

Desarrollo de Tapas de Registro Aplicando Métodos Informáticos y Teoría de Modelos y Prototipos

David Alba Lucero¹, Ignacio Wiesner²

¹Ingeniero Mecánico 2003

²Director de Tesis, Ingeniero Mecánico, Escuela Superior Politécnica del Litoral, 197X, postgrado en -----, profesor de la ESPOL desde 197x

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 europea EN-124. Para el diseño de la misma se utiliza el método 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 el mejor diseño estructural para tener el menor peso.

Dado que el método de los elementos finitos es un modelo puramente matemático el uso de teoría de modelos y prototipos, es utilizado para comprobar que los resultados esperados se cumplirán en la realidad. Entonces se usa modelos a escala 1:2, hechos de aluminio, dos de los cuales se equipa con galgas extensométricas en las cuáles se miden los esfuerzos reales a los cuales estará sometido el modelo y el resto se somete a las pruebas exigidas por la norma, que es aplicar y retirar 2/3 de la carga de prueba en el centro de la tapa (En este caso 400kN) 5 veces y medir la deflexión permanente donde fue aplicada la carga.

Por último se selecciona el material más adecuado para la fabricación de la tapa, de acuerdo a los siguientes parámetros: Resistencia que deberá tener el material, costos y facilidad de fabricación.

Introducción

En vista de los requerimientos del municipio de poseer tapas de registro más seguras, para evitar el robo de las mismas, asegurar el contenido que poseen, etc.; este se vio en 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 establece las definiciones, clases, materiales, especificaciones relativas a los principios de construcción y ensayos, marcado y control de calidad, además describe 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 un membrana se le puede añadir rigidez agregando costillas radiales, pero estas costillas deben cumplir las condiciones para ser fundidas, y a la vez poseer la forma más óptima para que soporte los esfuerzos a los que va a ser sometida. Con el método de los elementos finitos se encuentra que el número de nervios adecuado es de 6, y por principios de fundición estos tienen que estar conectados entre si por un hexágono, por la razón que de encontrarse todos en el centro de la tapa, no sería posible fundir adecuadamente.

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 en el presente caso) con los valores predichos; de estar correcto el planteamiento con elementos finitos, estos dos valores deberán coincidir.

Contenido

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.

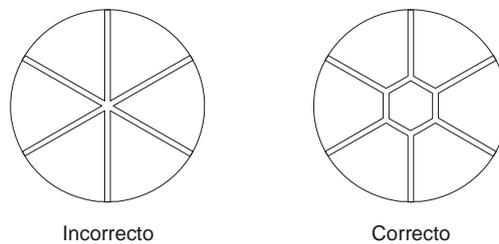


Figura 1. Adición de un nervio poligonal central para resolver problemas de fundición.

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.

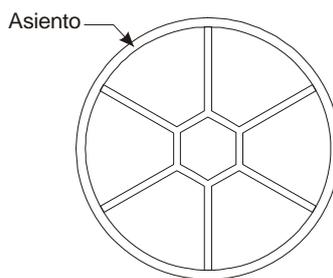


Figura 2. Asiento de la tapa

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 se acerca 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 hablo anteriormente.

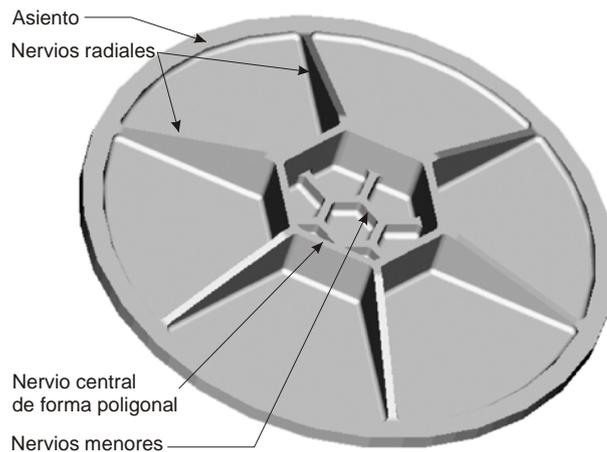


Figura 3. Descripción de la tapa

El ensayo de las tapas debe llevarse a cabo como un conjunto completo y en condiciones de utilización, en caso de que la tapa sea de un material diferente al acero fundido, laminado, hierro fundido u hormigón podrán ser requeridas pruebas adicionales.

