

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la
Producción**

**“Aplicación de la norma EN-124 para la fabricación de tapas
de registro tipo D-400”**

TESIS DE GRADO

Previo a la obtención del Título de:

INGENIERO MECÁNICO

Presentada por:

David Mauricio Alba Lucero

GUAYAQUIL-ECUADOR

Año: 2003

AGRADECIMIENTO

A Dios, a todas las personas que colaboraron en la realización del presente trabajo, a mis padres por su incondicional apoyo en todo momento y al Ing. Ignacio Wiesner por su ayuda e invaluable consejos

DEDICATORIA

A MI PADRE

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN

Ing. Francisco Andrade S.
SUBDECANO DE LA FIMCP
PRESIDENTE

Ing. Ignacio Wiesner F.
DIRECTOR DE TESIS

Ing. Eduardo Orces P.
VOCAL

Ing. José Pacheco M.
VOCAL

DECLARACION EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de esta Tesis de Grado, me corresponden exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”

(Reglamento de graduación de la ESPOL)

David Alba Lucero

RESUMEN

La presente tesis tiene por objetivo proponer un diseño apropiado, cumpliendo con normas internacionales, para la fabricación de tapas de registro usadas en obras públicas, permitiendo el uso de materiales diferentes al tradicional hierro fundido. Para la determinación de un diseño apropiado se hace uso de la norma EN-124 que cubre esta clase de partes. De esta manera se logran importantes ventajas como son la reducción de peso y costos, abriendo un nuevo mercado con un producto competitivo frente al extranjero. Para lograr un diseño adecuado se usa un programa de elementos finitos cuyos resultados son posteriormente comprobados con ayuda de un modelo de una escala adecuada.

En el primer capítulo se muestra el diseño de la tapa de registro, aquí se hace especial énfasis en la geometría de la estructura nervada que conforma la tapa, ya que gracias a esta la tapa podría soportar grandes cargas sin generar esfuerzos que puedan necesitar de un material difícil de obtener, a continuación se realizan pruebas sobre un modelo adecuadamente escalado; luego se hace una descripción del marco, de los diferentes parámetros que mandan en sus dimensiones y características (Diámetros, espesores, agujeros de reducción de peso, etc). A continuación se determinan estos parámetros con ayuda de software de elementos finitos sobre modelos

realizados en un programa de CAD (Computer Aided Design) adecuado (Mechanical Desktop).

En el capítulo 2 se hace una descripción general de las características del acero fundido y de los grados registrados en las normas y seleccionados de acuerdo a la aplicación que aquí se trata. Lo mismo se hace con el hierro dúctil a fin de establecer a través de este análisis ingenieril el material satisfactorio que cumpla con los objetivos de esta tesis.

Por último en el capítulo 3 se realiza el análisis de costo de producción en serie de la tapa y se comparan los diferentes materiales de fabricación como lo son el acero fundido, el hierro nodular y el tradicional hierro gris.

INDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN.....	I
INDICE GENERAL.....	II
ABREVIATURAS.....	IV
SIMBOLOGÍA	V
INDICE DE FIGURAS	VII
INDICE DE TABLAS.....	VIII
INDICE DE PLANOS.....	IX
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPITULO 1	
1. DISEÑO DE LA TAPA DE REGISTRO Y SU MARCO	
1.1 Diseño de la tapa.....	3
1.1.1 Descripción de la tapa.....	4
1.1.2 Dimensionamiento de la estructura nervada de la tapa.....	6
1.1.3 Pruebas experimentales de la tapa.....	15
1.1.3.1. Análisis dimensional y similitud.....	16
1.1.3.2. Descripción de las pruebas experimentales.....	19
1.1.3.3. Interpretación de los resultados obtenidos.....	22
1.2 Diseño del marco.....	29

1.2.1	Descripción del marco.....	29
1.2.2	Diseño del marco.....	31
1.3	Dispositivo de acerrojamiento de la tapa.....	34
1.3.1	Descripción y especificaciones.....	34
CAPITULO 2		
2. MATERIALES UTILIZABLES		
2.1	Acero fundido.....	41
2.1.1	Principales propiedades del acero fundido.....	42
2.1.2	Grados del acero fundido de acuerdo a la norma ISO-3755.....	51
2.2	Hierro dúctil o de grafito esferoidal.....	54
2.2.1	Principales propiedades del hierro dúctil.....	56
2.2.2	Grados del hierro dúctil de acuerdo a la norma ASTM.....	58
CAPITULO 3		
3.	ANÁLISIS DE COSTOS.....	61
CAPITULO 4		
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	
4.1	Conclusiones.....	67
4.2	Recomendaciones.....	68

APÉNDICES

BIBLIOGRAFÍA

ABREVIATURAS

Kg	Kilogramos
kN	Kilonewtons
kN/mm ²	Kilonewtons por milímetro cuadrado
kN/s	Kilonewtons por segundo
m	Metros
mm	Milímetros
mm ²	Milímetros cuadrados
Pa	Pascales
MPa	Mega pascales
GPa	Giga pascales
g/cm ²	Gramos por centímetro cuadrado
μm	Micrómetro

SIMBOLOGÍA

CP	Cota de paso
ρ	Densidad
π	Constante pi= 3.1416
h	Altura de los nervios
F	Fuerza
A	Área
P	Carga sobre la tapa
s	Factor de escala
Π_i	Parámetro pi sub-i
E	Módulo de young
R	Resistencia de la galga extensométrica
ΔR	Variación de la resistencia de la galga

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Adición de un nervio poligonal central para resolver problemas de fundición.....	4
Figura 1.2	Asiento de la tapa.....	5
Figura 1.3	Descripción de la tapa.....	6
Figura 1.4	Circunferencia de referencia para dimensionar el nervio central.....	9
Figura 1.5	Esfuerzo vs. Diámetro de la circunferencia de referencia.....	11
Figura 1.6	Altura de los nervios.....	11
Figura 1.7	Círculos inscritos en los nervios de la tapa.....	14
Figura 1.8	Distribución final de esfuerzos sobre la tapa.....	15
Figura 1.9	Colocación de las galgas extensométricas.....	21
Figura 1.10	Tapa ensayada con galgas extensométricas	24
Figura 1.11	Tapa siendo medida la flecha residual.....	26
Figura 1.12	Tapa en máquina de ensayos.....	26
Figura 1.13	Tapa probada hasta la ruptura.....	27
Figura 1.14	Tapa ensayada hasta la ruptura.....	28
Figura 1.15	Descripción del marco.....	30
Figura 1.16	Marco con todos sus elementos.....	30
Figura 1.17	Primera condición de borde.....	31
Figura 1.18	Resultados de la primera condición e borde.....	32
Figura 1.19	Segunda condición de borde.....	33
Figura 1.20	Resultados de la segunda condición de borde.....	34
Figura 1.21	Bisagra del conjunto tapa-marco.....	35
Figura 1.22	Secuencia de funcionamiento de la bisagra.....	36
Figura 1.23	Holgura entre el marco y la tapa.....	36
Figura 1.24	Cabeza del perno.....	38
Figura 1.25	Seguro de la tapa.....	39
Figura 1.26	Dimensiones del seguro.....	40
Figura 2.1	Tasas de corrosión promedio de las diferentes aleaciones de acero fundido mostradas en la tabla 5.....	48

INDICE DE TABLAS

Tabla 1	Comparación del peso de diferentes tapas para una misma resistencia.....	8
Tabla 2	Esfuerzos encontrados para diferentes diámetros de la circunferencia de referencia.....	10
Tabla 3	Esfuerzos para varias altura de las tapas.....	13
Tabla 4	Esfuerzos en modelos.....	23
Tabla 5	Aleaciones usadas en pruebas de corrosión.....	47
Tabla 6	Valores de A y n en cada estación MICAT en el Ecuador.....	49
Tabla 7	Composición química de los aceros fundidos.....	52
Tabla 8	Propiedades mecánicas de los aceros fundidos de una probeta de 28mm de espesor.....	53
Tabla 9	Composiciones típicas del hierro dúctil y del hierro gris.....	55
Tabla 10	Composición química del hierro dúctil según la norma ASTM A-476.....	58
Tabla 11	Propiedades mecánicas del hierro dúctil de acuerdo a la norma ASTM A-476.....	59
Tabla 12	Propiedades mecánicas de los diferentes grados de hierro dúctil de acuerdo a la norma A-536.....	60

INDICE DE PLANOS

Plano 1	Tapa de registro
Plano 2	Marco
Plano 3	Bisagra en marco (Detalle)
Plano 4	Seguro en marco (Detalle)
Plano 5	Vista isométrica del marco
Plano 6	Seguro
Plano 7	Perno del seguro
Plano 8	Ensamble

INTRODUCCIÓN

Durante mucho tiempo el robo de tapas de registro ha sido un problema que no ha tenido una solución adecuada, por estar hechas de hierro fundido son utilizadas por los fundidores locales, también el gran peso de estas tapas que pueden superar los 100 kilogramos, y por ser el hierro fundido un material frágil y no tiene resistencia al impacto, es común que estas se partan. En un principio se trató de remediar el problema con la utilización de tapas hechas de hormigón, pero estas no eran lo suficientemente resistentes como para soportar el tráfico al que eran sometidas y por esta razón tienen que ser constantemente cambiadas.

Con la venida de la regeneración urbana a la ciudad de Guayaquil se empiezan a importar tapas de registro con las cualidades necesarias que solucionan los problemas antes mencionados. Con el uso de estas tapas se abre un nuevo mercado, por esto la necesidad de un nuevo diseño es evidente, un diseño que tenga características similares en resistencia y peso a las importadas, para de esta manera poder suplir la demanda de este producto con trabajo propio y no con importaciones.

El presente trabajo tiene por objeto establecer las condiciones mínimas para la fabricación de tapas de registro, es decir dimensiones, espesores, material

y requerimientos de las mismas para que puedan pasar las pruebas requeridas por la norma EN-124.

Para el desarrollo de este trabajo se utilizó , como ya se ha mencionado, la norma EN-124, porque en nuestro país no existe normativa para las tapas de registro utilizadas en obras públicas. Esta norma proporciona los principios de construcción, ensayos de tipo, marcado y control de calidad y encierra a los dispositivos de cubrimiento y de cierre para las zonas de circulación utilizadas por peatones y vehículos.

Para la determinación de los esfuerzos de la tapa se utilizó un programa de elementos finitos adecuado, cuyos modelos fueron previamente realizados en un programa de CAD (Mechanical Desktop). Por último se comprobaron los resultados encontrados con el software de elementos finitos con un modelo de una escala adecuada. Ya que la inviolabilidad de la tapa es una cualidad necesaria y muy importante se diseñó un sistema de acerrojamiento que garantice la seguridad de la misma.

Los materiales seleccionados son el hierro dúctil y el acero fundido, materiales que por sus propiedades mecánicas pueden cumplir con los requerimientos impuestos en esta tesis. Un análisis de costos determinó el material finalmente a utilizarse.

CAPÍTULO 1

1. DISEÑO DE LA TAPA DE REGISTRO Y SU MARCO

1.1 Diseño de la tapa de registro

La tapa consta de un elemento en forma de disco reforzada con nervios; el tamaño, la distribución y el número de estos nervios se los determinó con un software de elementos finitos, ya que por la forma y la distribución de estos no existen fórmulas desarrolladas para diseñar estos elementos.

La comprobación de los resultados obtenidos se lo llevó a cabo probando un modelo de escala 1:2 hecho de aluminio, y con ayuda del análisis dimensional se escalaron los resultados, para saber si un prototipo hecho del material finalmente seleccionado va a soportar las cargas de prueba exigidas por la norma utilizada en esta tesis.

El diseño del marco de la misma forma se lo realizó con elementos finitos, en el marco no se encuentran mayores problemas por tratarse de un elemento empotrado y no se vio la necesidad de construir modelos para probar este elemento.

El dispositivo de acerrojamiento tiene que ser un elemento sencillo que no de mayores problemas de construcción y utilización, y además brinde la

seguridad requerida, el dispositivo propuesto es uno similar al utilizado por otros fabricantes en el mercado.

1.1.1 Descripción de la tapa

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.

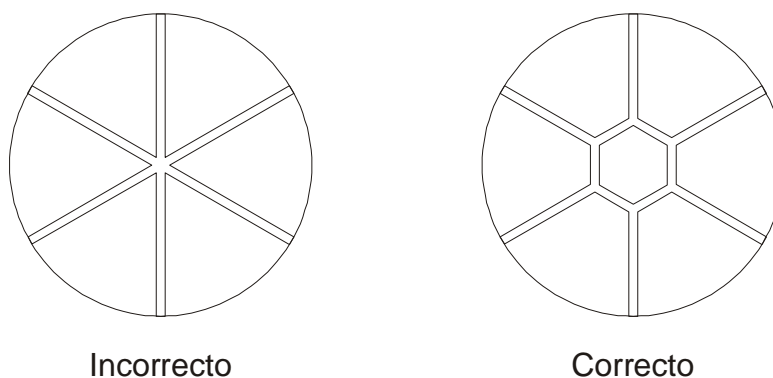


Figura 1.1. Adición de un nervio poligonal central para resolver problemas de fundición.

La cota de paso seleccionada es 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.

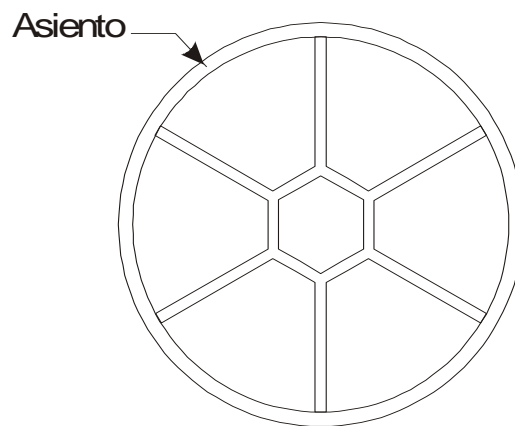


Figura 1.2. Asiento de la tapa

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.

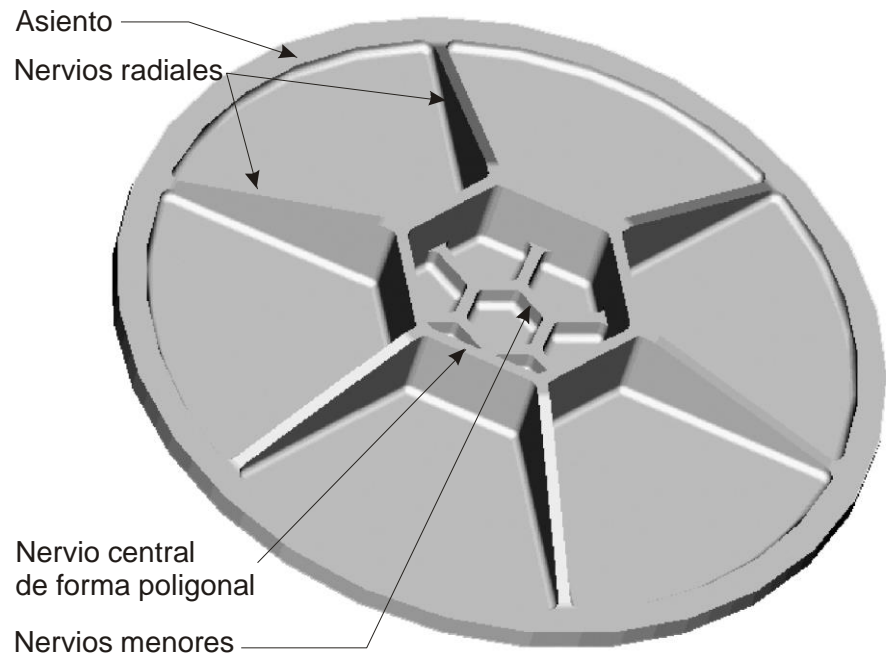


Figura 1.3. Descripción de la tapa

1.1.2 Dimensionamiento de la estructura nervada

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 de falla elegido es el criterio de Von Mises por no ser tan conservador, también es recomendado para materiales dúctiles como los son el hierro

dúctil y el acero fundido, que es lo que se espera usar por las ventajas mecánicas que estos tienen, 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 especifica en el apéndice I, 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.

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 con un diseño adecuado del molde.

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, 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

De la tabla el número óptimo de nervios está entre 5 y 6 nervios, se decide escoger 6 nervios, porque se tenía un ahorro de peso mayor.

Una vez 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, en otras palabras el tamaño del lado de dicho hexágono para que los esfuerzos sean mínimos; para ello se toma como parámetro el diámetro de la circunferencia que encierra al hexágono mas interior como muestra la figura:

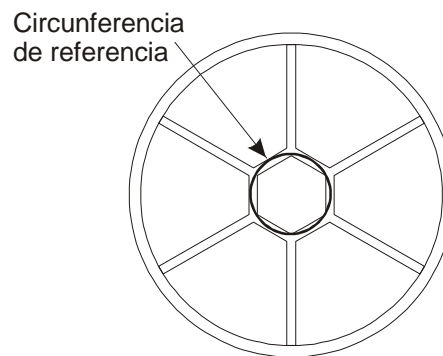


Figura 1.4. Circunferencia de referencia para dimensionar el nervio central

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 obtiene el mejor diámetro, la fuerza utilizada fue de 400kN, los resultados encontrados se presentan en la siguiente tabla

TABLA 2
ESFUERZOS ENCONTRADOS PARA DIFERENTES
DIÁMETROS DE LA CIRCUNFERENCIA DE REFERENCIA

Diámetro de la circunferencia de referencia (mm)	Esfuerzo encontrado (MPa)
180	579
200	580
250	598
300	626

Ahora se graficaron los resultados para ver mejor el comportamiento de esta variable y se tiene el siguiente gráfico.

