

## “Diseño de Tapas de Registro sujetas a la Norma EN-124 Aplicando el Método de Elementos Finitos y la Teoría de Modelos.”

Mauricio Alba<sup>1</sup>, Eduardo Orces<sup>2</sup>, Ignacio Wiesner Falconi<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Ingeniero Mecánico 2004; Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción - Escuela Superior Politécnica del Litoral

<sup>2</sup>Ingeniero Mecánico; Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción - Escuela Superior Politécnica del Litoral, Campus Politécnico Prosperina Km. 30.5 Vía Perimetral-Guayaquil, Ecuador, [eorces@espol.edu.ec](mailto:eorces@espol.edu.ec).

<sup>3</sup>Ingeniero Mecánico; Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción - Escuela Superior Politécnica del Litoral, 1971, Postgrado México, UNAM - Politécnico de México, Investigador Visitante del CENIM – España y el IPT – Brasil, Profesor de ESPOL desde 1975 Campus Politécnico Prosperina Km. 30.5 Vía Perimetral-Guayaquil, Ecuador, [intramet@hotmail.com](mailto:intramet@hotmail.com)

### Resumen

*En el presente trabajo se expone el diseño de una tapa de registro tipo D-400 utilizadas en obras públicas, de acuerdo a la norma EN-124. Para el diseño de la misma se utiliza la técnica de los elementos finitos, por tratarse de un elemento que posee una forma no convencional, con ayuda de este método se realiza una optimización de las dimensiones para obtener mejor resistencia con menor peso.*

*A fin de establecer una comprobación de los resultados de cálculos encontrados con el método de elementos finitos se realizaron pruebas de laboratorio con modelos a escala 1:2, hechos de aluminio, equipados con galgas extensométricas para medir los esfuerzos reales a los que están sometidos los modelos al someterlos a las pruebas exigidas por la norma, que consiste en aplicar y retirar 2/3 de la carga de prueba en el centro de la tapa.*

*Por último se selecciona el material más adecuado para la fabricación de la tapa, de acuerdo a la resistencia que deberá tener el material, costos, y facilidad de fabricación en nuestro medio para competir con las importadas.*

**Palabras claves:** Elementos finitos, teoría de modelos, Tapas de Registro, Norma EN-124, Hierro Dúctil, Fundición en Partes.

### Abstract

*In the present article it is presented the design of a cover lid type D-400 as used in public works, according to the EN-124 standard. Due to the complex shape of the lid, the finite element method of analysis is used to optimize the dimensions of the lid for high strength and low weight.*

*In order to verify the results from the finite element analysis, laboratory tests were performed with 1:2 scale models made of aluminum and instrumented with strain gages to measure the actual stresses acting on the lid. To follow the EN-124 standard recommendations, 2/3 of the proof load was applied and withdrawn at the center part of the lid.*

*Finally, the material for the lid was selected taking proper account of strength, costs and ease of manufacturing to make it competitive with imported lids.*

### 1. Introducción

En vista de los requerimientos del municipio de poseer tapas de registro más seguras, hubo la necesidad de importar tapas con las características

necesarias. Aunque la fabricación de un dispositivo de cubrimiento es fácilmente llevada a cabo, proponer un diseño que esté dentro de la norma no lo es, es por esto la necesidad de llevar a cabo un estudio para proponer una solución adecuada que

cumpla con la norma y a la vez sea competitivo frente a productos extranjeros similares.

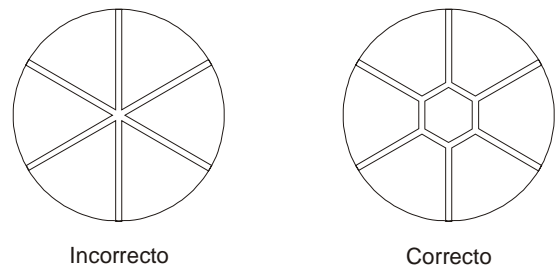
La norma EN-124, describe a los dispositivos de cubrimiento y cierre de manera muy general, solo se exponen los posibles materiales de los cuáles pueden ser hechos estos dispositivos, ensayos de tipo, dimensiones recomendadas, etc. Para la selección de la forma más adecuada se utilizan técnicas informáticas, el sentido común dice que si se trata de una membrana se le puede añadir rigidez agregando costillas radiales, pero estas costillas deben cumplir las condiciones necesarias para poder ser fundidas, y a la vez poseer la forma más apropiada para que soporte los esfuerzos a los que va a ser sometida. Así, por ejemplo, con el método de los elementos finitos se encuentra que el número de nervios adecuado es de 6, y por problemas de solidificación de la fundición estos tienen que estar conectados entre si por un hexágono, en vez de todos coincidir en el centro de la tapa ya que de esta forma no sería posible fundir piezas sanas.

