



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FISICAS Y MATEMATICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL

**REGISTRO DEL ESTUDIO PIONERO EN CHILE DE AISLADORES  
SISMICOS ELASTOMERICOS PARA APLICACION EN EDIFICIOS DE  
BAJA ALTURA.**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TITULO DE INGENIERO CIVIL**

CLAUDIO DESCOUVIERES VARGAS

PROFESOR GUÍA:  
MAURICIO SARRAZÍN ARELLANO

MIEMBROS DE LA COMISION:  
MARIA OFELIA MORONI  
RUBÉN BOROCHCK KRAUSKOPF

SANTIAGO DE CHILE  
2016

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL  
TITULO DE: Ingeniero Civil

POR: Claudio Descouvieres Vargas

FECHA: 7/11/2016

PROFESOR GUIA: Mauricio Sarrazín Arellano

## **REGISTRO DEL ESTUDIO PIONERO EN CHILE DE AISLADORES SISMICOS ELASTOMERICOS PARA APLICACION EN EDIFICIOS DE BAJA ALTURA**

En la presente Memoria se presenta el registro de la experiencia en el desarrollo de los primeros prototipos de aisladores sísmicos de goma y láminas de acero fabricados en Chile, como parte de un proyecto de aislar sísmicamente un edificio de vivienda económica de cuatro pisos financiado por FONDECYT. La experiencia se desarrolló entre los años 1988 y 1990, adicionalmente como resultado se generaron algunas publicaciones y se aportó la base para las etapas siguientes del estudio.

El estudio comprende el diseño teórico, obtención y pruebas de los materiales constituyentes, fabricación de los aisladores y ensayos de los prototipos. Para esto se utiliza la experiencia internacional y la tecnología disponible entonces en Chile dentro de un marco de bajo costo. Se utiliza la infraestructura de Idiem y del Laboratorio de Vialidad para efectuar los ensayos.

Entre los objetivos principales esta la obtención de una goma de alto amortiguamiento, requisito obligatorio para conformar el sistema de aislación en estudio. Para esto se prueban variadas fórmulas de goma, hasta obtener los valores del amortiguamiento deseados, al mismo tiempo que se verifican otras propiedades también importantes. Para los ensayos efectuados a la goma se requiere fabricar probetas especiales, siendo algunas de ellas originales, ya que no están cubiertas por normativa de ese entonces. Se destaca entre estos últimos el ensayo de corte, que permite a determinar el amortiguamiento y la rigidez de la goma.

Una vez conocidos los materiales constituyentes se efectúa el diseño del aislador utilizando la teoría sobre aislación sísmica disponible. Se adopta la forma cilíndrica como la más adecuada y se plantea como meta que la aplicación de la aislación permitiría al edificio oscilar con un período hasta de dos segundos frente a un sismo. El resultado del diseño define aisladores de 30 cm de diámetro constituidos por 30 capas de goma de 7 mm espesor y 29 placas de acero 1 mm de espesor.

La fabricación de los prototipos se efectuó en una pequeña industria nacional, siendo necesaria la materialización de una matriz especialmente adaptada para este efecto. Se adopta, por ser más económico, el método de compresión directa en vez de la inyección para efectuar la vulcanización. Como resultado de este proceso se fabrican dos aisladores prototipo.

Los aisladores son sometidos en Idiem a ensayos y se verifica su capacidad resistente y como elemento disipador. Para esto es necesario fabricar el dispositivo de ensayo, que permite efectuar todas las pruebas incluso las pruebas dinámicas. Estas última destinadas a determinar el amortiguamiento del aislador.

Se confirma, en ese entonces, que es posible generar en Chile aisladores sísmicos con goma de alto amortiguamiento reforzados con placas metálicas, a bajo costo y de fabricación sencilla. Se confirma que se puede contar con la infraestructura para pasar por todas las etapas que este proceso requiere.

## Tabla de Contenido

<b>1. INTRODUCCION</b> .....	<b>1</b>
<b>2. ANTECEDENTES SOBRE AISLADORES SISMICOS</b> .....	<b>2</b>
<b>3. DEFINICION DE LA CARACTERISTICAS DE LOS AISLADORES</b> .....	<b>3</b>
3.1 Fórmulas para Diseño de Aisladores .....	3
3.2 Factores que Controlan el Diseño.....	4
<b>4. DISEÑO DEL AISLADOR CIRCULAR</b> .....	<b>16</b>
4.1 Determinación del diámetro del aislador.....	16
4.2 Rigidez horizontal requerida del aislador.....	17
4.3 Capacidad de desplazamiento horizontal .....	18
4.4 Carga horizontal máxima (FH).....	18
4.5 Valor del módulo de corte .....	19
4.6 Altura de goma.....	19
4.7 Espesor de plancha de goma (tr) .....	19
4.8 Verificación del factor de forma S .....	19
4.9 Número de capas de goma.....	20
4.10 Espesor láminas de acero (ts).....	20
4.11 Altura total del aislador.....	20
4.12 Verificación de la deformación de corte .....	20
4.13 Verificación placa de acero .....	21
4.14 Verificación de la estabilidad al pandeo por carga vertical .....	22
4.15 Verificación de la estabilidad al volcamiento .....	22
4.16 Reducción de la rigidez por carga vertical .....	23
4.17 Definición geométrica del aislador.....	23
4.18 Elementos complementarios .....	24
4.19 Especificaciones adicionales.....	26
<b>5. OBTENCIÓN DEL ELASTÓMERO Y CARACTERÍSTICAS DE LAS PLACAS METÁLICAS.</b> .....	<b>26</b>
5.1 Placas de Acero.....	27
5.2 Elastómero.....	27
5.3 Prueba de Corte.....	29
5.4 Elección de la goma.....	33
5.4.1 Obtención de la Fórmula Base .....	33
<b>6. FABRICACIÓN DE LOS AISLADORES</b> .....	<b>38</b>
6.1 Procesos de Fabricación.....	39
6.1.1 Diseño y fabricación de la matriz .....	39
6.1.2 Método de Vulcanización y pruebas previas.....	43
6.1.3 Fabricación y resultados del aislador preliminar de Prueba .....	44
6.1.4 Fabricación de los Aisladores Prototipo. ....	46
<b>7. ENSAYOS DE LOS AISLADORES</b> .....	<b>47</b>
7.1 Dispositivos de ensayo.....	47
7.2 Ensayo de los prototipos .....	51
7.2.1 Descripción de los ensayos .....	52
7.3 Resultados de Ensayos de los Prototipos.....	56
<b>8. CONCLUSIONES</b> .....	<b>62</b>
8.1 Conclusiones generales de los fabricación de los aisladores .....	64
8.2 Conclusiones de los ensayos de los aisladores.....	65
<b>9. BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>68</b>
<b>10. ANEXOS</b> .....	<b>69</b>

# 1. INTRODUCCION

El diseño sismorresistente de estructuras se basa en soportar los esfuerzos mediante el refuerzo de elementos de la estructura y la eventual plastificación o ruptura de éstos para liberar la energía transmitida por el sismo.

Una forma de aumentar el período propio de una estructura y por ende reducir las aceleraciones, es aumentar la flexibilidad mediante aislación en la base. Cualquier elemento flexible en la base aísla el edificio de las aceleraciones del suelo, reduciendo considerablemente el daño a personas y equipo en su interior. Sin embargo esta solución debe obligadamente incluir un sistema de amortiguamiento que disipe la energía transmitida, para que las oscilaciones no se amplifiquen provocando el colapso del edificio.