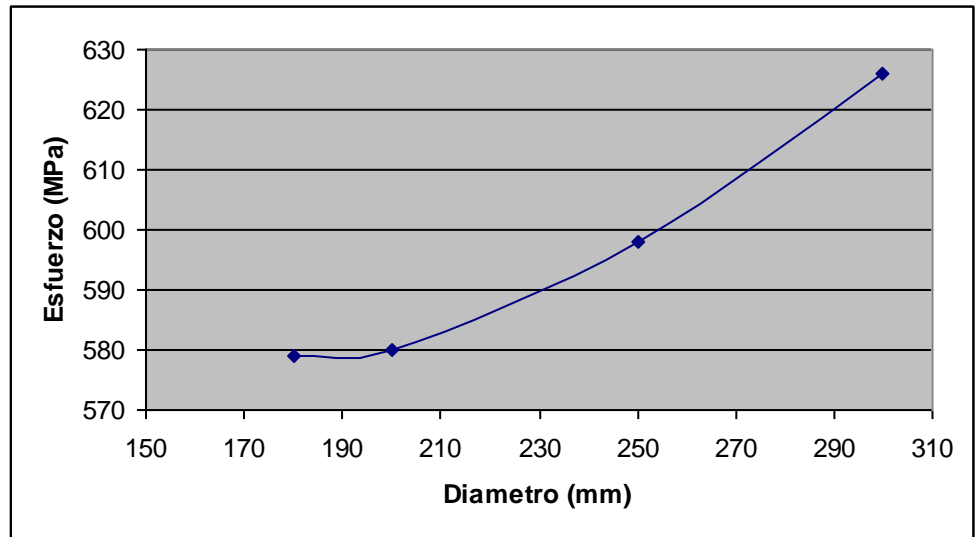


Figura 1.5. Esfuerzo vs. Diámetro de la circunferencia de referencia

Bajar más el diámetro de la circunferencia de referencia no contribuiría en gran medida con la disminución de los esfuerzos, además generaría problemas de moldeo en la fundición, finalmente el diámetro escogido fue de 200mm.

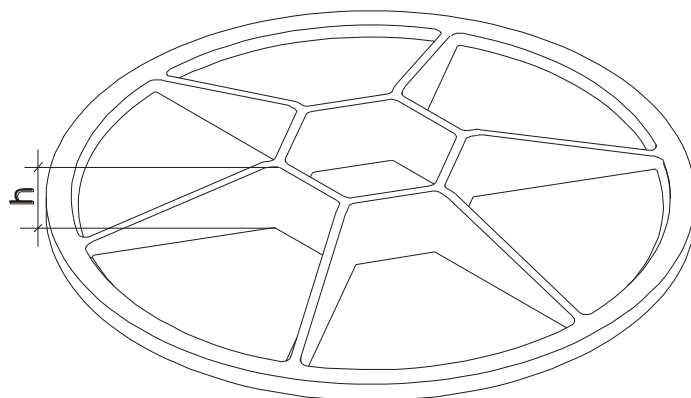


Figura 1.6. Altura de los nervios

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, aunque se hubiese querido que esta medida sea un poco mayor, le hubiese quitado practicidad al diseño desde el punto de vista de que sería complicado fabricarlo, es decir moldearlo.

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 como 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 este parámetro hasta que se tenga un esfuerzo satisfactoriamente bajo, en la tabla se ve los resultados encontrados.

Tabla 3**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

Se escogió el valor de 90mm, por ser el que mejores resultados dio, ahora que ya están todos los parámetros seleccionados, hay que considerar los radios para suavizar las conexiones de cada elemento, esto se hace para evitar concentraciones de esfuerzos y sobre todo para prevenir problemas de rechupes en la fundición. El método de los círculos inscritos es útil para evitar la acumulación de metal y por ende la formación de rechupes. En la figura se puede ver los círculos inscritos donde los nervios radiales se encuentran con el nervio central, esta es una zona de posibles problemas de rechupe.

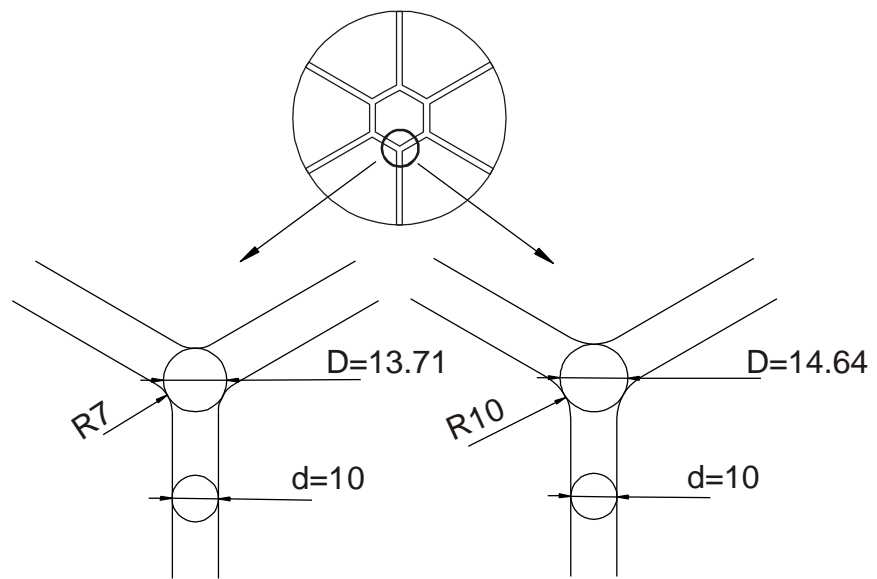


Figura 1.7. Círculos inscritos en los nervios de la tapa

El método consiste comparar el incremento de la masa del material existente entre los dos círculos, de esta forma se tiene:

$$\frac{\frac{\pi D^2}{4} h \rho - \frac{\pi d^2}{4} h \rho}{\frac{\pi d^2}{4} h \rho} \times 100 = \left(\frac{D^2}{d^2} - 1 \right) \times 100$$

El incremento permitido en la masa es de hasta un 130%, entonces los incrementos en la masa para los casos mostrados en la figura 1.9 son del 87% y 114%, se escoge los radios entre 10mm y 7mm de acuerdo a la zona donde los se esté aplicando, por último, se tiene en la figura la distribución

total de los esfuerzos sobre la tapa con todas las dimensiones antes seleccionadas

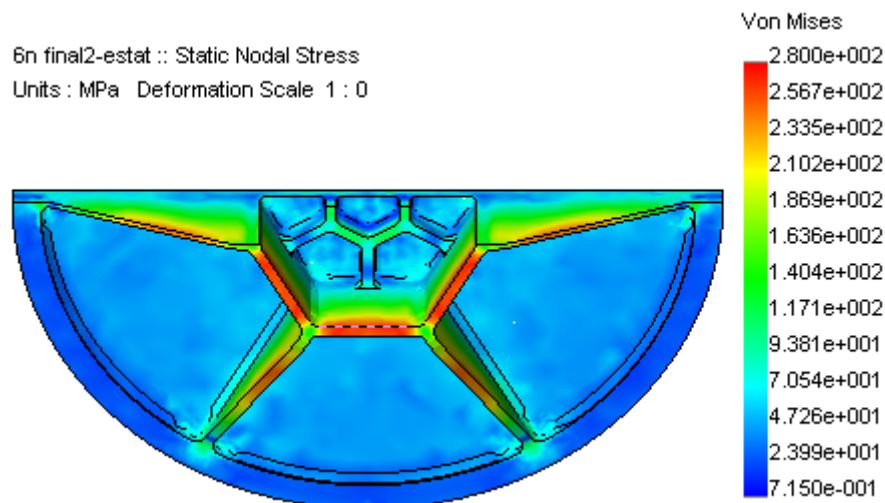


Figura 1.8. Distribución final de esfuerzos sobre la tapa

El detalle de todas las dimensiones, esta detallada en la sección correspondiente a los planos.

1.1.3 Pruebas experimentales de la tapa

Las pruebas experimentales fueron llevadas a cabo con un modelo a la mitad de la escala, ya que probar un prototipo a escala natural no hubiese sido posible, debido a que se necesita aplicar una carga de 400kN y el equipo del que se dispone puede aplicar una carga de hasta 180kN.

El modelo está hecho de aluminio por ser fácil de fundir. a diferencia de hacer un modelo de acero o hierro dúctil que

sería mas complicado de elaborar, con ayuda del análisis dimensional se pueden adecuar los resultados obtenidos para predecir el comportamiento de un prototipo.

1.1.3.1 Análisis dimensional y similitud

Sabiendo que toda ecuación que describe un fenómeno físico debe ser dimensionalmente correcta, es decir que las unidades a cada lado de la ecuación deben ser las mismas, se puede establecer las condiciones necesarias para decir que dos fenómenos son similares.

Dado un problema físico con $n-1$ variables independientes, esto puede ser expresado entre las variables en forma funcional como:

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

donde q_1 es el parámetro independiente y $q_2, q_3, q_4 \dots q_n$ son los $n-1$ parámetros independientes, se puede 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 Π , 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 número 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. La relación funcional G debe ser determinada experimentalmente. Se puede expresar a un parámetro Π 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:

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

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

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

El uso de las leyes que rigen el fenómeno es una técnica muy usada para la obtención de los parámetro Π , esta es la técnica que se utilizó en esta tesis. 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 $[F][L][T]$:

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

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.

1.1.3.2 Descripción de las pruebas experimentales

El material utilizado para los modelos es aluminio, primero se obtiene las propiedades del material con una probeta obtenida de la misma colada con la que fueron hechos los modelos. Una vez obtenidos los datos se probó los modelos.

Se probaron seis modelos, 2 de los cuales estuvieron equipados con galgas extensométricas.

La carga de prueba es escalada utilizando el parámetro Π_1 , y recordando la condición de similitud $\Pi_{ip} = \Pi_{im}$, se tiene que:

$$\begin{aligned}\Pi_1 &= \frac{P}{\sigma s^2} \\ \Pi_{1m} &= \Pi_{1p} \\ \frac{P_m}{\sigma_m s_m^2} &= \frac{P_p}{\sigma_p s_p^2}\end{aligned}$$

Despejando la carga sobre el modelo:

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

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 mencionadas al comienzo de esta sección. 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. Tras la aplicación de 5 veces la carga sobre la tapa esta no deberá presentar deformación permanente, esto es comprobado con ayuda de un mármol de medición y un reloj palpador, sobre la toma de las medidas se habla con mas detalle en el apéndice I.

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.

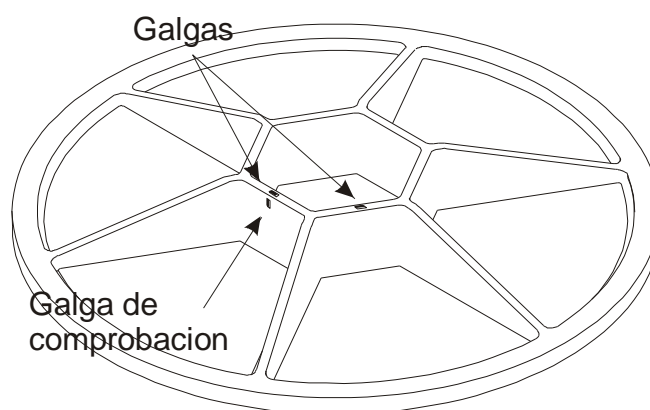


Figura 1.9. Colocación de las galgas extensométricas

Se colocaron galgas en los costados del nervio central para comprobar que los esfuerzos en esta zona son efectivamente muy bajos y las galgas mas inferiores si darán un resultado cercano al esfuerzo principal.

Aunque se pueden usar métodos para compensar los efectos de la temperatura, no se vio la necesidad de usarlos porque el puente resistivo que se usó posee auto compensación con una galga “tonta” interna. Para encontrar la deformación se usa la ecuación:

$$\varepsilon = \frac{1}{F} \frac{\Delta R}{R}$$

Donde F es el factor de galga, es obtenido experimentalmente y es un dato proporcionado por el fabricante, R es la resistencia de la galga y ΔR la variación de la resistencia antes y después de ser aplicada la carga, ahora para encontrar los esfuerzos, de la ley de Hook:

$$\sigma = E\varepsilon$$

1.1.3.3 Interpretación de los resultados obtenidos

Se probaron 2 tapas con galgas extensométricas, 2 tapas midiendo la flecha residual y 2 tapas se ensayaron hasta la ruptura. El material del cual estaban hechas las tapas, tenía un esfuerzo de fluencia de 131.78MPa, un esfuerzo último de 167.72Mpa y módulo del Young de 71Gpa.

Tapas con galgas extensométricas.- Las tapas con galgas extensométricas proporcionaron los siguientes resultados:

Tabla 4
Esfuerzos en modelos

Carga en modelo (Kg)	Micro-Deformación (x10⁻⁶)	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

En esta tabla se pueden ver el esfuerzo hallado en el modelo y el esfuerzo esperado en el prototipo, estimado con ayuda del parámetro Π_1 encontrado anteriormente, el esfuerzo calculado mediante el método de los elementos finitos era de 280MPa, se observa que los resultados obtenidos tienen un error máximo del 9% con respecto del modelo en elementos finitos.



Figura 1.10. Tapa ensayada con galgas extensométricas

Se estimó la carga que causaría fluencia en el modelo con ayuda del parámetro Π_1 , despejando y reemplazando:

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

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

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

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

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

En el modelo se presentó fluencia con una carga de 3150Kg (30.8kN), teniendo un error del 5% con respecto al esperado con el método de los elementos finitos. El esfuerzo de fluencia del material del prototipo deberá tener:

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

$$\sigma_p = \frac{266 / 30.8}{1 / 131.78 (2)^2} = 284.5 \text{MPa}$$

Los valores de deformación encontrados por las galgas colocadas en los costados fueron muy bajos, comprobando así que el esfuerzo encontrado es muy aproximado al principal.

Tapas sin galgas, con medición directa de la flecha residual.- Aquí se aplicó 5 veces la carga de prueba escalada con el parámetro Π_1 , Se tomaba la medición con el reloj palpador antes de aplicar la primera carga y al final y se comparaban las lecturas. Tras la aplicación de la carga de prueba no se pudo detectar deformación apreciable.

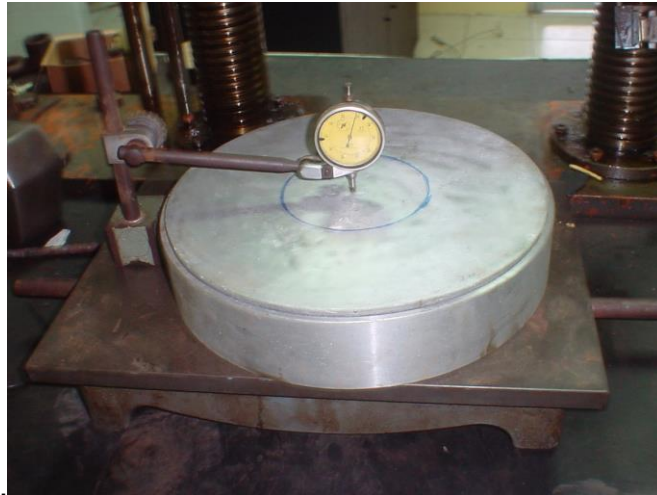


Figura 1.11. Tapa siendo medida la flecha residual

Tapas ensayadas hasta la ruptura.- 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.



Figura 1.12. Tapa en máquina de ensayos.

La ruptura ocurrió casi a través de todo el nervio demostrando que hubo plastificación en toda esa zona, además la falla fue súbita, haciendo suponer que toda la zona alcanzó el esfuerzo último de tensión.



Figura 1.13. Tapa probada hasta la ruptura

La parte central no sufrió daños visibles, en la superficie solo se detectó deformación plástica sin encontrarse fracturas visibles. La carga que soportó la tapa antes de la ruptura fue de 5150Kg. La carga necesaria para causar ruptura en un prototipo se la puede calcular con el mismo parámetro Π_1 , así se tiene:

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

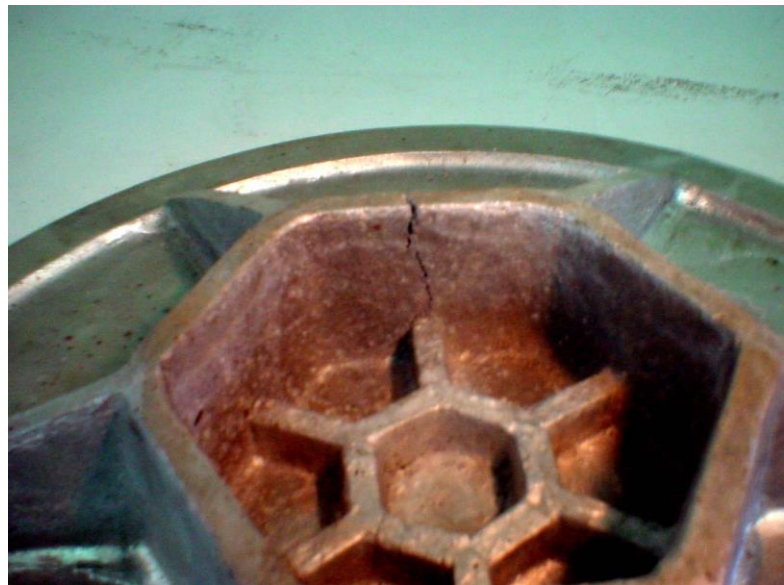


Figura 1.14. Tapa ensayada hasta la ruptura

Entonces de estos resultados se sabe que se necesita un material con un esfuerzo último de 332.77Mpa y con un esfuerzo de fluencia de 285MPa.

1.2 Diseño del marco

El marco por ser una estructura empotrada, no presentó mayores problemas al momento de diseñarlo. Los espesores de las diferentes partes fueron seleccionados tomando en cuenta los principios de fundición, es decir no permitir zonas donde se puedan generar rechupes, también se buscó la manera de reducir el peso de este elemento retirando material en las partes donde no sea necesario. Al igual que la tapa el marco es un elemento complejo que no puede ser diseñado por métodos tradicionales, como en la tapa el método usado para obtener los esfuerzos fue el de los elementos finitos.