El propósito de este estudio es diseñar una tapa de registro que pueda pasar la norma antes mencionada, diseñando al elemento primero en el computador con elementos finitos y luego comprobando los resultados en un modelo. En el diseño existen dos variables a determinar, la primera es la altura de las costillas o nervios de la tapa, y el otro es el tamaño del polígono en el que se conectan los nervios radiales.

Haciendo variar el tamaño del polígono hasta que los esfuerzos disminuyan y luego la altura hasta que se alcance el nivel de esfuerzos deseados, se obtienen las dimensiones requeridas. Luego se comprueba que dichos esfuerzos se cumplirán en la realidad, comparando valores tomados de un modelo (a escala 1:2) con los valores predichos; de estar correcto el planteamiento con elementos finitos, estos dos valores deberán coincidir o estar próximos.

## 2. Materiales y Métodos

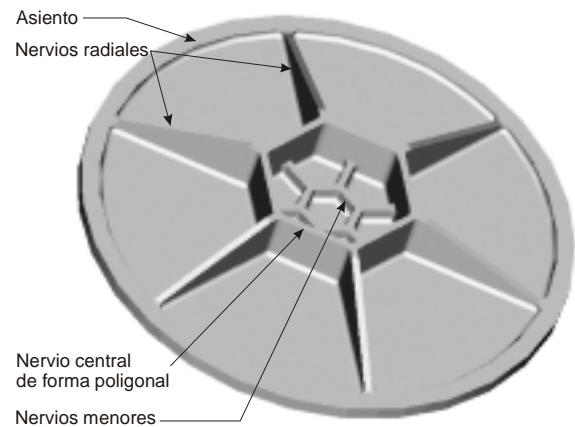
Como se dijo antes la tapa consta de un disco el cual es reforzado con ayuda de una estructura nervada distribuida radialmente. Estos nervios radiales no pueden llegar y encontrarse en el centro de la tapa ya que causarían problemas en la fundición. Por esto se decidió agregar un nervio adicional de forma poligonal en el centro que resuelve el problema de fundición y no afecta a la resistencia de la tapa, tal como se ilustra en la figura 1.



**Figura 1.** Adición de un nervio poligonal central para resolver problemas de fundición.

La cota de paso seleccionada, es decir el diámetro de la abertura libre de la caja de registro, es de 600mm que es el diámetro recomendado para permitir el paso de personas a las cajas de revisión, pero el diámetro de la tapa es de 650mm, debido a que se tiene que considerar el asiento de la tapa. Se consideró que este asiento es suficiente para asegurar una operación silenciosa y estable de la tapa. De esta manera queda un asiento de 25mm de ancho. Tal como se observa en la figura 2.

Los nervios radiales van disminuyendo en altura, siendo máxima cerca del centro y mínima en los exteriores porque los esfuerzos van a ir disminuyendo a medida que nos acercamos a los apoyos. También se agregaron nervios menores en el centro similar a los antes mencionados, para dar mejor resistencia a la parte que no es ocupada por ninguno de los nervios de los que se habló anteriormente.



**Figura 2.** Descripción de la tapa

El ensayo de las tapas debe llevarse a cabo como un conjunto completo y en condiciones de utilización, la fuerza de control que se deberá aplicar es de 400kN. La máquina de ensayo debe ser preferentemente una prensa hidráulica que sea capaz de aplicar una fuerza al menos un 25% mayor que la correspondiente fuerza de control, debiendo la fuerza de control ser mantenida con una tolerancia del  $\pm 3\%$ . Los platos de carga y las formas de los platos de carga son como se muestra en la figura 3,

El plato de carga deberá ser colocado de tal forma que su eje vertical esté perpendicular a la superficie y coincida con el centro geométrico de la tapa. La tapa se apoyará normalmente en el marco. La fuerza de control se distribuirá uniformemente a lo largo de toda la superficie del plato de carga y cualquier irregularidad será compensada por medio de una placa de madera u otro material parecido.