Los estudios efectuados en Japón, Nueva Zelanda, Francia y EEUU, iniciados en la década de 1940, concluían que el elemento más sencillo que aporta flexibilidad era la goma. La capacidad resistente y gran rigidez ante las cargas verticales se obtienen confinando la goma mediante placas metálicas horizontales intercaladas.

Además, se han desarrollado distintos aparatos que aportan amortiguamiento, tales como: amortiguadores viscosos, núcleos de plomo, etc., pero el que se parece más atractivo es la goma de alto amortiguamiento debido a tener bajo costo, facilidad de fabricación y colocación y requerir de mínimo mantenimiento.

En el mundo al momento del inicio de este estudio se había utilizado la aislación en la base en aproximadamente 100 estructuras, de las cuales 31 eran edificios de vivienda, oficinas y laboratorios de investigación, 49 puentes, 6 construcciones asociadas a energía nuclear y 10 edificios industriales.

En Chile sólo se contaba con puentes apoyados sobre soportes de goma destinados a absorber las dilataciones térmicas.

Para introducir la tecnología de la aislación sísmica mediante apoyos de caucho (goma) con láminas de acero se efectuó el estudio que se presenta a continuación entre los años 1988 y 1990.

Básicamente, el estudio consistió en desarrollar los prototipos de aisladores sísmicos que conformarían el sistema de aislación a escala natural de un edificio de vivienda económica de 4 pisos. Comprendió desde el diseño teórico hasta los ensayos de los aisladores, pasando por la obtención de los materiales que lo conforman, pruebas de los materiales, tipos de ensayo y diseño y fabricación de los dispositivos de ensayos.

Como complemento a este estudio se desarrollaron otro 2 estudios en forma simultánea, que son: diseño del edificio a aislar de 4 pisos, autor Alejandro Figueroa (1990) y diseño de un edificio de hormigón armado de cinco pisos destinado a oficinas públicas con aislación en la base, autor Julio Yoma (1990).

El desarrollo de estos trabajos contó con el financiamiento del Fondo Nacional de Ciencia y Tecnología (FONDECYT) y la colaboración de los ministerios de Obras Públicas y de Vivienda y Urbanismo. Cabe destacar el aporte del profesor de la Universidad de California, Berkeley, Dr James Kelly uno de los catedráticos con mayor experiencia sobre aislación sísmica en el mundo.

Los objetivos del estudio fueron:

- Implementar en Chile las teorías aplicables internacionales
- Utilizar la tecnología disponible en Chile para fabricar y probar aisladores sísmicos y sus componentes.
- Establecer una metodología para el diseño teórico de aisladores de goma de alto amortiguamiento.
- Producir los primeros aisladores de goma laminada chilenos. Definir y efectuar los ensayos de prueba, dando las primeras directrices sobre el control de calidad que debe efectuarse en la fabricación de futuros aisladores.
- Proponer y efectuar ensayos a la goma para comprobar su capacidad aisladora.
- Analizar la factibilidad técnica de la producción de aisladores sísmicos de bajo costo en Chile.

## **2. ANTECEDENTES SOBRE AISLADORES SISMICOS**

Al momento de este estudio se habían construido estructuras aisladas sísmicamente, por lo menos en 18 países. Otros ocho países tenían programas de investigación activos en el área de aislación sísmica.

Los países que presentaban un mayor avance en las investigaciones eran EEUU, Japón y Nueva Zelanda.

En cada uno de estos países se desarrolló una tecnología asociada a un tipo distinto de aislación. Por ejemplo, en Japón se adoptó preferentemente aisladores de caucho unidos a barras de acero dulce o amortiguadores viscosos, en EEUU la tendencia apunta a aisladores de caucho con núcleo de plomo y péndulos de fricción, y Malasia a través del Malasian Institute of Rubber con sede en Inglaterra presentó diversos estudios sobre aisladores de caucho de alto amortiguamiento.

Se debe mencionar que paralelamente a los aisladores de caucho existe una gama de aisladores de teflón, rodillos, etc., cuya aplicación principal está destinada a los puentes.

Las ventajas que presenta el aislador de caucho con alto amortiguamiento vienen dadas por su bajo costo, facilidad de construcción, facilidad de montaje y alta efectividad. Debe destacarse, además, que la goma ha comprobado tener una gran durabilidad si se protege adecuadamente. Esto queda demostrado en los soportes de goma para puentes, que al cabo de 50 años se ha revisado y comprobado que mantienen intactas todas sus propiedades.

Investigaciones efectuadas en EEUU han utilizado prototipos de estructuras a escala menor sobre aisladores sísmicos con caucho de alto amortiguamiento. En ellas se comprobó la eficacia en la reducción de las aceleraciones.

Entre las primeras estructuras existentes aisladas sísmicamente se encontraban las siguientes:

-Rehabilitación Edificio de la Ciudad y Condado de Salt Lake City

Estructura de cinco pisos de 80 por 40 metros en planta y torre de reloj de 12 pisos. Se construyó un sistema de aislación que consta de 447 aisladores de plomo-caucho sobre las fundaciones originales. Los aisladores fueron diseñados para soportar aceleraciones de hasta 0.4g.

-Planta de fabricación de simuladores de vuelo Evans y Sutherland

Edificio de cuatro pisos con planta rectangular de 85 por 50 m. Las fuerzas laterales son resistidas por un pórtico de acero y el sistema aislante consta de 98 aisladores.

-Hospital de la Universidad del Sur de California.

Edificio de ocho pisos en Los Angeles con 28.000 m<sup>2</sup> de área en planta y forma tipo rueda de carreta. Las fuerzas laterales son resistidas por un pórtico metálico arriostrado perimetralmente. La estructura fue diseñada para permanecer esencialmente elástica cuando sea sacudida por un sismo de aceleración 0.4g. Para esto se utilizó 149 aisladores.

### **3. DEFINICION DE LA CARACTERISTICAS DE LOS AISLADORES**

#### **3.1 Fórmulas para Diseño de Aisladores**

Para el diseño de aisladores sísmicos circulares se recomienda verificar los parámetros que consideran la capacidad resistente, flexibilidad, desplazamiento horizontal, alta rigidez vertical, estabilidad al volcamiento y estabilidad vertical.

Los requerimientos del aislador limitan sus dimensiones a aquellas que permiten tanto resistir las sollicitaciones como funcionar adecuadamente, deformándose y disipando energía.

Lo anterior quiere decir que no hay posibilidades de asegurar la calidad del aislador mediante el sobredimensionamiento, ya que una u otra exigencia no se satisfaría, por lo que para cada sollicitación existe poca variedad de aisladores que cumplen los requerimientos.

En resumen, se recomienda dar la necesaria flexibilidad actuando sobre las sollicitaciones que soporta el aislador, mediante el cambio del número de éstos que soportan el edificio, o bien reduciendo el nivel de aislación que se espera del sistema aislante.

### 3.2 Factores que Controlan el Diseño

- Capacidad resistente de la goma a compresión.

Una buena aproximación para obtener la superficie de goma que resistirá la carga vertical es considerar la capacidad resistente de la goma a compresión no confinada  $\sigma_g$  cuyo valor fue obtenido de experiencias de fabricantes de goma chilena.

$$\sigma_g = 110 \text{ kg/cm}^2$$

Este valor es bastante conservador, y si agregamos el aumento de resistencia de la goma al confinarla, se puede deducir que este valor como tal podría obviarse en el diseño. Sin embargo la experiencia muestra que aplicando un factor de seguridad FS=2 se obtiene un área resistente que permite también asegurar la estabilidad al pandeo y volcamiento.

