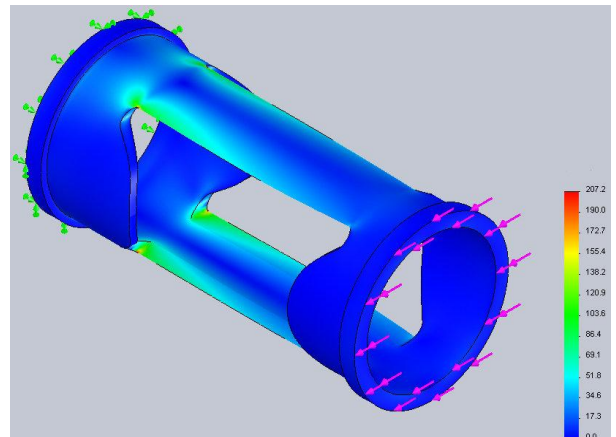


Figura 12. Tensión de von Mises en MPa: max. 207.0 (rojo) – min. 0.01 (azul). Aplicación de la carga horizontal.

CONCLUSIONES

En este trabajo fueron presentados los resultados de la optimización topológica de un aislador térmico de un motor monopropelente de uso espacial, para el caso de transferencia estacionaria de calor. La función desempeño formulada ha tenido como objetivo minimizar la superficie de conducción de calor y maximizar la superficie expuesta al espacio (pérdida de calor por radiación). La topología obtenida tiene un volumen del 70% del original y fue evaluada estructuralmente para cargas del régimen de operación. Si bien los resultados obtenidos fueron satisfactorios, ya que la tensión de von Mises

actuante es levemente superior a la admisible del material ($\sigma_y = 280\text{MPa}$), debe tenerse en cuenta que durante la formulación del problema de optimización solo se consideró el aspecto térmico del problema. Entonces, no puede afirmarse que la configuración obtenida sea óptima desde el punto de vista mecánico. Esta situación está siendo estudiada y será motivo de futuros trabajos de investigación y desarrollo tecnológico.

AGRADECIMIENTOS

La presente investigación fue desarrollada en el marco del proyecto de investigación "Análisis del comportamiento termomecánico de un motor monopropelente" UTN-FRC y apoyada financieramente por el CONICET. Los autores agradecen a estas instituciones el apoyo brindado.

REFERENCIAS

[1] SALOMONE, J. E. - JAZNI, J. E.- LAGIER, S.- COVA, W.J.D.- GONZALEZ, G. J.- YASIELSKI, R. **Desarrollo de motor monopropelente de 1,5 N Para control de actitud y órbita de satélites- AATE 2007**

[2] CAGLILOLO, C. M. - SALOMONE, J. E. JAZNI, J. E. - LAGIER, S. **Análisis del comportamiento térmico del conducto de alimentación de combustible en motores monopropelente de bajo empuje- AATE 2007**

[3] GIUSTI S.M., NOVOTNY A.A., SOKOŁOWSKI J. (2010). **Topological derivative for steady-state orthotropic heat diffusion problema.** Struct. Multidisc. Optim. Vol. 40,53-64.

[4] AMSTUTZ S. (2006). **Sensitivity analysis with respect to a local perturbation of the material property.** Asymptot. Anal. 49 (1-2),87-108.

[5] AMSTUTZ S, ANDRA H. (2006). **A new algorithm for topology optimization using a**

level-set method. J. Comput. Phys. 216(2),573-588.

[6] FEIJÓO G. (2004). **A new method in inverse scattering based on the topological derivative.** Inverse Probl. 20(6),1819-1840.

[7] LARRABIDE I., FEIJÓO R.A., NOVOTNY A.A., TAROCO E. (2008). **Topological derivative: a tool for image processing.** Comput Struct 86(13-14),1386-1403.

[8] SOKOŁOWSKI J., ZOCHOWSKI A. (1999). **On the topological derivatives in shape optimization.** SIAM J. Control Optim. 37(4),1251-1272.

[9] ALLAIRE G., GOURNAY F., JOUVE F., TOADER A. (2005). **Structural optimization using topological and shape sensitivity via a level-set method.** Control Cybern. 34(1),59-80.

[10] GIUSTI S.M., NOVOTNY A.A., PADRA C. (2008). **Topological sensitivity analysis of inclusion in two-dimensional linear elasticity.** Eng. Anal. Bound. Elem. 32(11),926-935.

[11] AMSTUTZ S., GIUSTI, S.M., NOVOTNY, A.A., DE SOUZA NETO E.A. (2010). **Topological derivative for multi-scale linear elasticity models applied to the synthesis of microstructures.** Int. J. Numer. Meth. Engng. 48 (6),733-756.