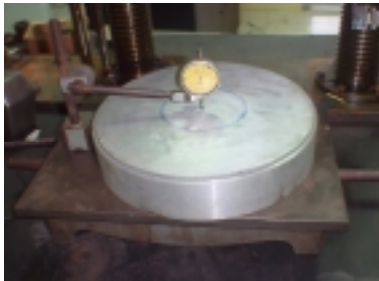
Los ensayos de este tipo se deberán realizar sobre tres piezas, para comprobar que cumplen las prescripciones correspondientes antes de solicitar una certificación por terceros.

Las tapas deberán ser sometidas a los siguientes ensayos:

- Medida de la flecha residual de la tapa después de aplicar 2/3 de la fuerza de control.
- Aplicación de la fuerza de control

Antes de que la carga sea aplicada, debe medirse el valor inicial de la flecha en el centro geométrico de la tapa, a continuación la carga se aplica con una velocidad entre 1kN/s y 5kN/s y se llega hasta 2/3 de la fuerza de control, después de esto la carga se retirará, esta operación se la repetirá por 5 ocasiones.

La flecha residual debe determinarse como la diferencia de las distintas lecturas de medida tomadas antes de la primera y después de la quinta carga, el dato final no deberá exceder 2mm.



**Figura 3.** Tapa siendo medida la flecha residual

A continuación se aplica la fuerza de control, con la misma velocidad indicada anteriormente, hasta alcanzar el valor requerido. Esta fuerza deberá mantenerse por 30 a 32 segundos, y durante el ensayo las tapas hechas de hierro fundido, acero fundido o acero laminado no deberán fisurarse.

Las dimensiones de la estructura nervada son una parte esencial de la tapa, porque es justamente en esta estructura donde se van a soportar la mayor parte de las cargas y las dimensiones adecuadas darán como resultado un elemento de gran resistencia y un peso bajo. Es importante escoger un criterio de falla adecuado; el criterio elegido es el de Von Mises por ser el recomendable para materiales dúctiles como el hierro dúctil y el acero fundido.

Otra consideración muy importante es la condición de apoyo en los bordes de la tapa. Se considera que está simplemente apoyada a través de todo su borde, y que la carga se aplica uniformemente en el centro de la tapa de acuerdo a como se dijo antes. La carga aplicada en el programa de elementos finitos, corresponde a 2/3 de la carga de prueba, es decir 266.66kN. Se hace esto porque la medición de la flecha residual se hace justamente después de haber aplicado 5 veces esta carga, la aplicación total de la carga solo se hace una vez y tan solo se exige que no existan fisuras visibles.

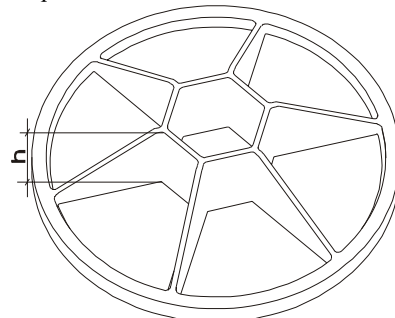
### 3. Análisis por Elementos Finitos y Teoría de Modelos

Utilizando un programa de elementos finitos se modeló la tapa con elementos sólidos tetraédricos con el objeto de determinar las dimensiones de la tapa que minimizaran los esfuerzos de Von Mises en los puntos críticos.

El primer parámetro determinado es el espesor de la tapa, valor que será utilizado también para los nervios. El valor elegido es de 10mm, aunque espesores menores darían menor peso y soportarían los esfuerzos. Sin embargo, se escogió este valor por facilidad del colado de la pieza.

Una vez escogido el espesor se procede a determinar el número de nervios óptimo con el cual la estructura va a soportar mejor las cargas. Esto se llevó a cabo calculando los esfuerzos con elementos finitos para varias tapas con diferente número de nervios, y comparando, para un esfuerzo dado, el peso con otras tapas que tienen un diferente número de nervios.

Cuando se han seleccionado el número de nervios radiales que van a ser utilizados, se necesita saber cual va a ser el tamaño del nervio central de forma hexagonal. Se escogió esta figura por ser la que mejor se comportó al distribuir los esfuerzos, haciéndolos mínimos. En la figura 4 se indica el parámetro que indica el tamaño con la letra **h**.