- Rigidez horizontal de aislador ( $K_h$ )

Una rigidez del aislador adecuada debe controlar el período de oscilación del edificio frente a un sismo, al mismo tiempo que impide que aparezcan desplazamientos ante cargas de viento.

Como la rigidez del aislador depende de la deformación a la que está sometido, se ha adoptado como rigidez característica a aquella que ocurre con 50% de deformación horizontal máxima D

$$\text{-Por lo tanto } K_h = K_{h50}$$

Este valor característico de la rigidez del aislador es un requisito que resulta del análisis computacional de la estructura a aislar, en el que se itera con distintos valores de rigidez hasta obtener el período adecuado.

Es recomendable asociar la misma rigidez horizontal a todos los aisladores para facilitar tanto el diseño como la fabricación de éstos, pero si la configuración de apoyos y para evitar inducir tensiones en el edificio, es posible definir más de un tipo de aislador. Sin duda, como recomendación económica se debe procurar una proporción adecuada de cada uno de ellos para que no resulte fabricar un número muy pequeño de aisladores de un tipo.

Experimentalmente se ha visto que la rigidez horizontal de un aislador depende no sólo de la deformación horizontal a la que está sometido, sino que también se produce una reducción de ésta al cargar al aislador verticalmente, un análisis general de la reducción se indica en el punto 4.16

- Desplazamiento horizontal máximo

Como se ha descrito el sistema aislante presenta una gran flexibilidad horizontal ante cargas sísmicas, lo que provoca que éste se deforme horizontalmente varios órdenes de magnitud más que las deformaciones que pueden sufrir cualquier otro elemento estructural.

Por lo tanto el aislador debe ser capaz de deformarse repetidas veces sin sufrir deterioro ni volcarse y sin que la aislación cese debido a aumento brusco de la rigidez de este apoyo provocado por un tope lateral o una falla violenta.

Un requisito para el diseño del aislador es la deformación horizontal máxima que debe alcanzar en los ejes principales sin que ocurra lo mencionado en el párrafo anterior. Análisis con sismos chilenos arrojan valores de desplazamiento horizontal del orden de 16 cm. Pero se ha constatado que la fórmula recomendada entonces por el " Structural Engineers Association of Northern California" (SEAOC) en su Tentative Seismic Isolation Design Requirements es más conservadora y permite aplicar estos valores en el diseño de aisladores, dependiendo solamente del período de retorno con aislación sísmica de la estructura.

En la actualidad ya se ha implementado un Norma Chilena que define este desplazamiento. Por lo tanto se indica a continuación la metodología utilizada al momento del estudio y que definió el diseño de los prototipos.

Se asociaba la caracterización hecha para sismos en EEUU efectuando una analogía con respecto a tipo de suelo, ubicación y sismos chilenos

La relación dice que el desplazamiento horizontal máximo D es:

$$D = \frac{10 \cdot Z \cdot N \cdot S \cdot T}{B}$$

Esta fórmula es el resultado del análisis del espectro de aceleraciones de una estructura ubicada en un lugar definido de EEUU y con un valor del amortiguamiento de 5% del amortiguamiento crítico.

Coeficientes:

Z: Coeficiente indicador de zona puede tomar valores 0,3 o 0,4 siendo la zona con Z= 0,4 la zona próxima a la falla geológica.

N: Coeficiente numérico que relaciona la proximidad de la estructura a la falla activa.



N		
d >10km.	10km ≥ d >5km	d ≤5km
1.0	1.2	1.5

d : distancia a la falla activa

S: Factor de suelo: que puede tomar valores 1.0, 1.5, 2.0 y 2.7 este coeficiente se utiliza para compatibilizar el tipo de suelo (S1, S2, S3) con el espectro de respuesta del ATC-3.

T: Periodo de la estructura considerando el sistema de aislación.

B: Coeficiente que considera el sistema aislante con un amortiguamiento distinto a 5%. Este valor de amortiguamiento debe determinarse mediante ensayos tanto de la goma como del aislador.

Amortiguamiento	≤ 2	5	10	20	30	40	> 50
Coef. B	0.8	1.0	1.2	1.5	1.7	1.9	2.0

-. Carga horizontal máxima (FH)

Se definirá como carga horizontal máxima sobre cada aislador a aquella capaz de provocar una deformación horizontal igual a D; siendo D el desplazamiento horizontal máximo descrito en el punto anterior.

La forma más sencilla de conocer esta carga es aplicar la relación

$$FH = K_h \times D \quad \text{en que } K_h = \text{es la rigidez horizontal del aislador.}$$

La carga horizontal máxima es también cuantificable mediante algún ensayo a escala natural, siendo también una forma de someter al aislador a condiciones extremas. La descripción del ensayo se muestra en el capítulo 7.2.1

-. Altura de goma

En el aislador, la fase goma es la que sufre la totalidad de la deformación horizontal. Al considerar a la goma como un material elástico se puede aplicar la relación entre la deformación de corte y la tensión unitaria como sigue.

$$\sigma_c = \gamma_c G$$

en que  $\gamma_c$  : deformación de corte unitaria

G : Módulo de Corte

$\sigma_c$  : Tensión de corte

Además 
$$\sigma_c = \frac{T}{A}$$

en que T : tensión de corte

A: sección transversal

$$\gamma_c = \frac{d}{t}$$

en que d: deformación de corte

t: Altura de goma

Finalmente resulta

$$\frac{T}{d} = \frac{G \cdot A}{t} \quad \text{y como} \quad \frac{T}{d} = K_h$$

$$K_h = \frac{G \cdot A}{t}$$

$$t = \frac{G \cdot A}{K_h}$$

En el aislador, t representa la suma de los espesores de cojinetes de goma, independientes de la placa de acero que las separa.

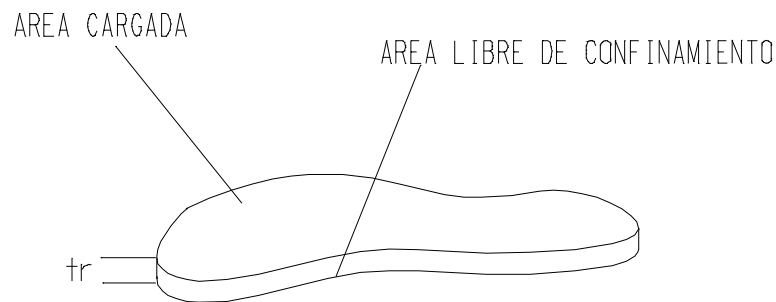
El valor del módulo de corte G es posible de determinar a través de ensayos hechos a probetas de goma. El test, denominado Ensayo de Corte, y que se describe en el capítulo 5.3 proporciona el

valor de G y muestra cómo varía este valor según la deformación máxima que se le aplica a la goma.

Para efectos de diseño y análisis se recomienda adoptar el valor al módulo de corte G obtenido con deformaciones de corte de 50% denominado  $G_{50}$

- Espesor de cada plancha de goma

Se define como Factor de Forma, S al cuociente entre el área cargada de cada cojinete y el área libre de confinamiento.