1.2.1 Descripción del marco

El marco consta de una superficie donde se apoya la tapa y le proporciona una profundidad de encastramiento de 20mm. Esta se sostiene de un cilindro de 100mm, de alto que termina en un disco que sirve de apoyo y como estructura de empotramiento, esta medida fue adoptada de acuerdo a la altura de la tapa que es de la misma magnitud.

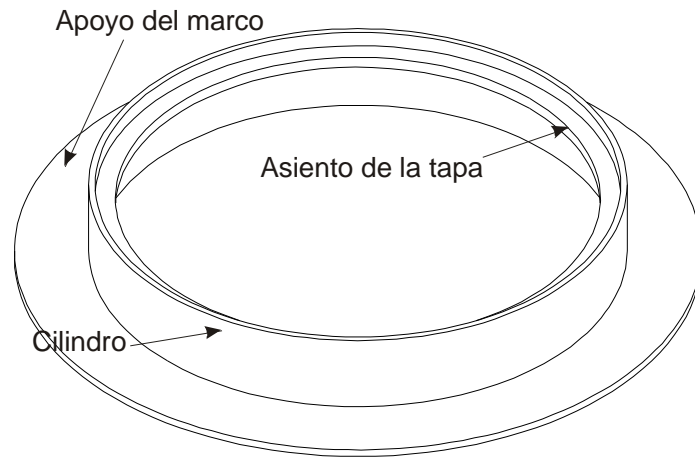


Figura 1.15. Descripción del marco

Para reforzar la unión entre el disco que sirve de apoyo y el cilindro que conecta a la superficie de asiento de la tapa se usan costillas que le dan una mejor rigidez y resistencia a todo el conjunto, también se retiró material entre cada costilla para reducir peso, la forma final del marco queda como lo muestra la figura 1.16.

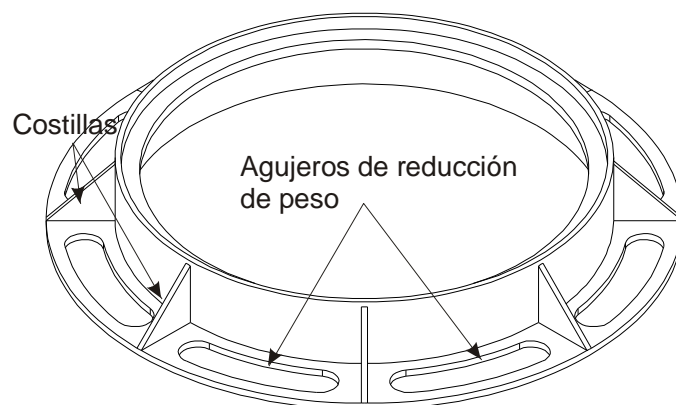


Figura 1.16. Marco con todos sus elementos

1.2.2 Diseño del marco

En el diseño del marco la carga es aplicada en la superficie donde se apoyará la tapa, en este caso se prueba directamente la carga total de prueba, es decir 400kN, ya que por ser un elemento empotrado se esperan bajos esfuerzos sobre el mismo.

Las condiciones de frontera que se utilizan son dos, primero se consideró totalmente inmóvil la parte mas inferior de la tapa, esta condición la se muestra en la figura 1. 17.

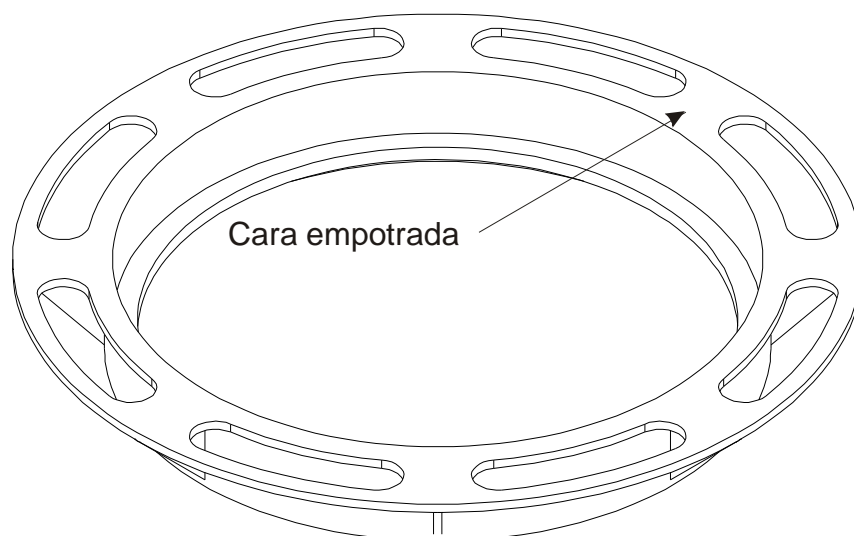


Figura 1.17. Primera condición de borde

Los resultados encontrados con esta condición de borde se los muestra en la figura 1.18. Los resultados encontrados son

efectivamente muy bajos estando muy lejos de alcanzar la fluencia.

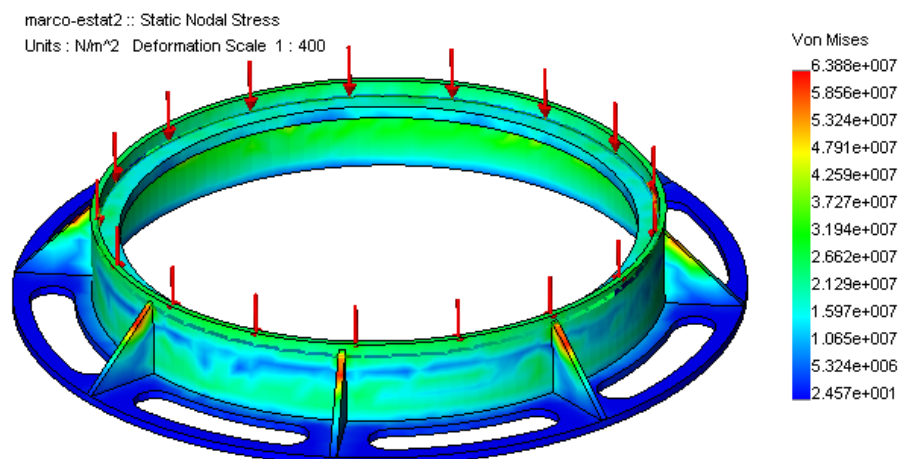


Figura 1.18. Resultados de la primera condición e borde

Como una condición de este tipo puede considerarse un poco rígida, se usó otra condición, ahora la cara que antes estuvo totalmente inmóvil, ahora se le permite deslizarse en su plano, mientras que la superficie de los agujeros no pueden trasladarse aunque pueden rotar, esta condición se muestra en la figura 1.19.

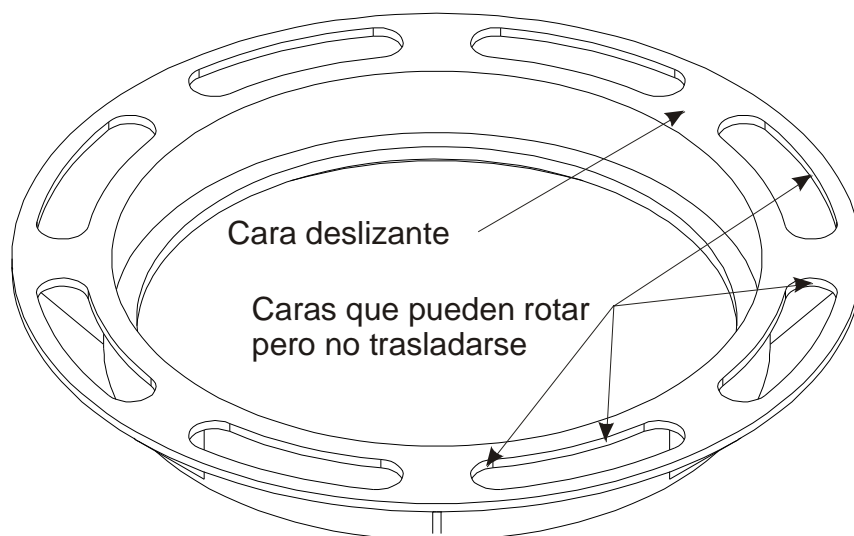


Figura 1.19. Segunda condición de borde

Los resultados son muy similares, aunque como se esperaba en este segundo caso son ligeramente mayores, pero todavía continúan estando muy lejos del punto de fluencia. Una forma indirecta de comprobar estos resultados es que al ver los catálogos de diferentes fabricantes, la variación del peso del marco entre tapas de este mismo grado y grados mayores, permanece casi sin variación, ratificando de esta manera que los esfuerzos son efectivamente bajos.

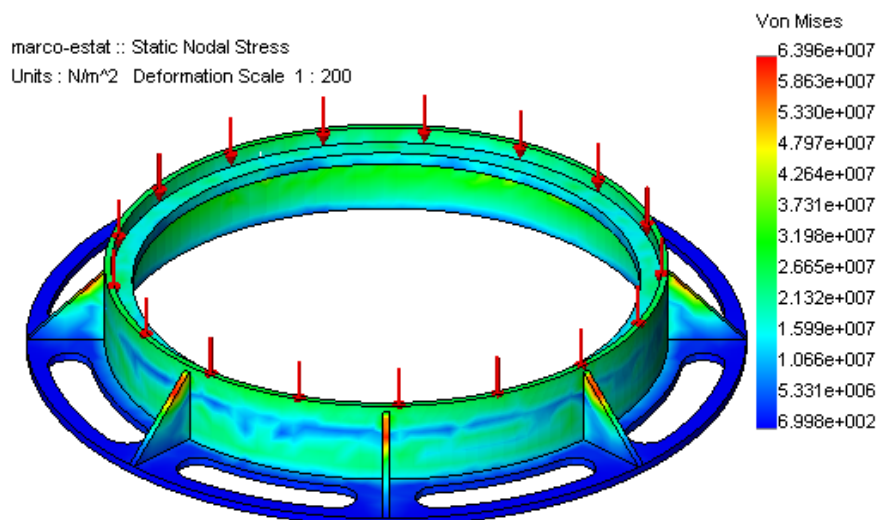


Figura 1.20. Resultados de la segunda condición de borde

1.3 Dispositivo de acerrojamiento de la tapa

Para el dispositivo de acerrojamiento tanto la tapa como el marco deben adecuarse. Consta de una bisagra que es desmontable y de un seguro. La bisagra hace fácil la operación de la tapa y al ser desmontable se la puede retirar cuando sea necesario.

1.3.1 Descripción y especificaciones

Primero se empieza con la bisagra. Esta parte como las demás debe ser lo mas sencilla posible, se hizo que un dispositivo en forma de cuña encaje en una especie de caja, esta caja deberá tener una manera de atrapar la cuña una vez que la tapa este abierta, para evitar cierres accidentales, esto se

logró con dos agujeros en la base de la caja, donde la cuña con una forma adecuada cae cuando la tapa se ha abierto.

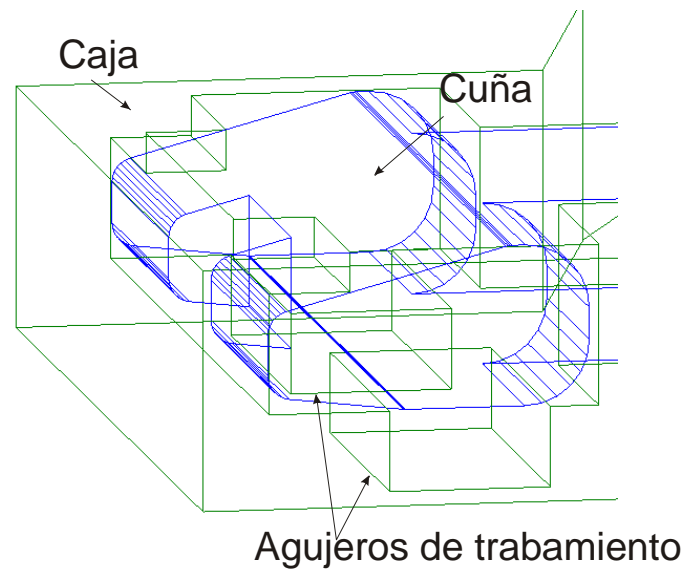


Figura 1.21. Bisagra del conjunto tapa-marco.

En la figura 1.22, se puede ver una secuencia de funcionamiento de la bisagra, desde que empieza la apertura hasta el trabamiento de la tapa. Si se necesitase retirar la tapa, tan solo hay jalarla hacia arriba, como se puede ver en la ultima parte de la secuencia de la figura 1.22, en esta posición no tiene restricción de ningún tipo para poder retirarla.

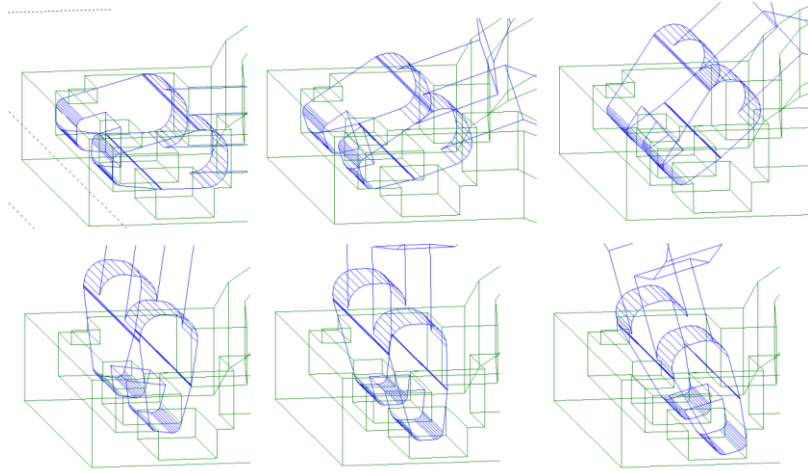


Figura 1.22. Secuencia de funcionamiento de la bisagra.

Asumiendo que la tapa al momento de abrirse, gira alrededor de un punto d como se muestra en la figura, se puede calcular la holgura necesaria entre el marco y la tapa.

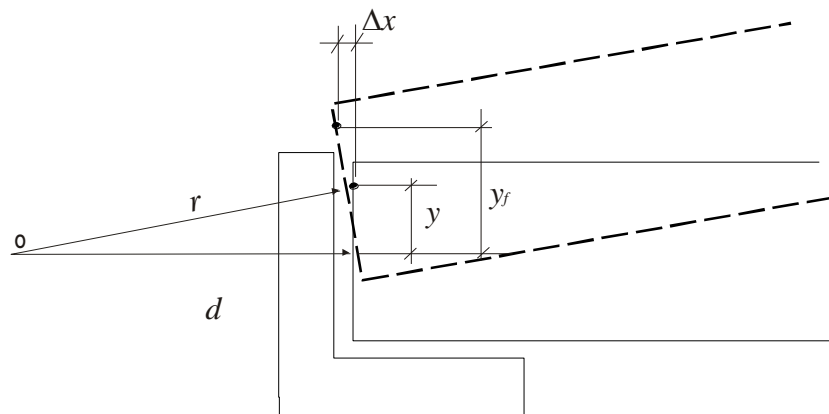


Figura 1.23. Holgura entre el marco y la tapa

Colocando el eje de referencia en el punto de rotación o , el valor inicial de x es justamente la distancia d , el valor de r

sale del teorema de Pitágoras así se tiene $r = \sqrt{d^2 + y^2}$, el valor máximo de y que puede variar desde 0 hasta 2cm que es la altura del borde de la tapa, y el valor de y_f así mismo varia entre 0 y 2 cm dependiendo de donde esté el centro de rotación. Para calcular el valor final de x es usa la ecuación del círculo $r^2 = x^2 + y^2$, de esta forma Δx queda:

$$\Delta x = x_i - x_f$$

$$\Delta x = d - \sqrt{r^2 - y_f^2}$$

$$\Delta x = d - \sqrt{d^2 + y^2 - y_f^2}$$

Observando la secuencia de apertura de la bisagra que se muestra en la figura 1.22, la tapa girará alrededor del borde redondeado de la parte inferior, a este punto corresponde un valor de d de 6.2cm, y $y_f = 1.7$ cm por que el radio de ese borde es 4mm, el valor mas crítico es el punto que esta frente al eje de rotación y este exige una holgura de 2.25mm, se escogió 2mm de holgura considerando que la tapa puede desplazarse linealmente mientras se abre.

Para asegurar la tapa, se usa un apéndice en la tapa, que encaja en una parte del marco y es asegurada por una pieza metálica que hace las veces de seguro que se asegura por

medio de un perno de seguridad, la seguridad está en la cabeza del perno, esta no debe ser de una forma estándar, de tal manera que solo pueda ser abierta con una llave especial, en la figura 1.24 se puede ver la forma de la cabeza escogida.

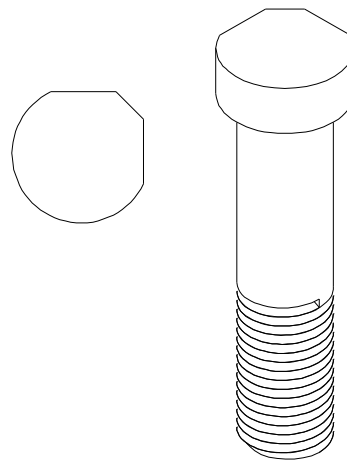


Figura 1.24. Cabeza del perno

Existe suficiente espacio para colocar algún otro tipo de seguro, de necesitarse alguna seguridad mas exigente, el conjunto lo se ve en la figura 1.25.