**Figura 4.** Altura de los nervios

El peso es un factor importante en el diseño; cuando se usaba hierro fundido el peso de estas tapas podía superar los 100kg. Para determinar la altura de los nervios se considera el peso y los esfuerzos. A partir de problemas similares como lo son vigas sometidas a flexión, se sabe que entre mas alto el nervio mejor resistencia va a tener la tapa. Poniendo como techo un peso de 45 kilogramos se hace variar la altura de los nervios hasta que se tenga un esfuerzo satisfactoriamente bajo. Finalmente el peso de la tapa de acuerdo a las medidas encontradas es de 42Kg. El resultado de  $h$  es 100mm después de realizar varias iteraciones.

Para comprobar los resultados obtenidos por elementos finitos se utilizaron modelos a escala 1:2 de la tapa, por la dificultad de fabricar un modelo de tamaño natural y del material final. Entonces se deberá escalar la carga de prueba adecuadamente así como las propiedades del material empleado.

Para hacer el escalamiento, usamos la teoría de modelos a escala. Este es un problema físico con  $n-1$  variables independientes, lo cual puede ser expresado como una relación funcional:

$$q_1 = f(q_2, q_3, q_4 \dots q_n)$$

donde  $q_1$  es el parámetro dependiente y  $q_2, q_3, q_4 \dots q_n$  son los  $n-1$  parámetros independientes; podemos despejar al parámetro dependiente y expresarlo en una forma equivalente así:

$$g(q_1, q_2, q_3, q_4 \dots q_n) = 0$$

Se puede demostrar que los  $n$  parámetros independientes se pueden agrupar en  $n-m$  grupos adimensionales independientes, o parámetros  $\Pi$ , de tal manera que la relación funcional queda:

$$G(\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \dots, \Pi_{n-m},) = 0$$

Donde  $m$  suele ser, aunque no necesariamente, el numero mínimo de dimensiones independientes requeridas para especificar todos los parámetros  $q_2, q_3, q_4 \dots q_n$ ; estos parámetros no son únicos y dependerán de cómo se eligieron las variables. Se puede expresar a un parámetro  $\Pi$  cualquiera, en función del resto, matemáticamente se tiene:

$$\Pi_1 = G_1(\Pi_2, \Pi_3, \Pi_4, \dots, \Pi_{n-m},)$$

Aplicando esta relación entre el prototipo y el modelo nos da:

$$\Pi_{1p} = G_1(\Pi_{2p}, \Pi_{3p}, \Pi_{4p}, \dots, \Pi_{(n-m)p},)$$

$$\Pi_{1m} = G_1(\Pi_{2m}, \Pi_{3m}, \Pi_{4m}, \dots, \Pi_{(n-m)m},)$$

Donde los subíndices se refieren al prototipo y al modelo respectivamente, ahora se dice que existe similitud cuando:

$$\Pi_{ip} = \Pi_{im}$$

La definición de esfuerzo en su forma dimensional mas simple se puede escribir como:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Donde  $F$  y  $A$  son la fuerza y el área respectivamente. Escribiéndolo en términos de sus dimensiones, y tomando un sistema de dimensiones  $[F][L][T]$ :

$$\sigma = \frac{[F]}{[L^2]}$$

Se obtiene el primer parámetro adimensional  $\Pi$ , si se escala todas las dimensiones con un mismo factor podemos escribir:

$$\Pi_1 = \frac{P}{\sigma s^2}$$

Donde  $P$  es la carga sobre la tapa y  $s$  es un factor de escala.

La carga de prueba es escalada utilizando el parámetro  $\Pi_1$ , y recordando la condición de similitud  $\Pi_{ip} = \Pi_{im}$ , se tiene que:

$$\Pi_1 = \frac{P}{s^2}$$

$$\Pi_{1m} = \Pi_{1p}$$

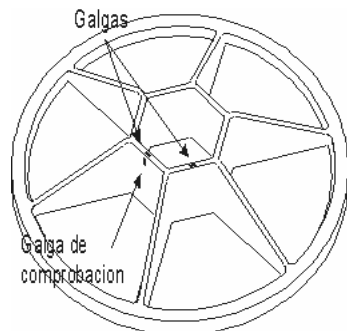
$$\frac{P_m}{\sigma_m s_m^2} = \frac{P_p}{\sigma_p s_p^2}$$

Despejando la carga sobre el modelo:

$$P_m = \frac{P_p}{\frac{\sigma_p}{\sigma_m} \left( \frac{s_p}{s_m} \right)^2}$$

De donde  $\sigma_p$  se lo obtiene de los resultados adquiridos anteriormente por elementos finitos, y corresponden al máximo esfuerzo, que sucede en la parte mas baja de la tapa. En cambio  $\sigma_m$ , corresponde al esfuerzo de fluencia encontrada en las probetas correspondientes al material de los modelos. La relación  $\frac{s_p}{s_m}$ , tiene un valor de 2, ya que como se dijo antes el modelo fue construido a la mitad de la escala.