Para el caso de aisladores circulares, con almohadillas de espesor  $t_r$  y diámetro d se tiene:

$$\text{Area cargada} \quad : \quad \frac{\pi * d^2}{4}$$

$$\text{Area libre} \quad : \quad t_r * \pi * d$$

Por lo tanto :

$$S = \frac{d}{4 * t_r}$$

Por otra parte, si se considera los siguientes supuestos;

- Las secciones planas permanecen planas
- La goma tiene baja compresibilidad, (se puede considerar nula).
- Una línea vertical conforma una parábola después de la deformación.

Se puede establecer la siguiente relación según el sistema.

A: superficie almohadilla

$$\nabla^2 p = \frac{-12 * G * \epsilon_c}{t^2}$$

$$P = \int_A p(x,y) dx dy$$

Siendo  $p$  : componente de la tensión de compresión vertical del cojinete.

$\epsilon_c$  : deformación unitaria promedio sobre la sección A.

$P$  : presión total sobre la superficie A.

Para el caso de almohadilla circular de radio R se tiene

$$\nabla^2 p = \frac{-12 * G * \epsilon_c}{t^2}$$

$$\frac{\delta^2 p}{\delta r^2} + \frac{1}{r} * \frac{\delta p}{\delta r} = \frac{-12 * G * \epsilon_c}{t^2} \quad P = 0 \text{ en } r = R$$

$$\frac{1}{r} * \frac{\delta}{\delta r} \left[ \frac{\delta(r p)}{\delta r} \right] = \frac{-12 * G * \epsilon_c}{t^2}$$

Resulta:

$$p = \frac{3G}{t^2} * (R^2 - r^2) * \epsilon_c$$

Para obtener la Presión total

$$P = 2 \pi \int_0^R \frac{3G}{t^2} (R^2 - r^2) r dr * \epsilon_c$$

$$P = 2 \pi \frac{3G R^4}{t^2 4} \epsilon_c \quad A = \pi \times R^2$$

Por otro lado  $P = E_c * A * \epsilon_c$   $E_c$  : Módulo de compresión del cojinete.

Igualando.

$$E_c * \epsilon_c = \frac{3}{2} \frac{G R^2}{t^2} \epsilon_c$$

$$E_c = 6 \frac{G R^2}{2 t^2} \quad S = \frac{R}{2t} : \text{Factor de forma cojinete circular}$$

Resulta

$$E_c = 6 G S^2$$

Se recuerda que por definición

$$K_h = \frac{G A}{t} \quad y \quad K_v = \frac{E_c A}{t}$$

Entonces

$$\left( \frac{f_v}{f_h} \right)^2 = \frac{K_v}{K_h} = 6 S^2$$

$$\frac{f_v}{f_h} = \sqrt{6} S$$

$f_v$ ; frecuencia oscilatoria vertical.  
 $f_h$ ; frecuencia oscilatoria horizontal

La relación entre las frecuencias es proporcional al factor de forma S para un aislador circular.

Como se ha descrito anteriormente, el grado de aislación se refleja en la disminución de la frecuencia horizontal ( $f_h$ ), sin sobrepasar el límite que provoca que la aislación produzca un impacto negativo a la estructura.

Una aislación efectiva se obtiene cuando la frecuencia horizontal supera la frecuencia vertical en más de 20 veces, para este caso se utilizó 26 veces.

$$\frac{f_v}{f_h} = 26$$

$$\text{Luego } \sqrt[6]{S} = 26 \quad \text{con } S = \frac{R}{2 t_r}$$

De la igualdad anterior se puede determinar el espesor del cojinete circular ( $t_r$ ) que provoca un grado de aislación adecuada.

Cabe recordar que la teoría anterior es aplicable para factores de forma en el rango siguiente.

$$5 \leq S \leq 10$$

- Espesor de láminas de acero

El esfuerzo de tracción en las placas circulares entre dos almohadillas de goma sometidas a compresión es proporcional al diámetro de las placas según lo muestra el siguiente análisis:

Asumiendo que la goma es incompresible y las líneas verticales se deforman según una parábola se tiene:

$$v = 3r (1 - 4 y^2 / t_r^2) / 4 t_r$$

La tensión de corte en la superficie del plato de acero es:

$$\sigma_r = G \frac{\delta u}{\delta y}$$

Se evalúa en  $y = \frac{t_r}{2}$

$$\sigma_r = \frac{3 Gr}{t_r^2}$$

Considerando este esfuerzo por ambos lados de la placa y que  $\underline{D} = \underline{\epsilon}_c$  se obtiene la fuerza por unidad de volumen en la placa de acero.

$$K_r = \frac{r}{t_s} = \frac{6 G r}{t_s * t_r} \epsilon_c \quad t_s: \text{ espesor de la placa de acero}$$

Timoshenko plantea un problema análogo.

$$\frac{\delta \sigma_r}{\delta r} + \frac{(\sigma_r - \sigma_\theta)}{r} + K_r = 0$$

Cuya solución es

$$\sigma_r = C + \frac{C_1}{r^2} - (3+\nu) \frac{K_r^2}{8} \quad \nu : \text{ módulo de Poisson de la placa metálica.}$$

$$\sigma_\theta = C - \frac{C_1}{r^2} - (1+3\nu) \frac{K_r^2}{8}$$

Asumiendo que no hay cargas aplicadas en la periferia del disco de radio R y evaluando en  $r = 0$  en que las tensiones son mayores,

$$\sigma_r = \sigma_\theta = (3+\nu) \frac{K_r^2}{8}$$

Sustituyendo el valor de  $K_r$  se tiene

$$\sigma_r = \sigma_\theta = \frac{(3+\nu)}{4} \frac{6 G r^2}{t_s t_r} * \epsilon_c$$

Además del análisis anterior se dedujo que  $\epsilon_c = 6 G S^2$  por lo tanto:

$$\sigma_c = 6 G S^2 \epsilon_c \quad S: \text{ factor de forma}$$

Sustituyendo y suponiendo que  $\sigma_r$  y  $\sigma_\theta$  toman el mayor valor de tracción que puede adoptar la placa de acero ( $\sigma_m$ )

$$\sigma_c = \frac{2\sigma_m t_s}{(3+\nu) t_r}$$

Esta igualdad permite verificar la placa de acero sustituyendo  $\sigma_m$  por la tensión de fluencia del acero y obteniendo la tensión de compresión máxima de la goma que soporta la placa de acero.

Esta tensión se compara con la tensión de trabajo de la goma ( $\sigma_t$ ) siendo un factor de seguridad FS=2 el recomendable.

$$\frac{\sigma_c}{\sigma_t} \geq 2 \quad \text{con} \quad \sigma_t = \frac{F_v}{A} \quad F_v : \text{Carga vertical sobre el aislador.}$$

- Verificación de la deformación de corte.

La deformación máxima de corte que afecta a la goma es aquella producida por la deformación horizontal que sufre el aislador ( $\gamma_s$ ), más la contribución a la deformación de corte producida por la compresión a la que está sometida.

El primer componente ( $\gamma_s$ ) se obtiene del desplazamiento horizontal máximo D.

$$\gamma_s = \frac{D}{t} \quad \gamma_s : \text{Deformación de corte producto del desplazamiento horizontal.}$$

t : Altura total de goma.

El segundo componente ( $\gamma_c$ ) deformación de corte producida por la compresión a la que está sometida, se relaciona con el esfuerzo de corte que se concentra en la arista de borde externo del cojinete de goma sometida a compresión.

$$\gamma_{rz} = \frac{6 G r Z_c \epsilon_c}{t_r^2}$$



Evaluando en  $r = R$  y calculando la deformación se tiene:

$$\gamma_{rz} = \frac{3 G R t \epsilon_c}{t_r^2}$$

$$\gamma_c = 6 S \epsilon_c$$

$\epsilon_c$  ; deformación por compresión promedio.-

$$\epsilon_c = \frac{\Delta}{t}$$

$\Delta$  : deformación vertical total.