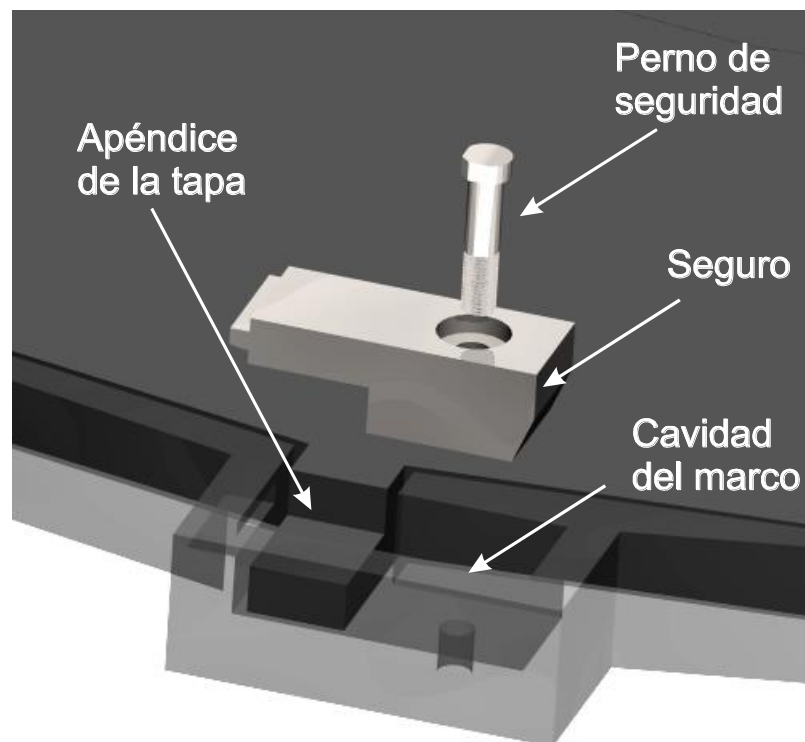


Figura 1.25. Seguro de la tapa

Las holguras y chaflanes necesarios se los halla de la misma forma que se halló la holgura entre la tapa y el marco, el punto de rotación considerado es el que se muestra en la figura 1.26.

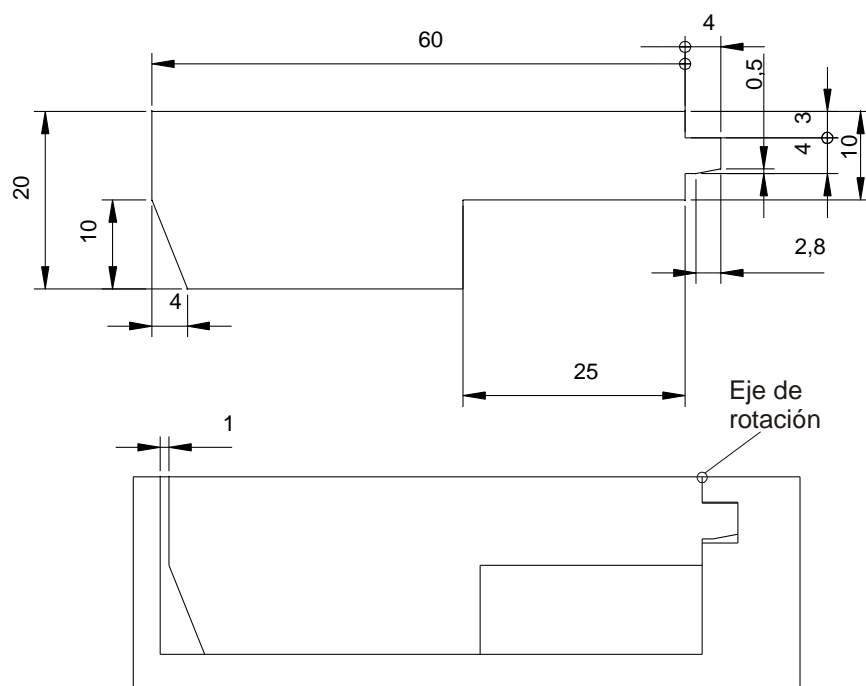


Figura 1.26. Dimensiones del seguro

CAPÍTULO 2

2. Materiales utilizables

Uno de los principales problemas de las tapas hechas de hierro fundido, es que estas por estar hechas de un material frágil se rompían con el paso del tráfico. El diseño anteriormente planteado esta pensado en un material que posea una buena ductilidad: Comenzando por el criterio de falla que se uso, el material del cual estuvieron hechos los modelos y los espesores utilizados se concluye que lo mejor es utilizar un material con una buena ductilidad, lo que descarta el uso de hierro fundido en la fabricación del diseño planteado.

La norma reconoce cuatro materiales que se pueden utilizar en la fabricación de tapas de registro sin la necesidad de pruebas adicionales, estos son acero fundido, hierro fundido, hierro dúctil y acero laminado. Por lo mencionado anteriormente se decide seleccionar al acero fundido y el hierro dúctil o de grafito esferoidal. Aunque se sabe de tapas hechas de materiales compuestos como fibra de vidrio, y se tiene reportes de que soportan muy bien las cargas de prueba, estas necesitarán de pruebas adicionales como puede ser pruebas de fatiga a la resina que la conforma.

2.1 Acero fundido

Los aceros fundidos pueden ser hechos de cualquier tipo de acero al carbono o aleado producido en forma de barras, palanquillas, etc. El moldeo de este se hace como en otros metales como puede ser un molde de arena, óxido de zirconio, grafito, molde metálico o cerámico, u otros; el proceso es el mismo, se tiene que calentar el metal hasta su punto de fusión y verterlo en un molde de la forma deseada.

El tipo de molde a usarse depende de la complejidad, número de piezas a producir, precisión dimensional requerida, tamaño de la pieza y del costo de la fundición. Aunque el acabado y la cantidad de piezas producibles pueden variar mucho con el tipo de molde usado, sus propiedades como pueden ser, maquinabilidad, soldabilidad, propiedades mecánicas no se ven prácticamente afectadas.

Otra cualidad de los aceros fundidos es que sus propiedades son isotrópicas, es decir sus propiedades mecánicas son las mismas no importa la dirección en la que sean tomadas.

En esta tesis se propone el uso de aceros fundidos de medio carbono, cuyo porcentaje de carbono se encuentra entre 0.2 y 0.5% de carbono.

2.1.1. Principales propiedades del acero fundido

Si se compara el esfuerzo último de tensión y el esfuerzo de fluencia entre aceros fundidos, rolados, forjados con la misma dureza, se puede decir que estas propiedades son casi idénticas, consecuentemente si nuestro criterio de selección está basado en estos parámetros se puede usar aceros fundidos, rolados, forjados indistintamente.

Ductilidad.- La ductilidad de los aceros fundidos es casi la misma que los forjados, rolados o soldados que tengan la misma dureza. Aunque los aceros forjados tienen propiedades longitudinales algo mayores que los fundidos, sus propiedades transversales son menores dependiendo de la cantidad de trabajado que tenga. Esta es una propiedad que se hubiese querido en los nervios de la tapa, pero se tiene que conformarnos con la propiedad unidireccional del acero fundido.

Tenacidad.- La tenacidad en los aceros trabajados es superior en dirección longitudinal que en dirección transversal, como los aceros fundidos son isotrópicos sus propiedades estarán en algún punto entre las propiedades longitudinales y transversales de los aceros trabajados.

La tenacidad de los aceros depende de su micro estructura y no se ve significativamente afectada por micro porosidades o hidrógeno. La micro estructura es controlada por los elementos aleantes. La tenacidad de los aceros fundidos es buena, siendo estos un material que da buenos resultados cuando tienen que soportar cargas de impacto.

Cambios volumétricos.- Ocurren cambios volumétricos en estado líquido a medida que el metal se enfría, esto afecta la manera en como se va llenando el molde, esta contracción está en el orden de 0.9% por cada 100°C para aceros con 0.3% de carbono.

La siguiente contracción ocurre cuando el metal sólido se enfría hasta la temperatura ambiente, esta contracción está en el orden de 6.9% a 7.4% como función del porcentaje de carbono, los elementos aleantes no tienen gran influencia en la contracción. Hay que tener en cuenta que la contracción puede generar esfuerzos residuales debido a la rigidez del molde, pudiendo llegar hasta fracturar al metal, por ser este frágil al estar recién solidificado. Es importante un buen diseño del molde para evitar fallas en la producción de piezas de acero fundido.

Tratamientos térmico.- El tratamiento térmico puede dar una gran variedad de propiedades mecánicas. Todos los aceros fundidos de medio carbono deben ser tratados térmicamente para afinar el tamaño de grano, aliviar tensiones residuales aunque esta no es una condición necesaria en aceros fundidos para propósitos generales, los tratamientos térmicos pueden ser normalizado, templado, revenido y de alivio de tensiones de acuerdo a las necesidades.

Propiedades físicas.- Las propiedades físicas de los aceros fundidos son muy similares a aquellos que han sido trabajados.

El módulo de elasticidad de los aceros fundidos a temperatura ambiente no se ve muy afectada por la micro estructura o por cambios en la composición, el valor del módulo de elasticidad está aproximadamente 207GPa y una razón de Piosson de 0.3. La variación de la temperatura si afecta en gran medida a esta propiedad.

La densidad de los aceros fundidos está entre 7.825 y 7.820 g/cm², la densidad solo se ve afectada en algo por el tamaño de la sección.

Propiedades Ingenieriles.- Según datos llevados acabo en Kure Beach en Carolina del Norte, y en el este de Chicago, para determinar la resistencia a la corrosión de los aceros fundidos en atmósferas marinas e industriales. Las superficies de los especimenes fueron unas maquinadas y otras expuestas como salieron de la fundición. Los periodos de exposición fueron de 1 año en atmósfera marina y de 3 años en atmósfera industrial. Se llegaron a las siguientes conclusiones:

- Maquinar la superficie no tiene gran influencia en la velocidad de corrosión.
- Los aceros con níquel, cromo, manganeso tienen mejor resistencia a la corrosión en estas atmósferas, comparados con los que tienen solo manganeso.
- Todos los aceros se corroyeron mas rápido en atmósfera marina a 24m del mar, a una tasa intermedia en atmósfera industrial y a una taza mas lenta a 240m del mar.

Las aleaciones usadas en las pruebas de corrosión se muestran en la tabla, y los resultados obtenidos en el gráfico 2.1.

Tabla 5

Aleaciones usadas en pruebas de corrosión

	C (%)	Mn (%)	Si (%)	Cr (%)	Ni (%)	Otros (%)
1	0.17	0.77	0.55	0.19	2.26	-
2	0.26	0.8	0.44	0.6	0.56	0.15 Mo
3	0.28	0.87	0.42		-	0.94 Cu, 0.07Mo
4	0.27	1.7	0.42	-	1.08	0.09 V
5	0.37	136	0.34	-	-	-
6	0.14	0.61	0.41	0.21	0.1	-
7	0.37	1.42	0.38	-	-	-
8	0.25	0.65	0.51	-	-	-
9	0.33	1.48	0.4		-	0.05 Ti

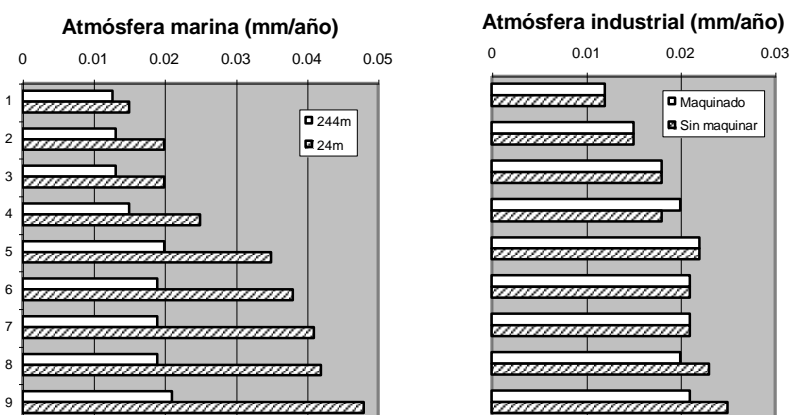


Figura 2.1. Tasas de corrosión promedio de las diferentes aleaciones de acero fundido mostradas en la tabla 5.

Según el mapa iberoamericano de la corrosividad atmosférica (MICAT) se concluye que la corrosión del acero, se puede estimar mediante la ecuación:

$$C = At^n$$

Donde C es la corrosividad en $\mu\text{m/año}$ y t es el tiempo de exposición en años, y A y n son constantes que dependen de la atmósfera, en la tabla siguiente se muestran las estaciones en las cuales se llevaron a cabo las pruebas en nuestro país:

Tabla 6

Valores de A y n en cada estación MICAT en el Ecuador

Estación (Clima, atmósfera)	A	n
Guayaquil (Clima Tropical Sabana, atmósfera Rural)	22.7234	0.3860
Salinas (Desértico, atmósfera marina)	43.9211	0.1741
Esmeraldas (Tropical sabana, atmósfera industrial)	59.1437	.1789
San Cristóbal (Estepa, atmósfera marina)	33.2724	0.4056

La corrosión mas crítica, tomando como base 25 años fue en el caso de la isla San Cristóbal y en Esmeraldas; la corrosión predecida es de $122.66 \mu\text{m}$ y $105.9 \mu\text{m}$, demostrando que la corrosión no es un problema, desde el punto de vista estructural, para la tapa.

La maquinabilidad de los aceros fundidos es buena, aunque en los primeros cortes las herramientas tienen a desgastarse rápidamente. Esto se deba tal vez a la superficie áspera que presentan las piezas inicialmente, se recomienda un primer corte lo suficientemente profundo para vencer esta superficie y alcanzar el metal base, también se recomienda bajar la velocidad de corte a la mitad, el tamaño de grano influye en gran medida en la maquinabilidad, es por esto que se recomienda normalizar o revenir a las piezas antes de maquinarlas.

Gracias al porcentaje de carbono que poseen los aceros fundidos, su soldabilidad es buena, comparable con los aceros trabajados de misma composición. Esto hace al acero fundido un buen material de construcción, cuando se necesita agregar características adicionales a las piezas por medio de soldadura como pueden ser asas, y demás elementos difíciles de obtener por fundición directa, hay que recalcar que existe formación de martensita en las zonas soldadas, aunque este efecto es menos notorio en aceros con 0.2 de carbono como máximo y 0.5 de manganeso; debido a la formación de martensita todas las aleaciones necesitan de

un tratamiento térmico para alivio de tensiones después de ser soldadas a partes de acero trabajado.

2.1.2. Grados del acero fundido de acuerdo a la norma ISO-3755

Aunque el tratamiento térmico es opcional para estos aceros según la norma ISO correspondiente, siempre se recomienda un tratamiento de normalizado para que el metal alcance la resistencia esperada, a demás por la gran contracción térmica que experimentan los aceros durante el enfriamiento es probable que la pieza tenga gran cantidad de esfuerzos residuales.

El grado de los aceros se lo nombra con dos números, el primero es el esfuerzo de fluencia y el segundo es el esfuerzo último de tensión en MPa. También se agrega al final la letra w, los aceros que no poseen la letra w, significa que su composición no necesita mayor control mas que en el fósforo y azufre, además tienen que cumplir con las propiedades mecánicas; en cambio los grados XXX-XXXw necesitan un control completo de su composición para asegurar una soldabilidad uniforme. La composición debe estar de acuerdo con la tabla siguiente:

Tabla 7

Composición química de los aceros fundidos

Grados del acero	Composición química (% de masa)									
	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Cu	Mo	V
200-400	-	-	-	0.35	0.35	-	-	-	-	-
200-400w	0.25	1.00	0.60	0.35	0.35	0.40	0.35	0.40	0.15	0.05
230-450	-	-	-	0.35	0.35	-	-	-	-	-
230-450w	0.25	1.20	0.60	0.35	0.35	0.40	0.35	0.40	0.15	0.05
270-480	-	-	-	0.35	0.35	-	-	-	-	-
270-480w	0.25	1.20	0.60	0.35	0.35	0.40	0.35	0.40	0.15	0.05
340-550	-	-	-	0.35	0.35	-	-	-	-	-
340-550w	0.25	1.50	0.60	0.35	0.35	0.40	0.35	0.40	0.15	0.05

Para cada reducción en 0.01% de carbono por debajo de lo 0.25%, un incremento de 0.04% de manganeso por encima del especificado se permite, teniendo como límite 1.20% para el grado 200-400w, y hasta 1.40% para el grado 270-480w. Las propiedades mecánicas las se tiene en la siguiente tabla:

Tabla 8
Propiedades mecánicas de los aceros fundidos de una
probeta de 28mm de espesor.

Grados del acero	Esfuerzo de fluencia (MPa)	Esfuerzo ultimo de tensión (MPa)	Elongación (%)
200-400	200	400	25
200-400w	200	400	25
230-450	230	450	22
230-450w	230	450	22
270-480	270	480	18
270-480w	270	480	18
340-550	340	550	15
340-550w	340	550	15

2.2 Hierro dúctil o de grafito esferoidal

Conocido también como hierro nodular, su principal característica es que el grafito se presenta en forma de pequeñas esferas (grafito esferoidal), a diferencia del hierro gris donde el grafito forma láminas. El grafito en forma de esferas es lo que le da al hierro dúctil muchas más resistencia y más ductilidad que un hierro gris de similar composición.

La relativa alta resistencia de este material y su tenacidad le dan a este material una ventaja sobre el hierro gris en muchas aplicaciones estructurales. También como el hierro dúctil no necesita largos tratamientos térmicos para formar grafito esferoidal, compite con el hierro maleable aunque la colada de hierro dúctil pueda salir más costosa.

La composición del hierro dúctil sin alea es muy similar a la del hierro gris, como se puede ver en la siguiente tabla:

Tabla 9

Composiciones típicas del hierro dúctil y del hierro gris

Elemento	Composición %	
	Hierro gris	Hierro dúctil
Carbono total	3.25 a 3.50	3.50 a 3.80
Manganeso	0.60 a 0.90	0.30 a 1.00
Silicio	1.80 a 2.30	2.00 a 2.80
Cromo	0.05 a 0.20	0.008 máx.
Níquel	0.05 a 0.20	0.05 a 0.20
Molibdeno	0.05 a 0.10	0.01 a 0.10
Cobre	0.15 a 0.40	0.15 a 0.40
Fósforo	0.12 máx.	0.08 máx.
Azufre	0.15 máx.	0.02 máx.
Cerio	-	0.005 a 0.020
Magnesio	-	0.03 a 0.05

Las materias primas del hierro gris y del hierro dúctil son las mismas, pero los materiales usados para el hierro dúctil usualmente son mas puros. El hierro dúctil puede ser fundido en cubilote, horno de arco eléctrico u hornos de inducción, así mismo el equipo de moldeo es el mismo que se usa en el hierro gris.