En el caso de los modelos en los cuales se han montado galgas extensométricas, se aplica la carga y se toma el valor de los esfuerzos. Las galgas están montadas en la parte mas baja de la tapa, en el lugar donde se generarán los mayores esfuerzos, aunque los esfuerzos que van a ser obtenidos no son los principales estos se acercan con un 98,7% al valor de los esfuerzos principales, según el modelo en elementos finitos.



**Figura 5.** Colocación de las galgas extensométricas

Primero se cargo la tapa con cargas entre 500 y 700Kg, y se comparó el esfuerzo esperado en un prototipo con ayuda del parámetro:

$$\sigma_p = \frac{P_p / P_m}{1 / \sigma_m \left( \frac{s_p}{s_m} \right)^2}$$

Luego con los resultados encontrados con elementos finitos se escala la carga a la cual se espera fluencia en el prototipo con el parámetro

$$P_m = \frac{P_p}{\frac{\sigma_p}{\sigma_m} \left( \frac{s_p}{s_m} \right)^2}$$

Se encuentra la deformación esperada en las galgas con:

$$\sigma = E\varepsilon$$

Y se compara la carga esperada, con la carga encontrada en los experimentos.

## 4. Resultados

En la selección del número de nervios óptimo, se comparó para un esfuerzo dado (haciendo variar la altura en cada caso, hasta que el esfuerzo sea del valor de referencia) el peso con otras tapas que tienen un diferente número de nervios. Escogiendo como referencia un valor de 450 MPa causado por una carga de 400kN, se genera la tabla 1

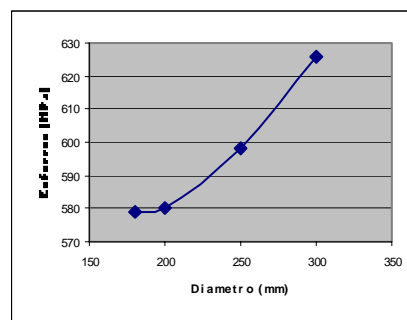
**TABLA 1**

Comparación del peso de diferentes tapas para una misma resistencia

Numero de nervios	Peso de los nervios (Kg.)
5	16.3
6	15.9
7	16.8
8	17.7

Se probaron 2 tapas con galgas extensométricas, 2 tapas midiendo la flecha residual y 2 tapas se ensayaron hasta la ruptura.

Para determinar el tamaño del polígono central, para un altura fija del nervio central, con una carga de 500kN, se hizo variar el tamaño y luego se graficaron los resultados, que se presentan en la figura 6.

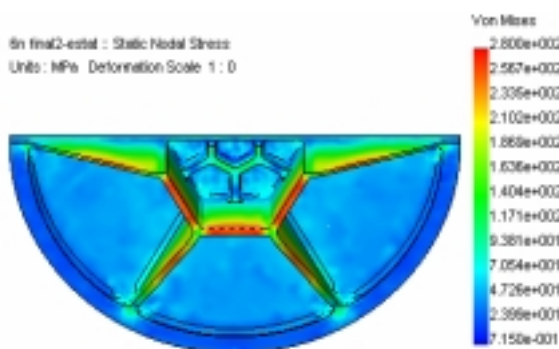


**Figura 6.** Esfuerzo vs. Diámetro de la circunferencia de referencia

Una vez seleccionado los parámetros anteriores se varia la altura de los nervios hasta obtener un valor de esfuerzos lo suficientemente bajo. Los resultados encontrados se presentan a continuación, en la tabla 2 y la figura 7

**Tabla 2**  
Esfuerzos para varias alturas de los nervios de las tapas

Altura de los nervios (mm)	Peso de la tapa (Kg.)	Esfuerzo encontrado (MPa)
70	38.98	382MPa
80	40.20	321MPa
90	40.62	279MPa



**Figura 7.** Distribución final de esfuerzos sobre la tapa

Las tapas sometidas a pruebas de medición de la flecha residual, no presentaron deformación apreciable. Los resultados encontrados por las galgas se presentan en la siguiente tabla