Para evaluar la deformación  $\Delta$  se puede recurrir a las relaciones siguientes:

$$\Delta = \frac{F_v}{K_v}$$

$F_v$  : Carga vertical total

$K_v$  : Rigidez vertical

Además;

$$K_v = \frac{E_c A}{t}$$

$E_c$ : Módulo de compresión cuyo valor deducido anteriormente es:

$$E_c = 6 G S^2$$

Una vez obtenidos los dos componentes de la deformación de corte total ésta no debe sobrepasar el 50% de la deformación admisible por elongación de la goma.

$$\gamma_s + \gamma_c \leq 0,5 * \epsilon$$

$\epsilon$  : Elongación de la goma hasta la rotura

El valor de  $\epsilon$  es cuantificable mediante ensayos de elongación descritos en el capítulo.5.2 b) y cuyo valor mínimo es 500%

- Estabilidad Vertical (Pandeo vertical)

Al aplicar una carga vertical sobre el aislador, se puede afectar la estabilidad vertical, haciendo que el aislador salga de su eje vertical, produciendo la falla por pandeo.

Para evitar lo anterior se puede evaluar la carga crítica ( $P_{crit}$ ) que provoca el pandeo del aislador y, mediante un factor de seguridad adecuado, limitar el valor de la carga vertical máxima de trabajo del aislador.

Una manera de evaluar  $P_{crit}$  es la dada por la fórmula de Euler

$$P_{crit} = \sqrt{P_s \cdot PE}$$

con

$$P_s = \frac{G A}{t_r} \cdot t$$

$t$  : altura total goma

$A$  : sección transversal

$$A = \pi \cdot d^2 / 4$$

$t_r$  : espesor cojinete de goma

$$PE = \frac{\pi^2 (EI)_{eff}}{t^2}$$

$$(EI)_{eff} = \frac{1}{3} E_c \cdot I$$

con  $I = D^4 / 64$  para aislador circular.

$$y \quad E_c = 6 \cdot G \cdot S^2$$

Reemplazando en  $P_{crit}$  resulta:

$$P_{crit} = \sqrt{\left( \frac{G^2 \pi^4 d^8 \cdot 2}{256 t_r^2 t^2} \right)} = \frac{3,5}{16} \frac{G d^4}{t \cdot t_r}$$

Aceptando como mínimo un factor de seguridad  $FS=2$ , para la estabilidad vertical se tiene:

$$\frac{P_{crit}}{F_v} = FS \geq 2$$

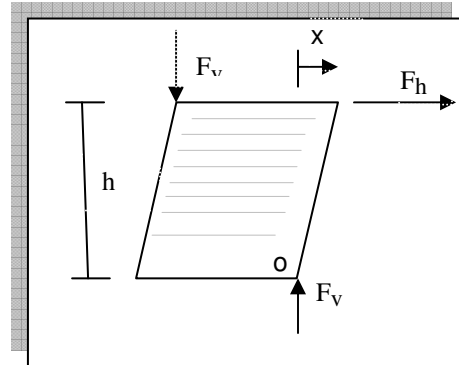
$F_v$  : carga vertical de diseño

Finalmente, la relación que verifica la estabilidad vertical de un aislador circular es la siguiente.

$$\frac{3,5}{16} \cdot \frac{G d^4}{t \cdot t_r \cdot F_v} \geq 2$$

- Estabilidad al volcamiento

La estabilidad al volcamiento para grandes deformaciones horizontales, como por ejemplo para la deformación máxima  $D$  puede evaluarse según el siguiente diagrama.



$F_v$  : carga vertical de diseño

$F_h$  : carga horizontal

Haciendo equilibrio de momentos en el punto  $O$  se puede ver que el volcamiento ocurre cuando:

$$F_v * (d - x) = h * K_h * x$$

$d$ : Diámetro del aislador

$h$ : altura total (incluyendo placas de acero)

Luego la deformación previa al volcamiento resulta:

$$X_{\max} = \frac{d \cdot F_v}{K_h \cdot h + F_v}$$

Sólo basta que  $D \leq X_{\max}$  para que exista una seguridad suficiente para evitar el volcamiento. Se puede apreciar que la ecuación de equilibrio considera situaciones demasiado extremas, puesto que los apoyos superiores e inferiores del aislador lo confinan impidiendo el volcamiento, de ahí surge el hecho de no aplicar un factor de seguridad adicional.

## 4. DISEÑO DEL AISLADOR CIRCULAR

Dados los requerimientos de aislación del edificio a aislar, analizados en el estudio complementario, se efectuó el diseño del aislador.

### 4.1 Determinación del diámetro del aislador

Este se determina a partir de la resistencia de la goma a la compresión no confinada  $\sigma_a$  y de la Carga Vertical máxima de diseño  $F_v$ , este último valor resultante del modelamiento del edificio

$$F_v = 30 \text{ ton}$$

La Tensión admisible de la goma a compresión no confinada

$$\sigma_a = 110 \text{ kg/cm}^2$$

Si se considera un factor de seguridad FS=2;

$$\sigma_a = FS \frac{F_v}{A} \Rightarrow d = 26 \text{ cm}$$

A

A: área transversal del aislador

d: diámetro aislador

Se usará  $d = 30 \text{ cm}$ .

#### 4.2 Rigidez horizontal requerida del aislador

El sistema edificio-aislador se puede considerar como una estructura de un grado de libertad, cuyo período queda dado por la expresión

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{M}{K_h}} \quad M = \frac{F_v}{g}$$

El Período de oscilación requerido para el sistema edificio-aislador es de,

$$T = 2,0 \text{ Seg.}$$

Si se considera sobre cada aislador una carga vertical  $F_v = 30 \text{ ton}$ ,

Se obtiene  $K_h = 370 \text{ kg/cm}$ .

- Rigidez horizontal del sistema aisladores - edificio.

Como la carga vertical no tiene su valor máximo sobre cada aislador, se realiza un análisis tridimensional del edificio representando los aisladores por resortes horizontales, la rigidez que requieren estos resortes es de 160 kg/cm para tener igual período (2 seg).

Además, considerando la reducción de rigidez por carga vertical se utilizará  $K_h = 200 \text{ kg/cm}$  como tentativa para obtener rigidez  $K_h = 160 \text{ Kg/cm}$ .

Por lo tanto, la rigidez requerida para el aislador circular:

$$K_h = 200 \text{ kg/cm}$$

### 4.3 Capacidad de desplazamiento horizontal

Según Norma Americana (SEAOC 89). Los aisladores deben diseñarse para un desplazamiento horizontal máximo (D) dado por la expresión:

$$D = \frac{10 * Z * N * S * T}{B}$$

Para al edificio a ubicar en Santiago se tiene, según capítulo 3.2 y porcentaje de amortiguamiento crítico 10% :

$$Z = 0,3$$

$$N = 1,0$$

$$S = 1,5$$

$$T = 2,0$$

$$B = 1,2$$

Se obtiene  $D = 7,5 \text{ " } = 19 \text{ cm}$ .

### 4.4 Carga horizontal máxima ( FH)

La carga horizontal máxima está expresada por la relación.

$$FH = K_h \times D$$

En este caso se utiliza  $K_h = 200 \text{ kg/cm}$  suponiendo que no hay reducción de rigidez

Resulta,

$$FH = 4,0 \text{ ton}$$

#### 4.5 Valor del módulo de corte.

Un valor de rigidez horizontal bajo, necesita que el valor del módulo de corte G sea bajo para deformaciones grandes.