La fuerza de control que se deberá aplicar es de 400kN, la máquina de ensayo, preferentemente una prensa hidráulica será capaz de aplicar una fuerza al menos un 25% mayor que la correspondiente fuerza de control, la fuerza de control debe ser mantenida con una tolerancia del $\pm 3\%$. Los platos de carga y las formas de los platos de carga es como se muestra en la figura 1,

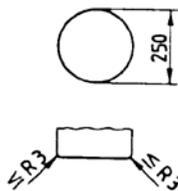


Figura 4. Platos de carga

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 intercalar, que puede ser de un material blando como fibra, madera, fieltro u otro material similar. Los ensayos de tipo se deberán realizar sobre tres piezas tipo, 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, para este caso.

A continuación se aplica la fuerza de control, esta se aplicará con la misma velocidad indicada anteriormente, hasta ser alcanzada. Esta fuerza deberá mantenerse por 30 a 32 segundos, 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. El criterio de falla elegido es el criterio de Von Mises por no ser tan conservador, de aquí en adelante cuando se hable de esfuerzo se estará hablando del esfuerzo de Von Mises, a no ser que se especifique lo contrario.

Otra consideración muy importante son las condiciones de borde en la tapa, se considera que está simplemente apoyada a través de todo su borde, y la carga es aplicada 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 después de haber aplicado 5 veces esta carga.

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, se escogió este valor por fundición, este es un espesor que podría ser fundido sin mayores problemas.

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 lo llevó a cabo calculando los esfuerzos con elementos finitos para varias tapas con diferente número de nervios, y para un esfuerzo dado se compara 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 cuya forma es un hexágono, para ello se toma como parámetro el diámetro de la circunferencia que encierra al hexágono mas interior como muestra la figura:

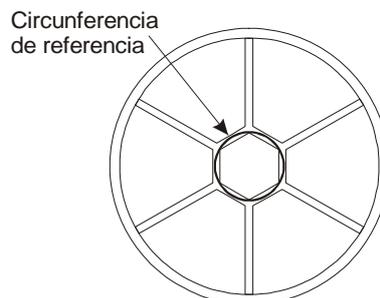


Figura 6. Circunferencia de referencia para dimensionar el nervio central

Para determinar el mejor diámetro se hizo variar solo el diámetro de la circunferencia de referencia, luego con los resultados encontrados se trazó una gráfica, observando su comportamiento se obtuvo el mejor diámetro.

El siguiente parámetro a determinar es la altura de los nervios exteriores, ahora se agregan los nervios menores centrales, estos tendrán una altura de 20mm, valor escogido para facilidad de moldeo

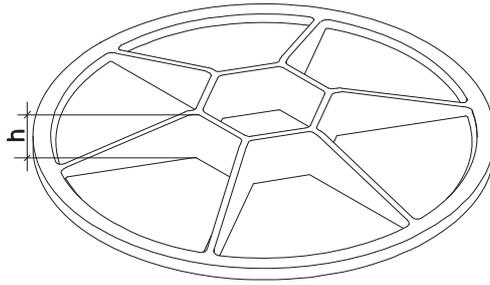


Figura 7. Altura de los nervios

El peso es un factor importante en el diseño; el peso de las tapas, cuando se usaba hierro fundido el peso de estas tapas podía superar los 100kg. Para determinar la altura de los nervios, el peso y los esfuerzos sirven de guía; 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.

Después de esto se tendrá las medidas para las cuáles una tapa soportará las cargas necesarias. Ahora se necesita comprobar los resultados encontrados con elementos finitos se cumplirán en la realidad. Para esto el uso modelos a escala 1:2 es necesario, por la razón de no poseer una máquina de prueba adecuada, y por la dificultad de fabricar un modelo de tamaño natural y del material final, entonces se deberá escalar la carga de prueba adecuadamente, partiendo del teorema de pi de Buckingham, las condiciones de similitud se pueden escribir en función de parámetros adimensionales o números pi así:

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

Donde los subíndices se refieren al prototipo y al modelo respectivamente.