La formación de grafito durante la solidificación hace aumentar el volumen, que combinado con la contracción térmica hace que el hierro dúctil no necesite de mazarotas, de esta forma la eficiencia de la fundición, que es la relación entre el metal aprovechado y el metal necesario para hacer la fundición sea muy alta, también la presencia rechupes es muy baja.

2.2.1. Principales propiedades del hierro dúctil.

Las propiedades mecánicas del hierro dúctil dependen básicamente de la composición, esta debe ser uniforme dentro de todas las fundiciones pertenecientes a una misma colada. Muchos elementos influyen en las propiedades de la fundición, pero los que mas importancia tienen son aquellos que influyen en la estructura de la matriz o en la forma y distribución de las esferas de grafito.

El carbono afecta la fluidez de la colada y la formación de rechupes en el metal , también influye en el tamaño y en el número de partículas de grafito. El silicio es un agente que promueve la formación de grafito; dentro de la composición normal, al incrementar el silicio aumenta la ferrita, aumentando la ductilidad, elevando ligeramente el esfuerzo de fluencia y reduciendo el esfuerzo último y la dureza.

Otros elementos usados para mejorar las propiedades son el manganeso que eleva el esfuerzo de fluencia pero reduce la ductilidad, el níquel es usado frecuentemente para permitir que el endurecimiento superficial sea mas fácil, el cobre también le da resistencia y el molibdeno le da resistencia a altas temperaturas.

Los hierros fundidos no son materiales homogéneos, su propiedades se ven afectadas por la forma, el tamaño y la distribución de las partículas grafito, aunque la densidad se ve afectada solo por los micro constituyentes presentes.

La densidad de la mayoría de los hierros dúctiles a temperatura ambiente está alrededor de 7.1g/cm^3 , un hierro dúctil perlítico puede tener una densidad de hasta 7.4g/cm^3 y uno ferrítico puede tener una densidad de 6.8g/cm^3 .

Los hierros dúctiles han sido escogidos para muchas aplicaciones por ofrecer bajos costos de maquinado, el hierro dúctil tienen aproximadamente la misma maquinabilidad que el hierro gris de misma dureza.

Debido a la gran cantidad de carbono presente en este material, la soldabilidad es mala, requiriendo de procedimientos

especiales para poder llevar a cabo este proceso. El principal cuidado que hay que tener al soldar hierro dúctil es prevenir la formación de cementita en la matriz del material, porque esta lo hace frágil en la región soldada. Otro aspecto muy importante al soldar hierro dúctil es mantener la forma esferoidal del grafito.

2.2.2. Grados del hierro nodular de acuerdo a la norma ASTM.

Se tienen 2 normas ASTM que pueden ser utilizadas para la obtención de hierro dúctil con las propiedades requeridas en esta tesis, la A-476 y la A-536.

Según la norma A-476, la composición química del hierro dúctil esta de acuerdo a la siguiente tabla

Tabla 10
Composición química del hierro dúctil según la norma
ASTM A-476

Carbono equivalente	3%
Silicio	3% máx.
Fósforo	0.08% máx.
Azufre	0.05% máx.

Nótese que el carbono equivalente es calculado con la fórmula $\% \text{carbono} + 0.3(\% \text{silicio} + \% \text{fósforo})$. Estos aceros tienen la ventaja de que pueden ser usados sin necesidad de tratamiento térmico, reduciendo los costos de producción de una pieza hecha de este material.

Las propiedades mecánicas de este material están en la tabla siguiente:

Tabla 11

Propiedades mecánicas del hierro dúctil de acuerdo a la norma ASTM A-476

Esfuerzo de fluencia	414 MPa
Esfuerzo último de tensión	552 MPa

La composición química según la norma A-536, va de acuerdo a los requerimientos y es pactada entre el productor y el comprador

Los grados del hierro dúctil se nombran con 3 números, el primero es el esfuerzo último en ksi, el segundo es el esfuerzo de fluencia en ksi y el último es el porcentaje de elongación.

Las propiedades mecánicas están de acuerdo a la siguiente tabla:

Tabla 12
Propiedades mecánicas de los diferentes grados de hierro dúctil de acuerdo a la norma A-536

Grado	60-40-18	65-45-12	80-55-06	100-70-03	120-90-02
Esfuerzo de fluencia (MPa)	276	310	379	483	621
Esfuerzo último (MPa)	414	448	552	689	827
% de elongación	18	12	6	3	2

El grado 60-40-18 necesita un recocido para la formación de ferrita, el 120-90-02 y el 100-70-03 necesitan temple y revenido en cambio que los dos grados restantes se pueden utilizar como salen de la fundición.

Recordando que las resistencias necesarias eran de 285MPa para el esfuerzo de fluencia y 332.77MPa para el esfuerzo ultimo, los materiales seleccionados son en el caso del acero fundido el 340-550 y para el hierro nodular el 65-45-12, en

ambos casos no hace falta tratamientos térmicos posteriores para afinar tamaño de grano o mejorar propiedades mecánicas, ambos están pensados para poder ser utilizados tal como salen de la fundición. El material especificado en la norma A-476 también es adecuado para los requerimientos planteados, aunque este material se lo prefiera para trabajos por encima de los 250°C

CAPÍTULO 3

3. Análisis de costos

El costo de fabricación de las tapas con sus respectivos marcos depende básicamente del peso de estas. Para la selección del material se usa una matriz de decisión. Los criterios para seleccionar el material son los siguientes:

- Costo de fabricación
- Facilidad de fabricación
- Cumplimiento de los requerimientos de diseño

Ahora se le dan las puntuaciones respectivas a cada una de los criterios, al costo de fabricación se refiere al precio de la materia prima, cantidad de energía necesaria para realizar la colada, necesidad de elementos aleantes y todos lo que influya en el precio final que tenga que ver con el material, por ser este un factor determinante en la venta o no del producto se le da un valor máximo de 10 puntos. Con facilidad de fabricación se quiere decir con que habilidad técnica se necesita para obtener dicho material, como este criterio es menos importante se le da un valor máximo de 6 puntos. Y por último con cumplir, los requerimientos de diseño se quiere decir que el material deberá cumplir con las resistencias requeridas

en el diseño y garantizar que la pieza hecha del material va a tener un tiempo de servicio de al menos 40 años o mas, a este parámetro le se le da un puntaje máximo de 10.

El costo de fabricación depende del precio de la materia prima, la energía necesaria para fundir y elementos aleantes necesarios para alcanzar la composición. Para el hierro dúctil la materia prima necesaria la se obtiene de chatarra de hierro nodular como por ejemplo cigüeñales usados, esta no es muy abundante y para compensar la falta de este material se podría pensar en importar hierro esponja o usar alambrón para trefilación de alguna acerera local, si se está usando estas últimas materias primas se tienen que tener en consideración que los elementos aleantes tendrán que ser agregados en forma pura, lo que aumenta el precio de fabricación.

El precio de la chatarra de hierro dúctil está por los 200usd la tonelada según datos de chatarreros locales, el uso de materias primas vírgenes como alambrón de trefilación o hierro esponja se descarta por lo complicado de agregar los elementos aleantes necesarios, estos tendrían que agregarse en forma pura o alguna aleación muy refinada, porque el contenido de azufre y fósforo final es muy bajo, mas bajo incluso que en el acero. El precio final de la fundición considerando costos de moldeo,

combustible utilizado, mano de obra y utilidad se estimó en 2.8usd/kg; dato obtenido de las fundidoras locales.

En el caso del acero en nuestro país la chatarra de este material es muy barata por su poca demanda, es inclusive mas barata que la chatarra de hierro gris. El precio de la chatarra de acero es de 40usd /tonelada, la mas abundante es la chatarra automotriz y los recortes del llamado hierro negro. Se sabe que esta chatarra tiene 6% de manganeso, según la composición mostrada en la tabla 7 se necesita el 1.2%, esto se resuelve agregando ferromanganeso a la colada, mas o menos 1kg por cada 100kg de acero, el precio del ferromanganeso es de 1 dólar el kilogramo, finalmente el precio por kilogramo considerando todos los costos y agregando la utilidad es de 2.2usd/kg, en ambos casos tanto como en el hierro dúctil y el acero fundido los márgenes de ganancia están en el orden del 35%, se considera que esta es una ganancia razonable para poder llevar a cabo una producción.

El hierro dúctil es de fácil fabricación si se tienen la materia prima adecuada; su punto de fusión no es muy elevado, no necesitándose equipos muy complicados ni se necesita de gran destreza en su elaboración.

El acero fundido por su elevado punto de fusión requiere de mas destreza para su elaboración, además los combustibles necesarios son mas

costosos por requerirse mayores grados de energía, en lo que respecta a control de la fundición no da mayores problemas, lo único que hay que tomar en cuenta es la cantidad de manganeso presente, debido a que este se oxida durante la elaboración de la colada.

Respecto a los requerimientos de diseño ambos cumplen perfectamente con los esfuerzos exigidos, en el caso del acero fundido la corrosión no es un problema para esta material desde el punto de vista estructural, según los datos del MICAT y de la ASM.

, la matriz de decisión finalmente queda, calificando sobre 10 todas los criterios:

Tabla 13

Calificaciones de los criterios de decisión sobre 10 puntos

	Costo	Facilidad de fabricación	Requerimientos de diseño
A-476 80-60-03	7	8	10
A-536 65-45-12	7	8	10
ISO-3755 340-550	9	6	10

Llevando a cada calificación a su valor real, de acuerdo al puntaje asignado, se tiene la siguiente tabla:

Tabla 14

Matriz de decisión final

	Costo	Facilidad de fabricación	Requerimientos de diseño	Total
A-476 80-60-03	7	4.8	10	21.8
A-536 65-45-12	7	4.8	10	21.8
ISO-3755 340-550	9	3.6	10	23.6

Se selecciona el acero fundido 340-550, de la norma ISO-3755 por ser el que puntaje mas alto obtuvo.

CAPÍTULO 4

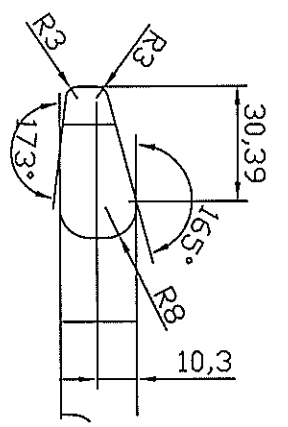
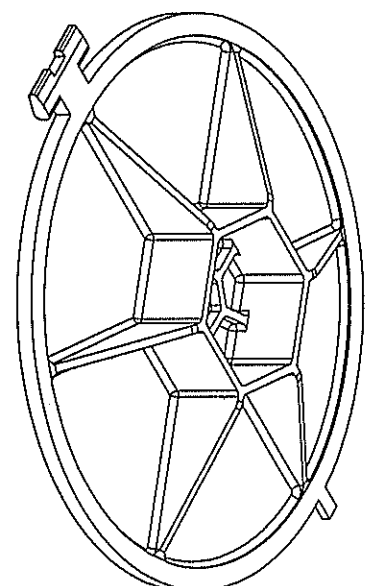
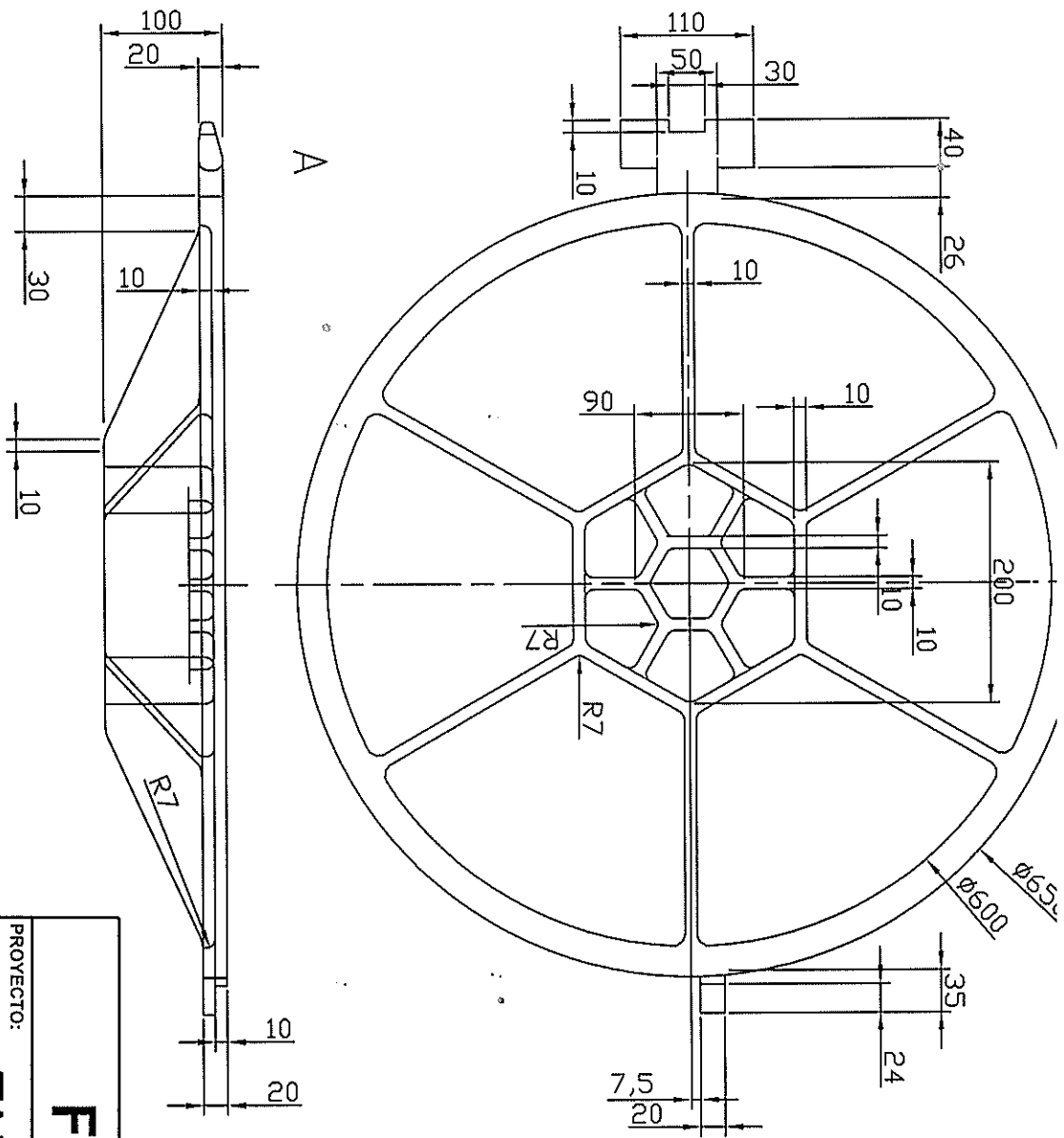
4. Conclusiones y recomendaciones

4.1 Conclusiones

- Se aplicó un método de cálculo con lo que se encuentra las dimensiones apropiadas para los casos considerados
- Las demás condiciones del diseño de la tapa, tales como la bisagra desmontable y el aseguramiento se incorporan en el diseño, ya que es una condición indispensable propuesta por el municipio.
- Se encontró que el peso total del conjunto tapa marco es de 76Kg, que es muy similar a las importadas.
- El precio estimado de producción del conjunto es de 170 dólares americanos, haciéndose un producto competitivo frente al extranjero que ubicado en el Ecuador tienen un precio de 200 dólares americanos.
- La tecnología informática ha sido usada con excelentes resultados para obtener resultados positivos y confiables por lo que se aconseja su uso.

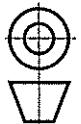
4.2 Recomendaciones

- La metodología para verificación de los datos proporcionados por el programa de elementos finitos, o sea la simulación con modelos ha proporcionado alta confiabilidad y por lo tanto, y por lo tanto también se recomienda su uso mas intenso en tesis de grado que se propongan posteriormente.
- Se recomienda a la ESPOL, tomar un papel más activo en el control de importaciones de partes usadas para obras públicas, que se puedan hacer en el país con la misma calidad y a menor precio.
- Se recomienda el uso del acero fundido por ser difícil de fundir por las técnicas utilizadas por la mayor parte de fundidores locales por su punto de fusión más elevado, en cambio las tapas importadas se funden fácilmente ya que están hechas de hierro dúctil, que posee un punto de fusión mas bajo.
- Se recomienda modelar y/o simular el proceso de fundición para prevenir en la producción final problemas de rechupes, juntas frías, etc.