Se utilizará un valor del módulo de corte  $G_{50} = 6 \text{ Kg/cm}^2$  (para un 50% de deformación horizontal.)

#### 4.6 Altura de goma

Se determina de la relación del capítulo 3.2, Altura de goma.

$$t = \frac{G^* A}{K_h} \quad t = \text{altura total de goma}$$

Como  $K_h = 200 \text{ kg/cm}$

resulta,  $t = 21,2 \text{ cm.}$

#### 4.7 Espesor de plancha de goma ( $t_r$ )

Según el acápite 3.2 se recomienda;

$$\sqrt[6]{S} = 26 \quad \text{con } S = \frac{R}{2 t_r} = \frac{d}{4 t_r}$$

Se obtiene

$$t_r = 0,7 \text{ cm.}$$

#### 4.8 Verificación del factor de forma S

Rango válido  $5 \leq S \leq 10$

En este caso se tiene  $S = \frac{d}{4 t_r} = 10,7$  se puede considerar dentro del rango

#### 4.9 Número de capas de goma

$$t = 21,2$$

$$t_r = 0,7$$

$$n = \frac{t}{t_r} = 30 \quad t \text{ real} = 21,0 \text{ cm.}$$

#### 4.10 Espesor láminas de acero (ts).

Considerando la disponibilidad en el mercado de acero calidad A 37 - 24 ES se dispuso utilizar láminas de 1,0 mm.

$$t_s = 0,1 \text{ cm.}$$

#### 4.11 Altura total del aislador

Sea h altura útil formado por n placas de goma y n-1 láminas de acero

$$h = n * t_r * (n-1) * t_s$$

$$h = 23,9 \text{ cm.}$$

#### 4.12 Verificación de la deformación de corte

Tal como se muestra en el capítulo 3.2, se tiene:

$$\gamma_s (\%) = \frac{D * 100}{t} \quad \text{En que } \gamma_s : \text{ Deformación de corte producto del desplazamiento horizontal}$$

D: desplazamiento horizontal máximo  
t: altura total de goma

Resulta:  $\gamma_s = 90.5 \%$

$\gamma_c = 6 \cdot S \cdot \epsilon_c$       En que  $\gamma_c$ : deformación de corte producida por la compresión  
 S: factor de forma  
 $\epsilon_c$ : deformación por compresión unitaria promedio.

$\epsilon_c = \frac{\Delta}{t}$        $\Delta$  : Deformación vertical

$\Delta = \frac{Fv}{Kv}$        $Kv = \frac{E_c \cdot A}{t}$        $E_c$ : módulo de elasticidad de la goma.  
 A: area transversal

$E_c = 6 G S^2$

$S = 10,7$  y  $G = 6 \text{ Kg/cm}^2$

Resulta  $E_c = 4122 \text{ kg/cm}^2$  ;  $Kv = 13.876 \text{ kg/cm}$ ;  $\Delta = 0,22 \text{ cm}$ .

$\epsilon_c = 1,1\%$       por lo tanto,  $\gamma_c = 68\%$

- La verificación arroja

$\gamma_s + \gamma_c = 159\% < 250\%$

#### 4.13 Verificación placa de acero

Según lo deducido en el capítulo 3.2 se tiene:

$\sigma_c = \frac{2\sigma_m \cdot t_s}{(3+v) t_r}$

$\sigma_c$ : tensión admisible

$t_s$ : espesor lámina de acero (1 mm)

$\sigma_m$  = tensión admisible del acero a la tracción (2400 kg/cm<sup>2</sup>)

$t_r$  : espesor de la capa de goma.

$v$  : módulo de Poisson de la placa metálica

A: area transversal de la placa de acero



Resulta

$$\sigma_c = 118 \text{ kg/cm}^2$$

Para efectuar la comparación con la tensión de trabajo es de la goma ( $\sigma_t$ ):

$$\sigma_t = \frac{F_v}{A_l} \quad F_v : \text{Carga vertical sobre el aislador}$$

$$\sigma_t = 42,5 \text{ kg/cm}^2$$

Por lo tanto si:

$$FS = \frac{\sigma_c}{\sigma_t} \quad \text{Fs: factor de seguridad}$$

resulta

$$FS = 2,7 > 2, \text{ Cumple}$$

#### 4.14 Verificación de la estabilidad al pandeo por carga vertical

Según lo indicado en capítulo 3.2 se tiene un factor de seguridad que queda definido por:

$$FS = \frac{3,5}{16} * \frac{G d^4}{t t_r F_v}$$

Resulta:

$$FS = 2,11 > 2,0$$

#### 4.15 Verificación de la estabilidad al volcamiento

Según lo determinado en el capítulo 3.2

$$X_{\max} = \frac{d F_v}{K_h h + F_v}$$

$$FS = \frac{X_{\max}}{D} \quad D: \text{desplazamiento horizontal máximo}$$

Resulta  $X_{\max} = 22,6 \text{ cm}$

$$FS = 1,2 > 1$$

#### **4.16 Reducción de la rigidez por carga vertical**

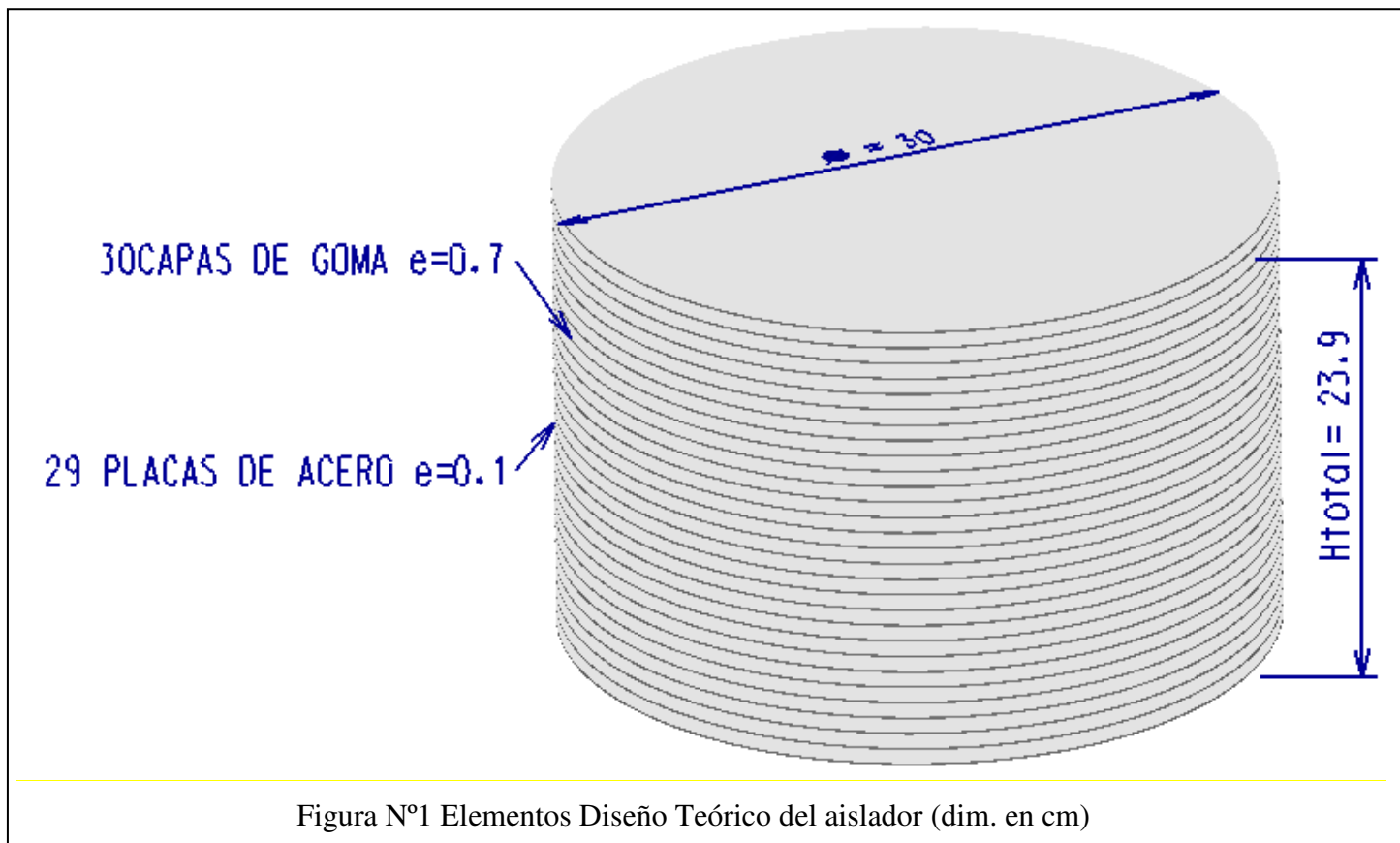
Las consideraciones de influencia de la carga vertical sobre la rigidez indican que reducción de rigidez puede llegar hasta un 15% al aplicar la carga vertical máxima de 30 ton. Por lo tanto considera un rigidez requerida (sin carga vertical) de  $200 \text{ kg/cm}^2$  podrá acercarse a la rigidez solicitada al aislador indicada en capítulo 4.2