La definición de esfuerzo en su forma 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 unidades $[F][L][T]$:

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

Se obtiene el primer parámetro Π utilizado, si se escala todas las dimensiones con un mismo factor se puede 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 Π_1 , y recordando la condición de similitud $\Pi_{ip} = \Pi_{im}$, se tiene que:

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

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

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

De donde σ_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 σ_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.

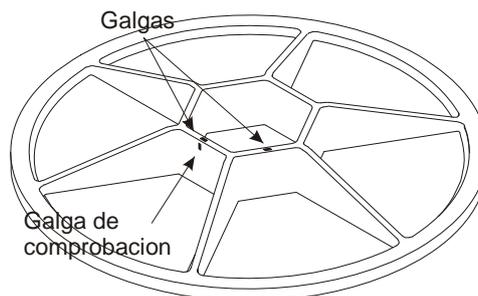


Figura 8. Colocación de las galgas extensométricas

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

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

Luego con los resultados encontrados con elementos finitos se escala la carga a la cual se espera fluencia en el prototipo con el mismo parámetro ahora escribiéndolo como:

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

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.

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 causada por una carga de 400kN, se genera la siguiente tabla:

**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 al 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.

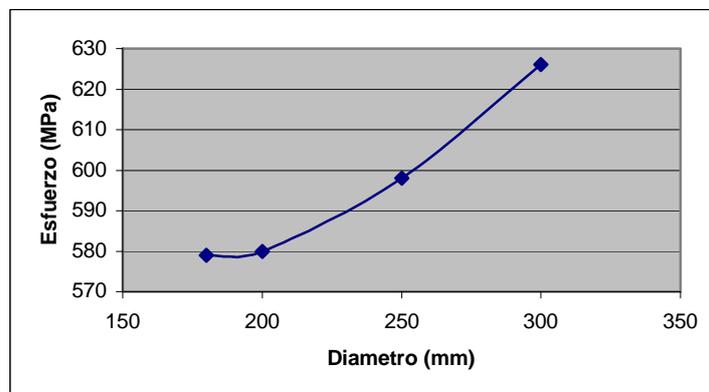


Figura 9. Esfuerzo vs. Diámetro de la circunferencia de referencia

Una vez seleccionado los parámetros anteriores se hace variar la altura de los nervios hasta que se obtenga un valor de esfuerzos lo suficientemente bajo, los resultados encontrados se presentan a continuación.

**Tabla 2
Esfuerzos para varias alturas 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

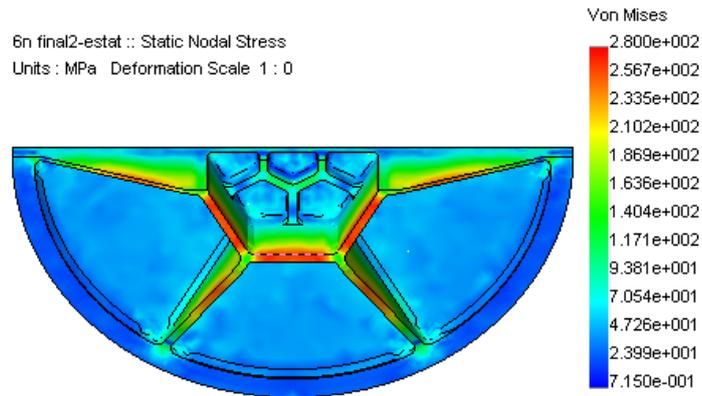


Figura 10. Distribución final de esfuerzos sobre la tapa

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
Esfuerzos en modelos

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

El material del cual estaban hechos los modelos, tenía un esfuerzo de fluencia de 131.78MPa, un esfuerzo último de 167.72Mpa y módulo del Young de 71Gpa. La fluencia se presentará en la tapa cuando:

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

Ahora, cuando la tapa alcanzase fluencia en donde esta instalada la galga, se encuentra una deformación de:

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

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

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 Π_1 , así se tiene:

$$\sigma_p = \frac{P_p/P_m}{1/\sigma_m \left(\frac{s_p/s_m}{2} \right)^2}$$
$$\sigma_p = \frac{400/50.4}{1/167.72 (2)^2} = 332.77\text{MPa}$$

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



Figura 11. Tapa probada hasta la ruptura

De acuerdo a los resultados encontrados, se necesita un material con un esfuerzo de fluencia de 285MPa y un resistencia de 333MPa.