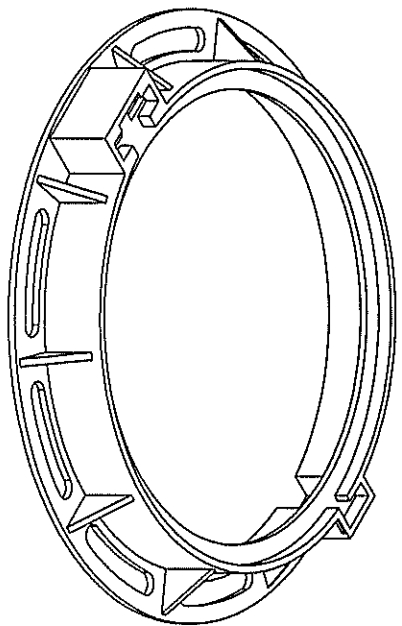
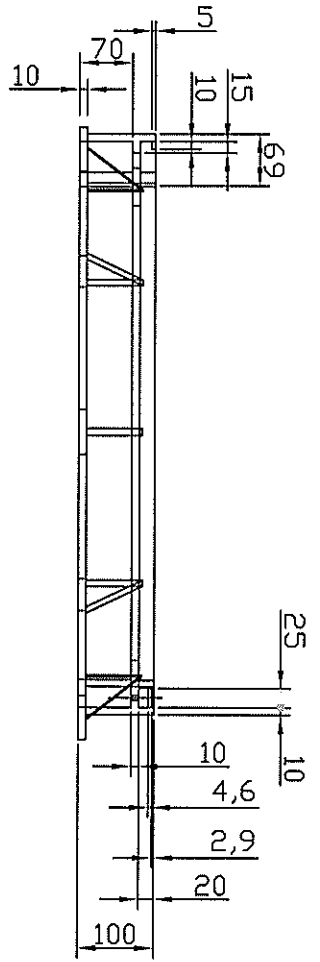
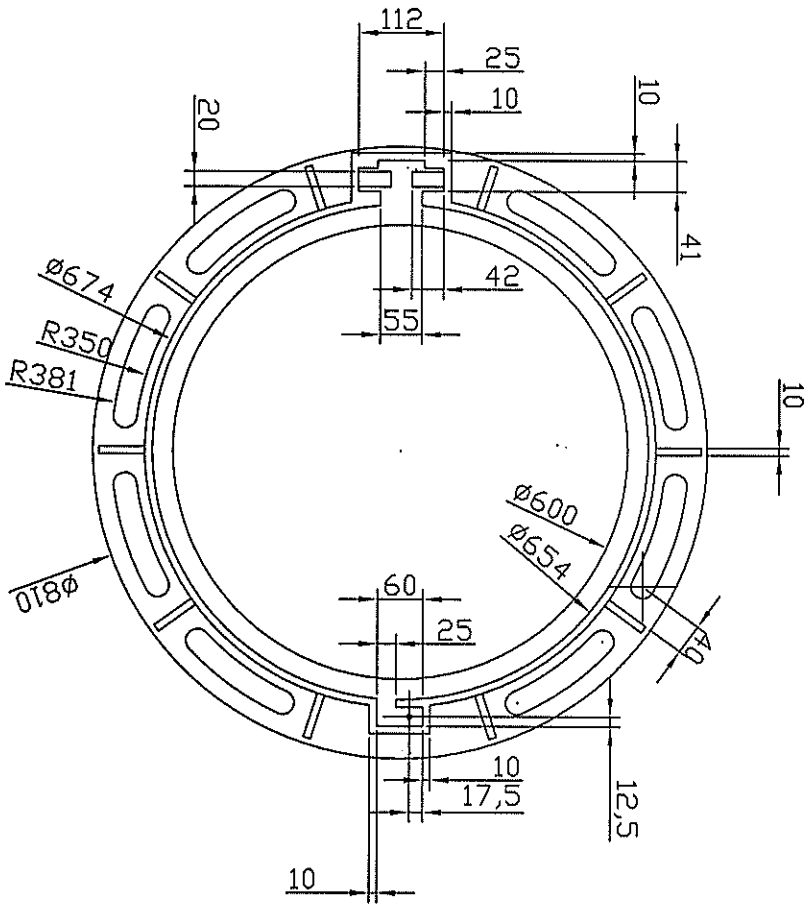


A (1:2)

PROYECTO:		FIMCP-ESPOL	
ESCALA:		TAPA DE REGISTRO	
CONTIENE:		Tapa de registro	
MATERIALES:		Acero fundido ISO3755 grado 340-550	
PLANO No.:		1	
Dibujó	FECHA	Revisó	NOMBRE
29/08/03	D. Alba	29/08/03	Ing. Weiser
MASA (kg):		41	



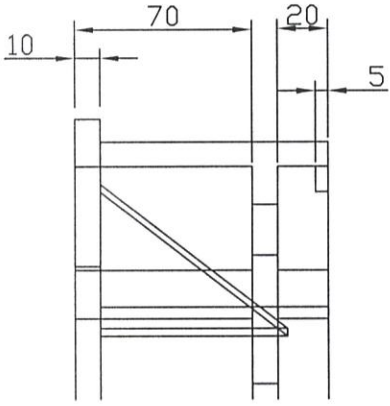
1:6



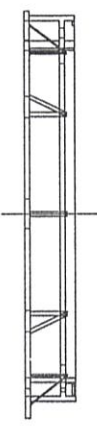
NO. 10
 010 - 33 30

<p>PROYECTO:</p> <h1 style="text-align: center;">FIMCP-ESPOL</h1> <h2 style="text-align: center;">TAPA DE REGISTRO</h2>				<p>FECHA</p> <p>29/08/03</p>	
				<p>NOMBRE</p> <p>D. Alba</p>	
<p>ESCALA:</p> <h1 style="text-align: center;">1:10</h1>				<p>PLANO No:</p> <h1 style="text-align: center;">2</h1>	
<p>CONTIENE:</p> <h2 style="text-align: center;">Marco</h2>		<p>MATERIALES:</p> <p>Acero fundido ISO3755 grado 340-550</p>		<p>MASA (kg):</p> <h1 style="text-align: center;">35</h1>	
		<p>Dibujó</p> <p>29/08/03</p>		<p>Revisó</p> <p>29/08/03</p>	
		<p>ing. Wiesner</p>			

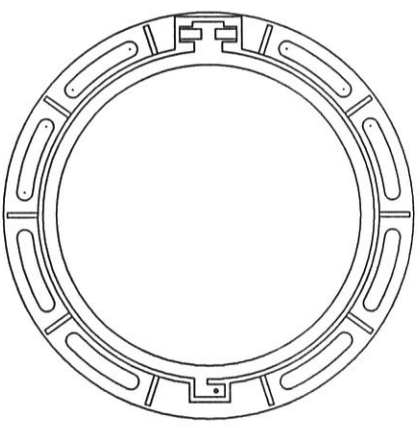
A (1:3)



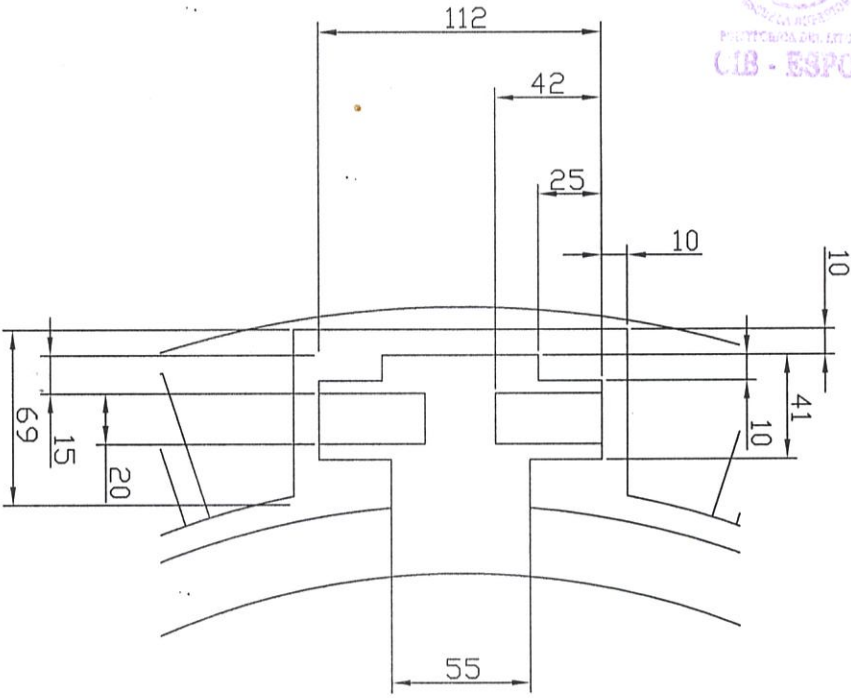
A



B

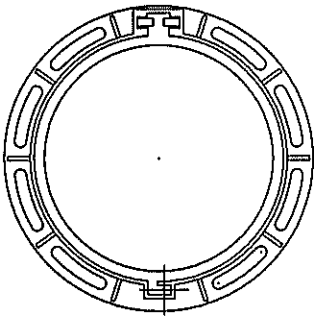
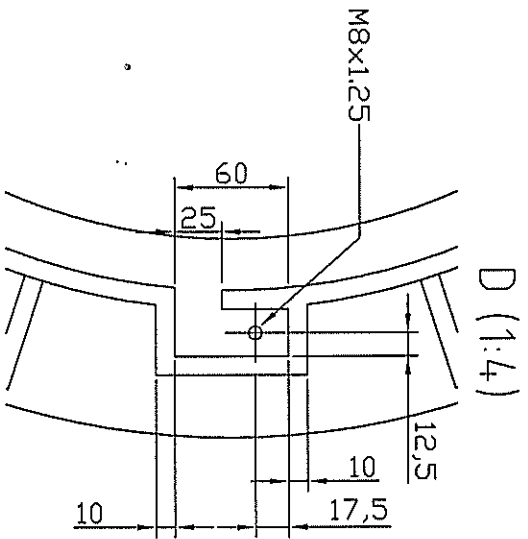
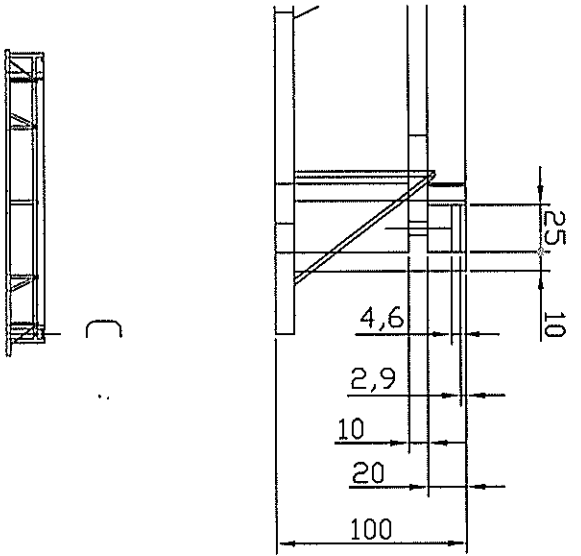


B (1:3)



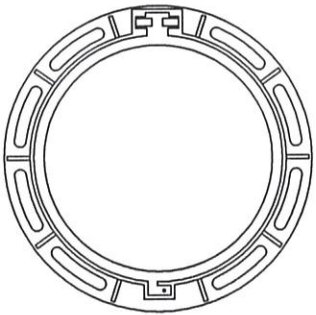
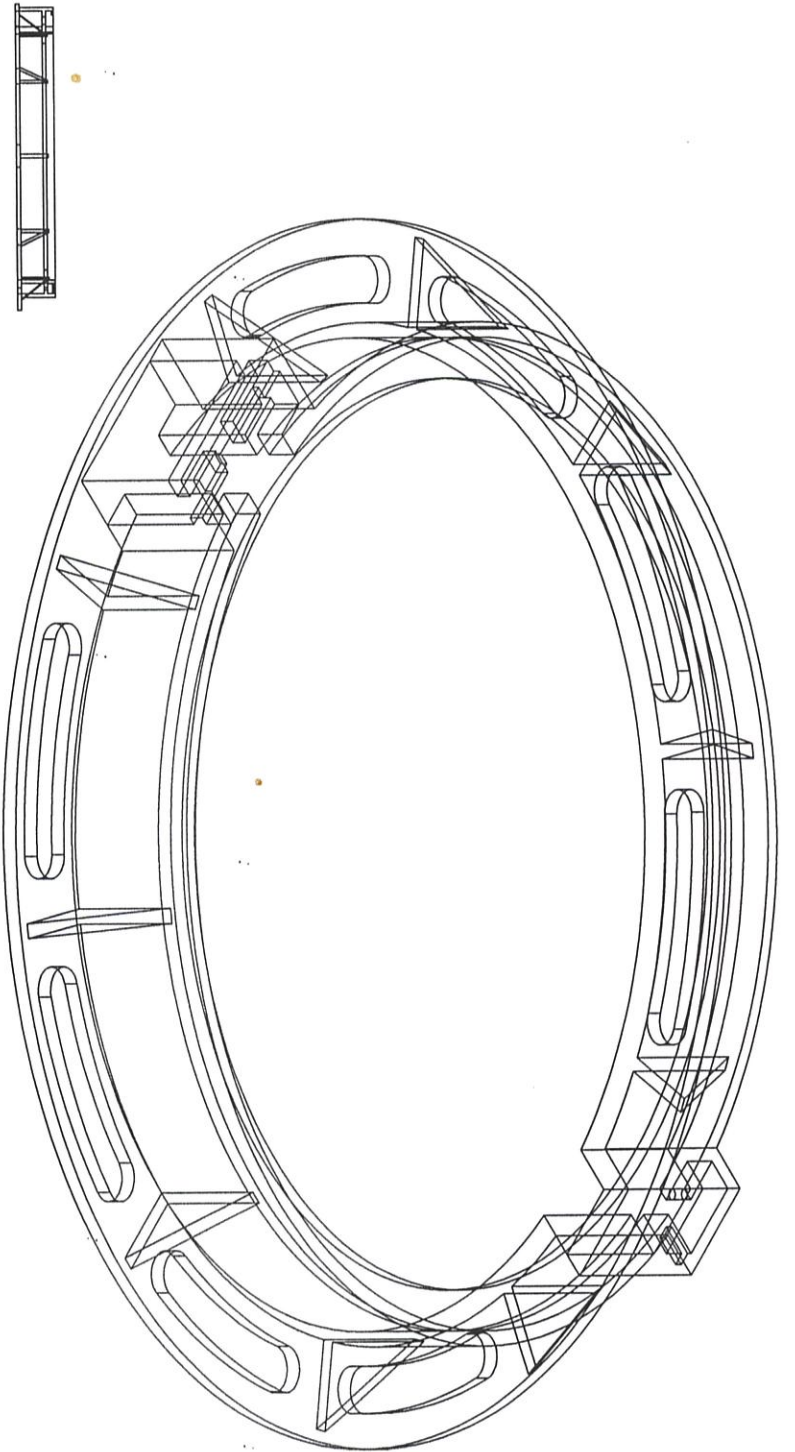
<p>PROYECTO:</p> <h1>FIMCP-ESPOL</h1>		FECHA	NOMBRE	
		Dibujó	29/08/03	D. Alba
<p>CONTIENE:</p> <h2>TAPA DE REGISTRO</h2>		Revisó	29/08/03	Ing. Westner
		<p>PLANO No:</p> <h1>3</h1>		
<p>ESCALA:</p>	<p>MATERIALES:</p> <p>Acero fundido ISO3755 grado 340-550</p>	<p>MASA (kg):</p> <h1>3</h1>		
<p>CONTIENE:</p> <p>Bisagra en marco(Detalle)</p>				

C (1:4)



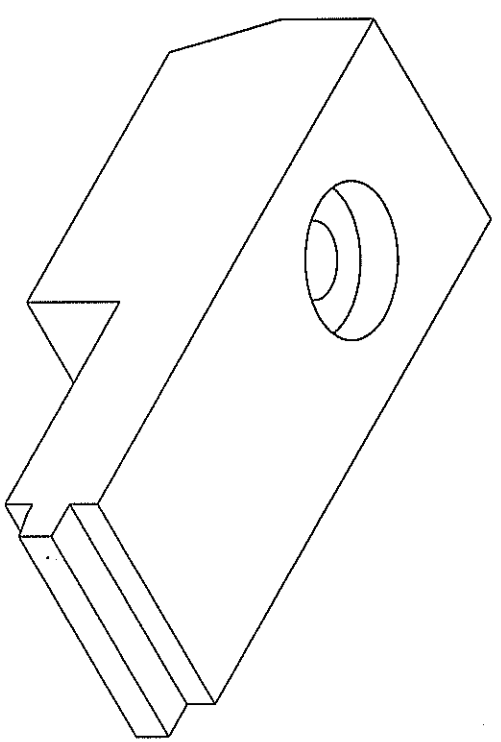
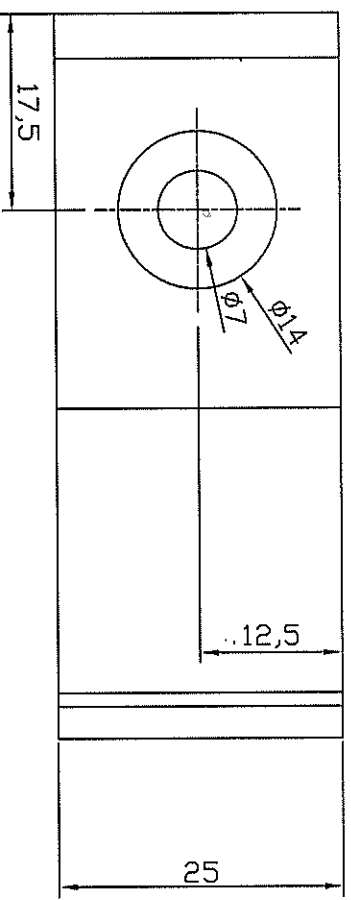
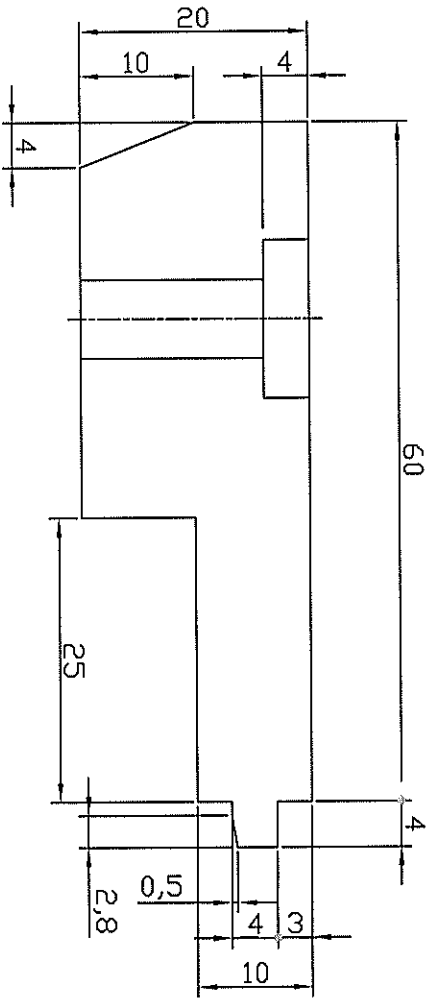
D