**Tabla 3**

Resultados de la deformación determinados por las galgas en modelo a escala 1:2

El material del cual se hicieron los modelos a escala, tenía un esfuerzo de fluencia de 131.78MPa, un esfuerzo último de 167.72Mpa y módulo del Young de 71Gpa y corresponde a la aleación UNS 713.0. De acuerdo con estas propiedades la fluencia de la galga se presentará en la tapa cuando:

$$P_m = \frac{266\text{kN}}{\frac{280}{136}(2)^2} = 3298\text{Kg}$$

Ahora, cuando la tapa alcance fluencia en el punto donde está instalada la galga, se establecerá una deformación de:

$$136 \times 10^6 \text{ Pa} = 71 \times 10^9 \text{ Pa}(\epsilon)$$

$$\epsilon = 1.845 \times 10^{-3}$$

La carga a la cual se presentó fluencia fue de 3150Kg

La carga necesaria para causar ruptura en un prototipo se la puede calcular con el mismo parámetro  $\Pi_1$ , se tendrá:

$$\sigma_p = \frac{P_p/P_m}{1/\sigma_m \left( \frac{s_p}{s_m} \right)^2}$$

$$\sigma_p = \frac{400/50.4}{1/167.72(2)^2} = 332.77\text{MPa}$$

## 5. Resultados de Laboratorio

Las tapas ensayadas en laboratorio hasta la ruptura soportaron 5150Kg, rompiéndose en el centro del nervio como lo muestra la figura:



**Figura 8.** Tapa ensayada hasta la ruptura

De acuerdo a los resultados encontrados, la

Carga en modelo (Kg.)	Micro-Deformación ( $\times 10^{-6}$ )	Esfuerzo Modelo (Pa)	Esfuerzo prototipo (Pa)
500	296	21016000	285931258
550	337	23927000	295942365
600	370	26270000	297845060
650	400	28400000	297225840
700	443	31453000	305664931

selección del material con que deben ser hechas las tapas fundidas que estén de acuerdo con la Norma EN 124 debe poseer un esfuerzo de fluencia de 285MPa y una resistencia de 333MPa.

El esfuerzo predicho por el modelo entre las cargas de 500 a 700Kg, tuvieron un error de hasta el 10%, mientras que la carga a la cuál se presentó fluencia en el modelo tuvo una desviación del 5% con el valor esperado por los elementos finitos, de esta manera los resultados encontrados son confiables y las dimensiones encontradas pueden utilizarse para la fabricación de estos dispositivos.

## 6. Conclusiones

- La utilización del método de los elementos finitos para calculo estructural de la tapa normalizada demostró ser una herramienta muy apropiada para determinar la máxima capacidad de carga de la tapa, lo cual junto con la teoría de modelos, permitió verificar los resultados mediante pruebas de laboratorio.
- Se han identificado todos los parámetros requeridos para la fabricación en serie de una tapa normalizada de alta confiabilidad, tanto en lo que se refiere a las formas y medidas además de la calidad de metal con los que deben hacerse para que cumplan con la norma.
- Los materiales de fabricación que cumplen con las propiedades encontradas son el acero fundido y el hierro dúctil; cualquiera de ellos se puede utilizar para la fabricación de este dispositivo. Una ventaja en este caso particular del acero al carbono, es su poco atractivo al robo ya que es un material de bajo valor comercial que tiene un costo de producción mas bajo que el hierro dúctil y prácticamente ningún valor como pieza fundida.

## 7. Recomendaciones

- Dado el alto grado de confiabilidad de los resultados obtenidos recomendamos, se aplique la presente metodología para diseños de partes fundidas que sean de mayor complejidad tecnológica.

## 8. Bibliografía

- 1) R. K. Livesley; Elementos Finitos: Introducción para Ingenieros; primera edición, 1988; Editorial Limusa.
- 2) [www.eafit.edu.co/mecanica](http://www.eafit.edu.co/mecanica)
- 3) Thomas G. Beckwith, Roy D. Marangoni, John H. Lienhard; Mechanical measurements; quinta edición, 1993; Editorial Addison-Wesley Publishing Company.
- 4) Metal Handbook Ninth Edition, Tomo 1, American Society for Metals (ASM).
- 5) Popov, Egor; Mecánica de sólidos; Segunda Edición, 200; Pearson Educación.
- 6) Shigley, Joseph; Mishke, Charles R.; Diseño en Ingeniería Mecánica; Quinta Edición, 2000; McGraw-Hill.