Conclusiones

De la tabla 1 el número óptimo de nervios está entre 5 y 6 nervios, se decide escoger 6 nervios, porque se tenía un ahorro de peso mayor. De la figura 8, se escoge 200 milímetros de radio para la circunferencia de referencia, observando la gráfica se puede ver que un menor radio no contribuye en mucho a la resistencia y mas bien va a complicar el moldeo en la fabricación.

Las tapas ensayadas hasta la ruptura presentaron fractura en una de las caras del nervio poligonal, que es donde se esperaba que los esfuerzos sean mas elevados, validando una vez mas los resultados encontrados por el método de los elementos finitos.

El error entre los valores predichos y los encontrados estuvo entre el 5 y 10%, demostrando la confiabilidad del método de los elementos finitos y de la teoría de modelos y prototipos, de aquí que se puede ver que la fabricación de tapas de registro que cumplan con la norma EN-124 se puede llevar a cabo utilizando el método aquí descrito para su diseño.

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.

Por el método utilizado se puede concluir que las tapas fabricadas bajo las medidas encontradas pasarán las pruebas exigidas por la norma. Por el bajo peso del diseño se puede fabricar este dispositivo de una manera competitiva, a demás por el material seleccionada (el acero fundido), posee una seguridad adicional contra el robo, por no ser útil para los fundidores locales, de nada sirve su robo.

Los posibles materiales de fabricación son acero fundido y hierro dúctil de acuerdo a los requerimientos del material encontrados, cualquiera de ellos se puede utilizar para la fabricación de este dispositivo. Prefiriendo el acero por no poder ser fundido por métodos convencionales, y de esta manera hacer inútil el robo de las mismas.

Recomendaciones

Otro de los requerimientos de la tapa es un sistema antirrobo, el dispositivo sugerido se muestra en la figura, consta de una bisagra desmontable y un seguro.

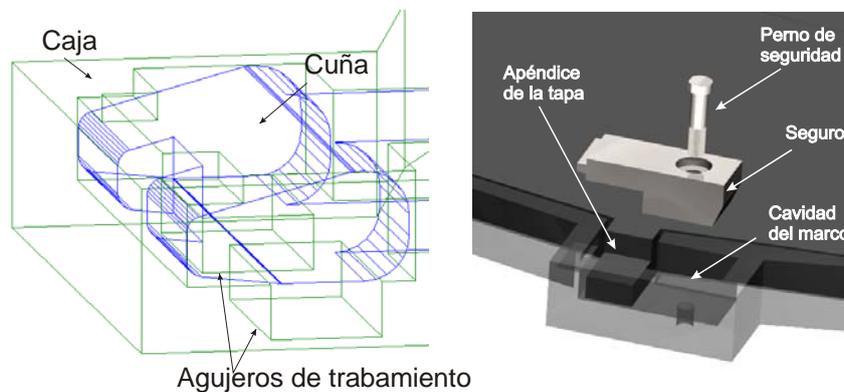


Figura 12. Bisagra y seguro

La seguridad está en la forma de la cabeza del perno que no tiene que ser de una forma convencional.

Bibliografía

- 1) D. Alba, "Aplicación de la Norma EN-124 para la fabricación de tapas de registro tipo D-400" (Tesis, Facultad de Ingeniería Mecánica, Escuela Superior Politécnica del Litoral, 2003)
- 2) R. K. Livesley; Elementos Finitos: Introducción para Ingenieros; primera edición, 1988; Editorial Limusa.
- 3) www.eafit.edu.co/mecanica
- 4) Thomas G. Beckwith, Roy D. Marangoni, John H. Lienhard; Mechanical measurements; quinta edición, 1993; Editorial Addison-Wesley Publishing Company.
- 5) Tomo 1 del Manual de la American Society of Materials (ASM).
- 6) Popov, Egor; Mecánica de sólidos; Segunda Edición, 200; Pearson Educación.
- 7) Shigley, Joseph; Mishke, Charles R.; Diseño en Ingeniería Mecánica; Quinta Edición, 2000; McGraw-Hill.