<p>PROYECTO:</p> <h1>FIMCP-ESPOL</h1> <h2>TAPA DE REGISTRO</h2>		<p>PLANO No:</p> <h1>4</h1>	
		<p>Dibujó</p> <p>29/08/03</p> <p>D. Alba</p>	<p>FECHA</p> <p>29/08/03</p> <p>NOMBRE</p> <p>Ing. Weisner</p>
<p>ESCALA:</p> <h1>1:6</h1>	<p>CONTIENE:</p> <p>Seguro en marco (Detalle)</p>	<p>MATERIALES:</p> <p>Acero fundido ISO3755 grado 340-550</p>	
	<p>MASA (kg):</p> <p>42</p>		

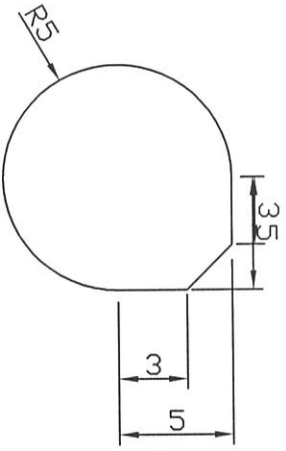
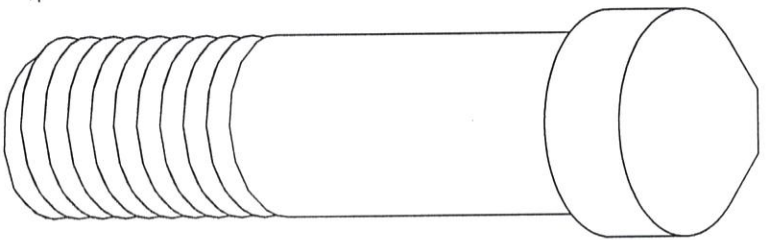
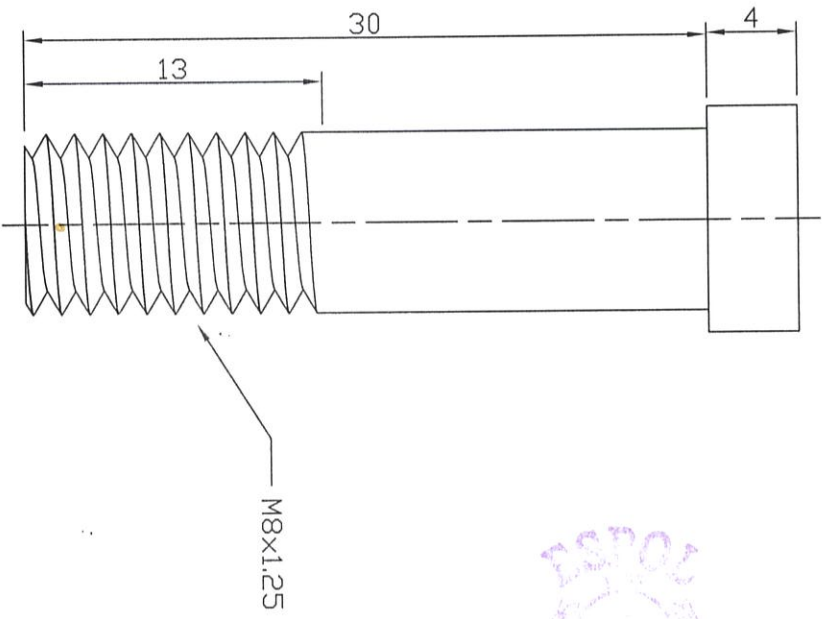


FIMCP-ESPOL PROYECTO: TAPA DE REGISTRO		FECHA	NOMBRE
ESCALA: 1:5 CONTIENE: Vista isométricas del marco MATERIALES: Acero fundido ISO3755 grado 340-550		Dibujo 29/08/03	D. Alba
PLANO No.: 5		Revisó 29/08/03	Ing. Wiesner
MASA (kg): 35			

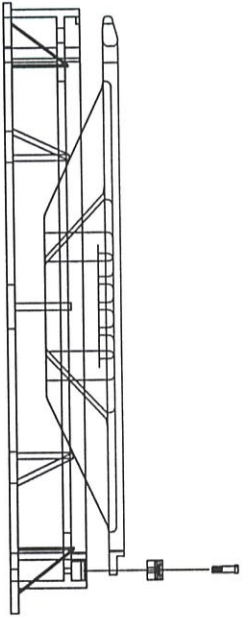
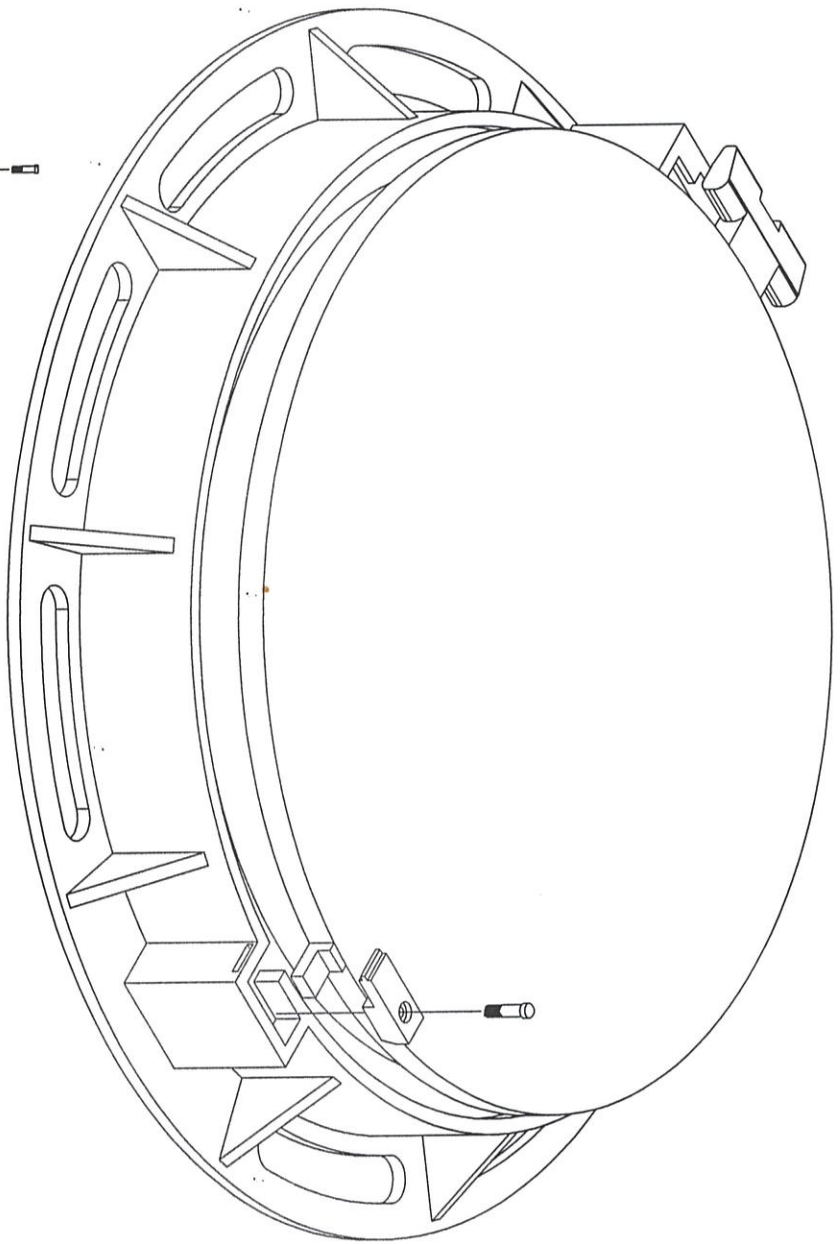




FIMCP-ESPOL		FECHA	NOMBRE
		Dibujó	D. Alba
PROYECTO: TAPA DE REGISTRO		Revisó	Ing. Wiesner
ESCALA: 1.5:1		PLANO No:	
CONTIENE: Seguro		6	
MATERIALES: Acero fundido ISO3755 grado 340-550			
		MASA (kg): 0.15	



FIMCP-ESPOL TAPA DE REGISTRO		PROYECTO:	
		ESCALA: 1:6	
CONTENIDO:		MATERIALES:	
Perno del seguro		Acero fundido ISO3755 grado 340-550	
MASA (Kg):		0.01	
PLANO No.:		7	
Dibujo	FECHA	Nombre	Firma
Revisó	29/08/03	D. Alba	Ing. Wiesner



PROYECTO:		FIMCP-ESPOL		FECHA	NOMBRE
TAPA DE REGISTRO		Dibujó	29/08/03	D. Alba	
		Revisó	29/08/03	Ing. Wiesner	
ESCALA:		PLANO No:			
1:10		8			
CONTIENE:		MASA (kg):			
Ensamble					
MATERIALES:					

APÉNDICE I

REQUERIMIENTOS DE LAS TAPAS DE REGISTRO

SEGÚN LA NORMA EN-124

1.1 Definiciones de la terminología a utilizarse.

Profundidad de encastramiento.- Se dice profundidad de encastramiento a la medida mostrada por la cota A en la figura 1.1.

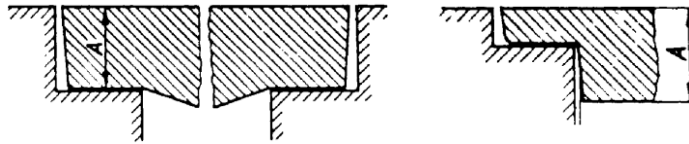


Figura 1. Profundidad de encastramiento

Holgura total.- Es la suma de las holguras máximas individuales entre elementos adyacentes del marco y la tapa, es decir $a = a_1 + a_2$.

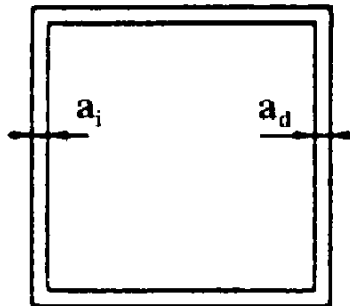


Figura 2. Holgura total

Apoyo.- Superficie interior del marco que descansa en la estructura soporte.

Cotas de paso.- El diámetro del círculo mayor que puede ser inscrito en la abertura libre del marco.

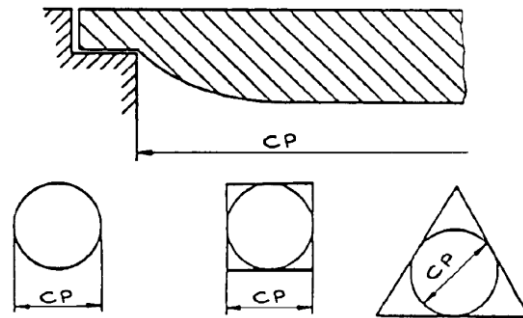


Figura 3 Cotas de paso

Abertura libre.- Superficie libre de la abertura entre los asientos, mostrada en la figura 4

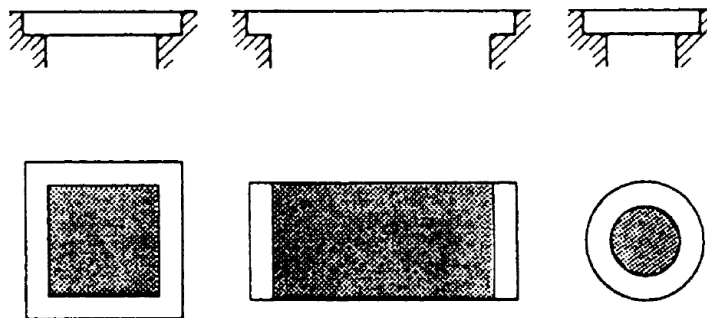


Figura 4. Abertura libre

Fuerza de control.- Fuerza de control aplicada a los dispositivos de cierre o de cubrimientos durante los ensayos.

Asientos.- Superficie sobre la que reposan las tapas sobre su marco.

1.2 Lugar de utilización.

Los lugares de instalación se clasifican en 6 grupos, de la misma forma los dispositivos de cubrimiento de acuerdo a la zona donde vayan a ser utilizados, la clasificación de los dispositivos de cubrimiento es A 15, B 125, C 250, D 400, E 600 y F 600, donde el número que acompaña a cada clasificación es la fuerza de control en kilonewtons (kN). Podemos ver algunos grupos de instalación en la figura 5.

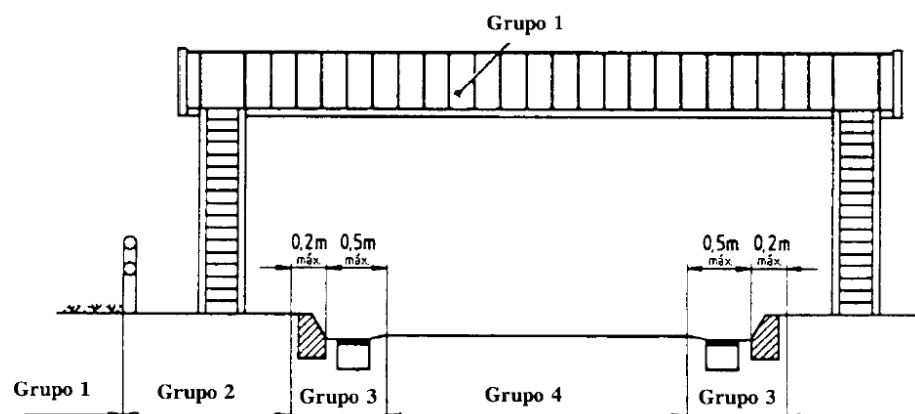


Figura 5. Zonas de utilización de los distintos grupos

Grupo 1.- Zonas susceptibles de ser utilizadas exclusivamente por peatones y ciclistas, se recomienda dispositivos clase A15 como mínimo.

Grupo 2.- Aceras, zonas peatonales y superficies similares, áreas de estacionamiento y aparcamientos de varios pisos, se recomienda dispositivos B 125.

Grupo 3.- Para los dispositivos de cubrimiento instalados en cunetas de calles, que medido a partir del bordillo de la acera se extienda máximo 0.5m sobre la calzada y 0.2 sobre la acera, se recomienda dispositivos clase C250.

Grupo 4.- Calzadas de carreteras incluyendo calles peatonales, zonas de aparcamiento para todo tipo de vehículos.

Grupo 5.- Áreas por la que circulan vehículos de gran tonelaje, por ejemplo pavimentos de aeropuertos, muelles; se recomienda dispositivos clase E900

Grupo 6.- Zonas sometidas a cargas particularmente elevadas como pueden ser pavimentos de aeropuertos, se recomienda dispositivos clase F900.

1.3 Características específicas de las tapas

Las tapas deberán estar libres de defectos que puedan afectar a su buen desempeño para ser utilizadas.

Cuando no se muestre ninguna especificación detallada para un requerimiento en particular, el fabricante deberá hacer constar tal especificación en su documentación.

Orificios de ventilación.- Las tapas pueden ser diseñadas con o sin orificios de ventilación, la superficie mínima de ventilación deberá estar de acuerdo a la tabla 1.

TABLA 1
SUPERFICIE MÍNIMA DE VENTILACIÓN

Cota de paso	Superficie mínima de ventilación
≤ 600 mm	5% de la superficie de un círculo con un diámetro igual a la cota de paso
> 600 mm	140 mm ²

Los orificios de ventilación en las tapas de los dispositivos de cierre tendrán las siguientes dimensiones de acuerdo a la tabla 2.

TABLA 2
DIMENSIONES DE LOS ORIFICIOS DE VENTILACIÓN

Ranuras		
	Longitud	Ancho
Clases A 15 y B 125	≤ 170 mm	18 mm a 25 mm
Clases C 250 a F 900	≤ 170 mm	18 mm a 32 mm
Agujeros		
Clases A 15 y B 125	18 mm a 38 mm de diámetro	
Clases C 250 a F 900	30 mm a 38 mm de diámetro	

Cota de paso de las tapas utilizadas como paso de hombre.- La cota de paso de los dispositivos de cierre utilizados como paso de hombre se ajustará las normas de seguridad requeridas dependiendo del lugar de instalación. Generalmente se considera que debe tener un diámetro de al menos 600 mm.

Profundidad de encastramiento.- Para los dispositivos de cubrimiento de las clases D 400, E 600 y F 900 tendrán una profundidad de encastramiento de al menos 50 mm, especificación no aplicable en caso de que las tapas posean un dispositivo acerrojado para evitar su movimiento de la posición donde hayan sido colocadas.

Holgura total.- La holgura total permitida permite desplazamientos horizontales de la tapa dentro de su marco. Para limitar este desplazamiento la holgura total deberá cumplir con las siguientes especificaciones:

- CP \leq 400 mm, holgura \leq 7 mm
- CP > 400 mm, holgura \leq 9 mm

Asientos.- Para los dispositivos de clases de D 400 a F 900 la compatibilidad entre la tapa y su asiento debe ser de tal manera que asegure estabilidad y ausencia de ruido durante su uso. Para lograr este objetivo se puede mecanizar las superficies de contacto, usar soportes elásticos, diseño de apoyo en 3 puntos, o por cualquier método apropiado.

Aseguramiento de la tapa en el marco.- La tapa deberá estar asegurada dentro del marco para cumplir con las condiciones requeridas pertinentes al tráfico del lugar de instalación. Esto puede lograrse mediante un dispositivo acerrojado, con suficiente masa superficial o con una característica específica de diseño.

Estado de la superficie.- La superficie superior de las rejillas, tapas y marcos de las clases D 400 a F900 deben ser planas con una tolerancia del 1% de la cota de paso limitada a un máximo de 6 mm.

Las tapas deberán tener un dibujo en relieve cuya altura deberá ser de 2 a 6 mm para las clases de la A 15 a la C 250 y de 3 mm a 8 mm para la clase D 400 a F 900. La superficie del dibujo no deberá ser ni menor que el 10% ni superior al 70% de la superficie total.

Desbloqueo y levantamiento de las tapas.- Deben preverse disposiciones que permitan asegurar un efectivo desbloqueo de tapas y rejillas y su apertura.