Como análisis final, si la reducción de rigidez no ocurriese, la efectividad de la aislación requerida sería de alcanzar período de oscilación  $T = 1.8 \text{ seg}$ , generando un grado de aislación igualmente efectivo.

#### **4.17 Definición geométrica del aislador**

En resumen se tiene:	Diámetro del aislador	$d = 30 \text{ cm}$ .
	Altura total de goma	$t = 21 \text{ cm}$ .
	Espesor planchas de goma	$t_r = 0,7 \text{ cm}$ .
	Espesor láminas de acero	$t_s = 0,1 \text{ cm}$ .
	Altura total del aislador	$h = 23,9 \text{ cm}$ .

La figura N°1 muestra la fase de diseño teórico del aislador.



#### 4.18 Elementos complementarios

Para la ligazón entre el aislador y la estructura a aislar tanto como a las fundaciones se usan placas de acero inferior y superior de 2 cm. de espesor, circulares, del mismo diámetro que las capas de goma, dando al aislador suficiente rigidez como para que las deformaciones se concentren en la fase goma.

Además se dispondrá un recubrimiento de goma de 3 mm. en el perímetro de las láminas de acero, con lo cual el diámetro externo del aislador resulta de 30,6 cm.

Por lo tanto el diámetro de las placas de goma que deberán embeber las láminas de acero resultan de 30,6 cm. al igual que las placas de apoyo superior e inferior. El diámetro de las láminas de acero permanece en 30 cm.

Como conector entre placas de acero del aislador a la estructura y fundaciones o a la máquina de ensayos resulta conveniente utilizar pasadores de 2,5 cm. de diámetro.

La geometría final del aislador se muestra en la fig. N°2 y N°3 siendo aquellas las dimensiones del prototipo del aislador que fue fabricado y sometido a ensayos.