Apoyos.- El apoyo será diseñado de tal manera que la presión correspondiente a la carga de ensayo no excederá de 7.5 N/mm^2 , y omitir de forma adecuada a la estabilidad en las condiciones de uso.

Altura del marco.- La altura del marco de los dispositivos de cierre de la clase D 400 a la clase F 900 debe ser como mínimo 100 mm excepto la clase D 400 donde se permite que la parte metálica pueda reducirse a 75 mm siempre que el marco esté equipado de medios de anclaje.

1.5 Ensayos.- 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.

Fuerza de control.- La fuerza de control que se deberá aplicar esta mostrada en la tabla 3 para los dispositivos cuya cota de paso es mayor que 250 mm. Se la cota de paso es menor se deberá multiplicar los valores de la tabla por CP/250.

TABLA 3
FUERZA DE CONTROL

Clase	Fuerza de control (kN)
A 15	15
B 125	125
C 250	250
D 400	400
E 600	600
F 900	900

Dispositivos de ensayo.- 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 presentada en la tabla 3. hasta la clase D 400, para las clases E 600 y F 900 la fuerza capaz de ser aplicada deberá ser un 10% mayor y 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 para dispositivos con un CP mayor que 300 mm y menor que 1000 mm es como se muestra en la figura 1.6, para otros casos se deberá consultar la norma.

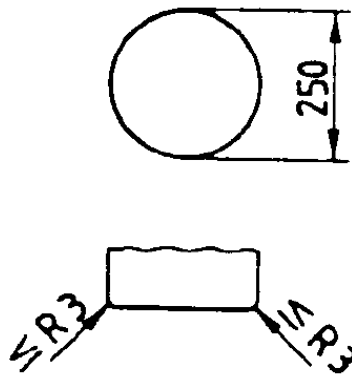


Figura 1.6. Platos de carga

Preparación del ensayo.- 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.

Método de ensayo.- 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.

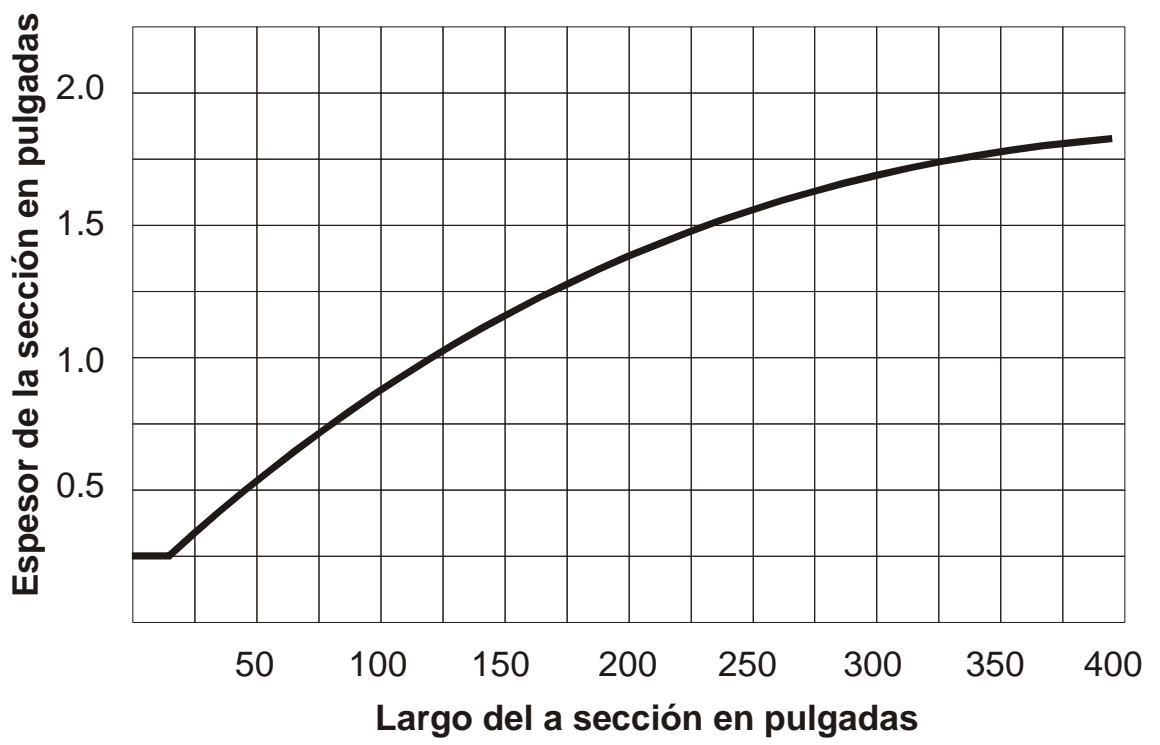
La flecha residual debe determinarse como la diferencia de las distintas lecturas de medida tomadas antes de la primera y después de la quinta carga, el dato final no deberá exceder 1/300 CP para las clases C 250 a F 900 y con un CP mayor que 300 mm.

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.

APÉNDICE II

ESPESOR MINIMO DE LAS FUNDICIONES DE ACERO EN FUNCION DE SU LONGITUN MAXIMA



APÉNDICE III

EL METODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

1.1.1 El método de los elementos finitos

El método de los elementos finitos se puede decir que es una generalización del método de Rayleigh-Ritz utilizado para aproximar soluciones de ecuaciones diferenciales con valores en la frontera, este método nos permite encontrar solución a ecuaciones diferenciales que modelan problemas físicos de amplia aplicación en la ingeniería, este método debe su nombre justamente a que para llegar a una solución la estructura primero debe discretizarse, es decir dividirla en elementos finitos que generan una malla.

Una gran ventaja de este método es la facilidad con la que se manejan las condiciones de frontera, no importa que estas sean irregulares; incluso se puede hacer mas densa la malla en lugares de interés como puede ser un punto donde se necesita una solución mas exacta o donde la frontera sea muy irregular.

Matrices de rigidez de elementos y vectores de fuerzas equivalentes.- Primero discretizamos un dominio de interés, es decir se lo divide en una serie de elementos finitos. Aplicando el principio de energía potencial total estacionaria se

obtendrá un sistema de ecuaciones algebraicas a partir del cual es posible obtener los desplazamientos nodales.

Para empezar tenemos la expresión que determina la energía potencial total en un cuerpo elástico lineal, esta es:

$$\Pi_p = \iiint_V \left(\frac{1}{2} \{\boldsymbol{\varepsilon}\}^T [\mathbf{D}] \{\boldsymbol{\varepsilon}\} - \{\boldsymbol{\varepsilon}\}^T [\mathbf{D}] \{\boldsymbol{\varepsilon}_0\} + \{\boldsymbol{\varepsilon}\}^T \{\boldsymbol{\sigma}_0\} \right) dV - \iiint_V \{\mathbf{u}\}^T \{\mathbf{b}\} dV - \iint_S \{\mathbf{u}\}^T \{\mathbf{t}\} dS - \{\mathbf{U}\}^T \{\mathbf{P}\}$$

En donde:

$\{\mathbf{u}\}^T = [u \ v \ w]$: campo de desplazamientos

$\{\boldsymbol{\varepsilon}\} = \{\boldsymbol{\varepsilon}_x \ \boldsymbol{\varepsilon}_y \ \boldsymbol{\varepsilon}_z \ \boldsymbol{\gamma}_{xy} \ \boldsymbol{\gamma}_{xz} \ \boldsymbol{\gamma}_{yz}\}$: Campo de deformaciones

$[\mathbf{D}]$: Matriz de propiedades del material

$\{\boldsymbol{\sigma}_0\}, \{\boldsymbol{\varepsilon}_0\}$: Deformaciones y tensiones iniciales

$\{\mathbf{b}\} = [b_x \ b_y \ b_z]$: Fuerzas volumétricas

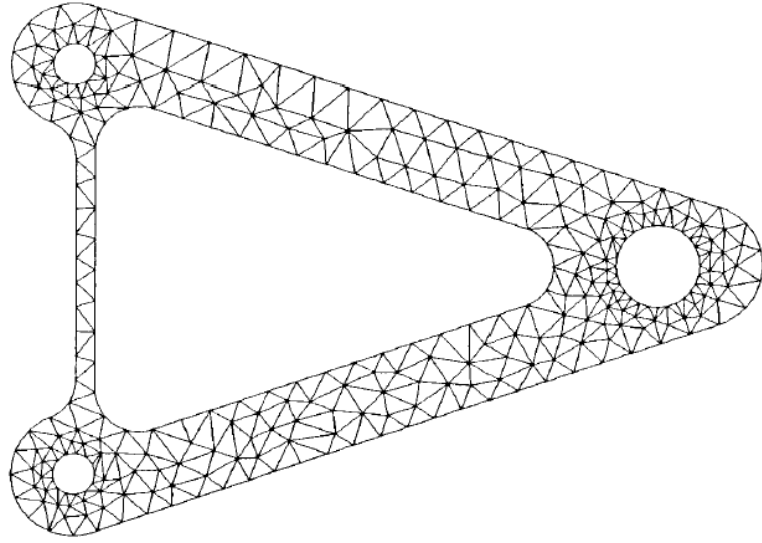
$\{\mathbf{t}\} = [t_x \ t_y \ t_z]$: Fuerzas superficiales

$\{\mathbf{U}\}$: Desplazamientos nodales del sistema

$\{\mathbf{P}\}$: Fuerzas puntuales aplicadas

\mathbf{S}, \mathbf{V} : Área superficial y volumen del dominio

Considerando la discretización del dominio en un conjunto de elementos finitos como se muestra en la figura



Discretización del dominio

Los desplazamientos dentro de cada elemento se interpolan a partir de los desplazamientos nodales $\{\mathbf{u}^e\}$, es decir:

$$\{\mathbf{u}(x, y, z)\} = [\mathbf{N}(x, y, z)]\{\mathbf{u}^e\}$$

Donde $[\mathbf{N}]$ es la matriz que contiene las funciones de forma, dichas funciones deben ser sencillas, usualmente se toman funciones seccionalmente lineales.

Las deformaciones se obtienen de los desplazamientos mediante diferenciación

$$\begin{aligned}\{\varepsilon\} &= [\mathbf{L}]\{\mathbf{u}\} \\ \rightarrow \{\varepsilon\} &= [\mathbf{L}][\mathbf{N}]\{\mathbf{u}\} \\ \rightarrow \{\varepsilon\} &= [\mathbf{B}]\{\mathbf{u}^e\}\end{aligned}$$

Donde $[\mathbf{B}] = [\mathbf{L}][\mathbf{N}]$, y el operador diferencial $[\mathbf{L}]$ actúa sobre las funciones de forma y contiene primeras derivadas con respecto a las coordenadas, para el caso en 3 dimensiones este operador es:

$$[\mathbf{L}] = \begin{bmatrix} \partial/\partial x & 0 & 0 \\ 0 & \partial/\partial y & 0 \\ 0 & 0 & \partial/\partial z \\ \partial/\partial y & \partial/\partial x & 0 \\ 0 & \partial/\partial z & \partial/\partial y \\ \partial/\partial z & 0 & \partial/\partial x \end{bmatrix}$$

Sustituyendo las expresiones $\{\mathbf{u}\}$ y $\{\varepsilon\}$ en la ecuación de la energía potencial total en un cuerpo elástico tenemos que:

$$\Pi_p = \frac{1}{2} \sum_{e=1}^{ne} \{\mathbf{u}^e\}^T [\mathbf{k}^e] \{\mathbf{u}^e\} - \sum_{e=1}^{ne} \{\mathbf{u}^e\}^T \{\mathbf{f}^e\} - \{\mathbf{U}\}^T \{\mathbf{P}\}$$

Donde han sido sustituidas las integrales por sumatorias, por haber discretizado del dominio. Aquí vemos que la matriz de rigidez del sistema queda definida por:

$$[\mathbf{k}^e] = \iiint_{V_e} [\mathbf{B}]^T [\mathbf{D}] [\mathbf{B}] dV$$

y el vector de fuerzas equivalentes en los nodos:

$$[\mathbf{f}^e] = \iiint_{V_e} [\mathbf{B}]^T \{\varepsilon_0\} dV - \iiint_{V_e} [\mathbf{B}]^T \{\sigma_0\} dV + \iiint_{V_e} [\mathbf{N}]^T \{b\} dV + \iint_{S_e} [\mathbf{N}]^T \{t\} dS$$

Donde las integrales se evalúan en el volumen y en la superficie del elemento correspondiente.

Teniendo en cuenta de que cualquier desplazamiento nodal $\{\mathbf{u}^e\}$ aparece en el vector global $\{\mathbf{U}\}$, se puede extender este concepto a la matriz de rigidez $[\mathbf{k}^e]$ y el vector de fuerzas equivalentes $\{\mathbf{f}^e\}$ de cada elemento del dominio, de esta manera la ecuación de la energía potencial queda:

$$\Pi_p = \frac{1}{2} \{\mathbf{U}\}^T [\mathbf{K}] \{\mathbf{U}\} - \{\mathbf{U}\}^T \{\mathbf{F}\}$$

de donde:

$$[\mathbf{K}] = \sum_{e=1}^{ne} [\mathbf{k}^e] \text{ y } \{\mathbf{F}\} = \{P\} + \sum_{e=1}^{ne} \{\mathbf{f}^e\}$$

Considerando que el sistema esta en estado estacionario, es decir que la energía potencial es mínima, derivamos con respecto a $\{\mathbf{U}\}$ e igualando a cero y encontramos que:

$$\left\{ \frac{\partial \Pi}{\partial \mathbf{U}} \right\} = 0 \Rightarrow [\mathbf{K}]\{\mathbf{U}\} = \{\mathbf{F}\}$$

Esta ecuación es una ecuación algebraica que puede utilizarse para obtener $\{\mathbf{U}\}$.

Calculo de esfuerzos.- Una vez resuelto el sistema de ecuaciones propuesto, podemos encontrar el vector de desplazamientos nodales $\{\mathbf{U}\}$, con estos resultados podemos encontrar los esfuerzos que aparecen en los elementos finitos.

De la teoría general de la elasticidad (ley de Hook) sabemos que la relación entre las tensiones y deformaciones tiene la forma

$$\{\sigma\} = [D](\{\varepsilon\} - \{\varepsilon_0\}) + \{\sigma_0\}$$

Recordando que las deformaciones las podemos encontrar con los desplazamientos nodales de acuerdo con la ecuación $\{\varepsilon\} = [\mathbf{B}]\{\mathbf{u}^e\}$; debido a que $[\mathbf{B}] = [\mathbf{L}][\mathbf{N}]$, se ve que las deformaciones se obtienen de la derivación del campo de desplazamientos, resultando que el calculo de los esfuerzos sea menos preciso que el de las deformaciones.

Interpolación y funciones de forma.- La interpolación es una parte muy importante del método de los elementos finitos, la interpolación en el método de los elementos finitos se los lleva a cabo mediante las funciones de forma, estas funciones deberán elegirse de tal manera que:

$$\phi = \sum N_i \phi_i = [N] \{\phi^e\}$$

Donde ϕ es la función incógnita, $[N]$ la matriz que contiene las funciones de forma y $\{\phi^e\}$ es el vector que contiene los valores de la función incógnita ϕ en los nodos del elemento finito, estas funciones de forma dependen del tipo de elemento que se haya escogido.

Para que el método converja, es necesario que las funciones de forma escogidas sean continuas en la frontera aunque no es necesario que sus derivadas lo sean, así en el caso de elementos tridimensionales la continuidad se debe satisfacer entre caras, que es por donde se conectan los elementos entre si. Una propiedad importante de las funciones es que estas toman el valor de uno en el nodo de definición y 0 en los restantes nodos, esto se puede escribir:

$$N_j(x_i, y_i, z_i) = \begin{cases} 1 & \text{si } i = j \\ 0 & \text{si } i \neq j \end{cases}$$

De esta manera se puede resolver el problema tanto en coordenados locales como globales, para el caso de un tetraedro, este tiene 4 nodos y es un elemento lineal por lo que podemos utilizar un polinomio lineal, de la forma $ax + by + cz + d$. Con la condición dada anteriormente se puede encontrar los coeficientes de dichos polinomios para una solución completa.

Para el caso de elementos mas complejos, es decir con un mayor número de nodos, como pueden ser los tetraedros isoparamétricos o elementos planos cuadráticos o cúbicos es conveniente plantear las funciones de forma en coordenadas locales. Como tenemos las funciones de forma de un elemento triangular cuadrático

$$N_1 = (1 - \xi - \eta)(1 - 2\xi - 2\eta)$$

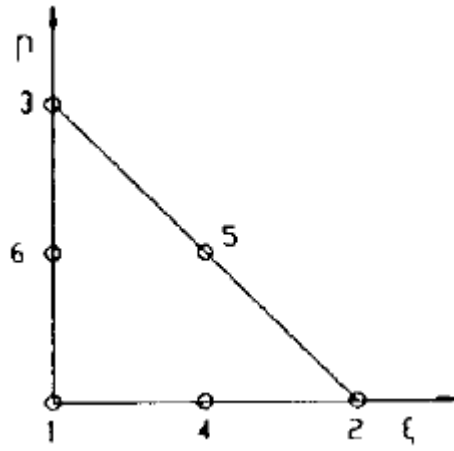
$$N_2 = -\xi(1 - 2\xi)$$

$$N_3 = -\eta(1 - 2\eta)$$

$$N_4 = 4\xi(1 - \xi - \eta)$$

$$N_5 = 4\xi\eta$$

$$N_6 = 4\eta(1 - \xi - \eta)$$



Elemento triangular cuadrático

BIBLIOGRAFIA

- 1) R. K. Livesley; Elementos Finitos: Introducción para Ingenieros; primera edición, 1988; Editorial Limusa.
- 2) 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) Tomo 1 del Manual de la American Society of Materials (ASM)
- 5) Popov, Egor; Mecánica de sólidos; Segunda Edición, 200; Pearson Educación.
- 6) Joseph Shigley, Charles R. Mishke; Diseño en Ingeniería Mecánica; Quinta Edición, 2000; McGraw-Hill