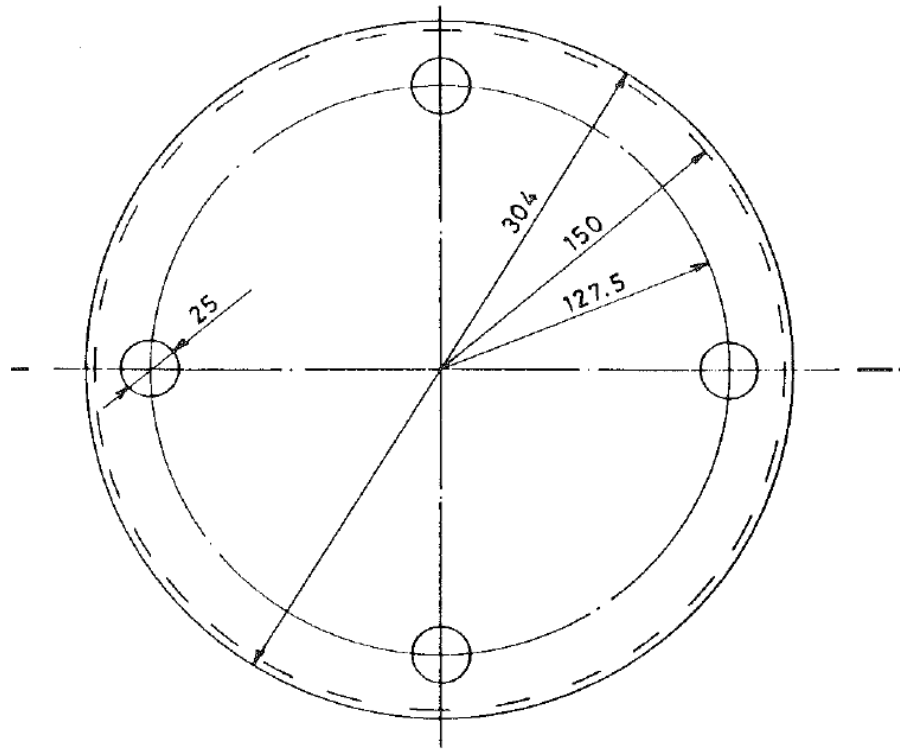


Figura N°2 Planta del aislador

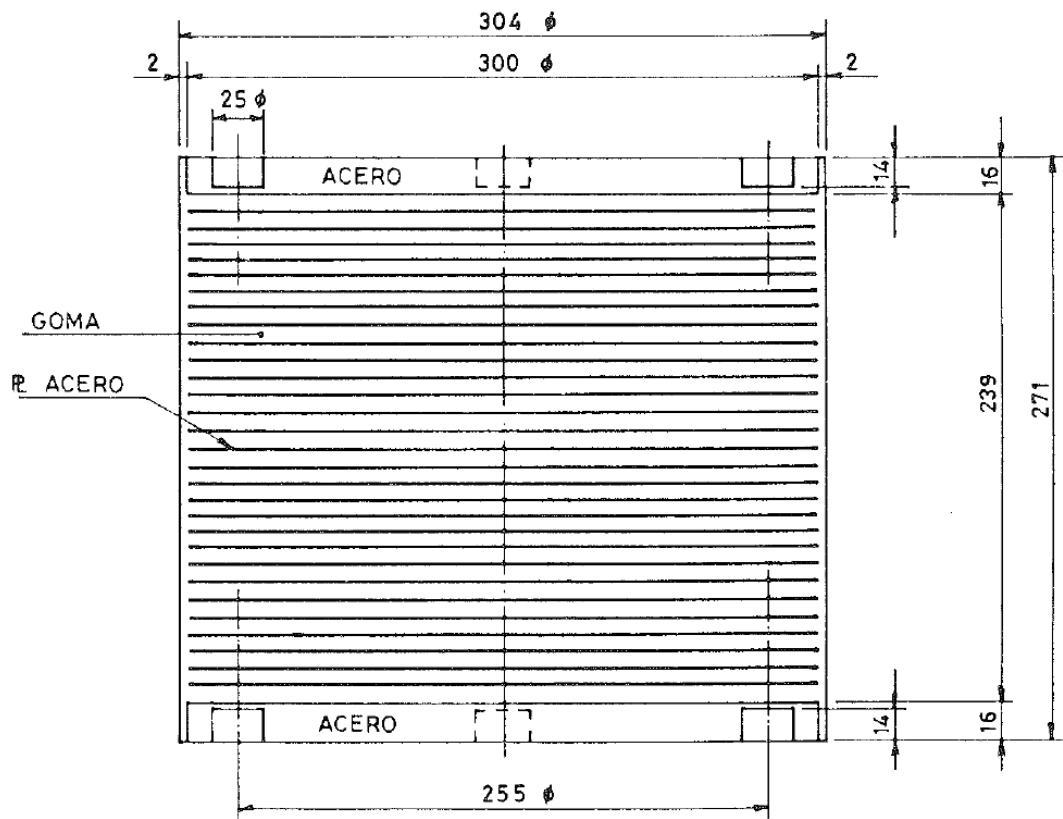


Figura N°3 Sección del aislador

#### 4.19 Especificaciones adicionales.

Acero calidad A 37-24 ES, siendo el acero comercial CAP la calidad adecuada y con mayor disponibilidad. Cabe mencionar que la condición de estar embebido en goma le otorga una condición muy favorable para evitar la corrosión.

Goma con requerimientos descritos en Cap. 5.2 y con un módulo de Corte a 50% de deformación horizontal, dado por la prueba de corte descrita en Cap 5.3;  $G_{50} = 6 \text{ kg/cm}^2$

#### 5. OBTENCIÓN DEL ELASTÓMERO Y CARACTERÍSTICAS DE LAS PLACAS METÁLICAS.

Las condiciones fundamentales para desarrollar un sistema aislante adecuado son la calidad de los materiales y una ligazón óptima entre ellos. Las placas metálicas garantizan el confinamiento necesario de la goma ante las cargas verticales, por lo que deben tener una resistencia a la

tracción adecuada. Pero la fase más importante la representa la goma, cuyas características condicionan absolutamente la geometría del aislador. La goma aporta la flexibilidad del aislador al mismo tiempo que disipa la energía entregada a la estructura aislada. De esta forma es en la goma donde se concentran casi la totalidad de los requerimientos y condiciones de los materiales.

La ligazón entre la goma (elastómero) y el acero depende de la calidad de la vulcanización goma - acero, por lo que se exige una serie de tratamientos superficiales a las placas metálicas y aditivos a la goma. Este proceso de curado que afecta al caucho natural en presencia de azufre genera ligazones más resistentes entre las moléculas del caucho, al mismo tiempo que aumenta la capacidad de adherencia hacia otros elementos, como en este caso al acero.

A continuación se hace una descripción de las especificaciones de los materiales para luego, en la segunda parte, mostrar los resultados que llevaron a la obtención del elastómero que se utilizó en los aisladores construidos.

## **5.1 Placas de Acero**

Las especificaciones internacionales recomiendan la utilización de placas de acero tanto intermedias como superiores e inferiores conformes a la norma ASTM A36 o A570, siendo el acero A37-24 el más cercano al especificado. Cabe mencionar que para las planchas de acero "comercial" producido por CAP de espesores menores que 2 mm, la calidad A37-24ES no está garantizada. Por lo tanto, para las placas superior e inferior se utilizará acero calidad A37.24 y para las placas intermedias, cuyo espesor es 1 mm, acero comercial CAP, con el debido factor de seguridad.

Como exigencia adicional los espesores de las placas deben ser uniformes y todas las superficies deben ser arenadas e inmediatamente pintadas con anticorrosivo.

Las superficies que deberán vulcanizarse a la goma, además deberán ser cubiertas con un aditivo especial, para lograr la adherencia goma - acero adecuada.

## **5.2 Elastómero**

- Exigencias sobre el elastómero

El elastómero debe ser caucho natural por ser un componente de alta calidad y debe someterse a diferentes ensayos de modo de satisfacer los siguientes requisitos:

a).- Dureza :  $60 \pm 5$

La dureza es la resistencia a la penetración y se determina midiendo la presión necesaria para introducir en la goma una aguja. Este ensayo debe ceñirse a la Norma ASTM D2240

b).- Elongación hasta la rotura: 500%

Para verificar, se somete una probeta de espesor de 2.0 mm a elongación hasta lograr que ésta se rompa. Se mide la deformación que alcanza y se compara con su longitud inicial. El ensayo debe ceñirse a la Norma ASTM D412

c).- Tensión hasta la rotura por elongación. 170 Kg/cm<sup>2</sup>

El ensayo, al igual que la elongación hasta la rotura, está normalizada por ASTM D412. Además se obtiene a qué tensión de tracción se produce la rotura por elongación.

d).- Deformación remanente por compresión: 13% a 19%

El ensayo debe hacerse según la norma ASTM D395 método B. Consiste en mantener una probeta de goma deformada por compresión por un período de 22 horas a una temperatura de 70 C°. Posteriormente la probeta se relaja y se mide el espesor para compararlo con el inicial.

e).- Resistencia al ozono

Una forma de acelerar el envejecimiento de la goma es someterla a un ambiente con alta concentración de ozono el mismo tiempo que se le aplica una tensión de tracción.

Durante el ensayo debe revisarse la superficie de las probetas con lente de aumento, cada 2 horas, detectando la aparición de grietas.

Este ensayo debe hacerse según la Nch 1862-of 81.

f).- Resistencia al calor

Debe efectuarse según norma ASTM D573

Se mantiene una probeta de goma a una temperatura elevada por un período de tiempo determinado. Luego se cuantifica el deterioro de las propiedades iniciales

g).- Deformación remanente a baja temperatura 13% a 19%

Debe hacerse según norma ASTM D1229

El ensayo es similar al descrito en punto d), sólo que en este caso la probeta se somete a baja temperatura (-40 C°)

h).- Adherencia goma - metal: 8 Kg/cm. como mínimo

Esta prueba está orientada a verificar la calidad de los dos materiales que están asociados a la unión goma - metal, estos son, aditivo de la goma que provoca la vulcanización y el " pegamento" que cubre las superficies metálicas.

El ensayo consiste en medir la fuerza necesaria para despegar la goma del metal, al mismo tiempo que muestra el tipo de falla, que pueden ser del tipo: adherencia, rotura de la goma, rotura superficie metálica. Como requisito adicional debe verificarse que la falla no sea por adherencia cuando se está muy cerca de la fuerza mínima (8 Kg/cm).

El procedimiento debe ceñirse a la norma ASTM D429 método B.

Los ensayos e), f), y g) son optativos si se mantiene controlado el ambiente al que están sometidos los aisladores y se toman las debidas precauciones. En este caso, los aisladores no estarán expuestos a la luz y no sufrirán temperaturas extremas ya que se ubicarán en la zona central de Chile. A esto debe agregarse la experiencia mundial en cuanto al deterioro de las gomas de apoyo de puentes, en que se ha verificado el buen estado de gomas hasta por 50 años.

### **5.3 Prueba de Corte**

Como se ha descrito, este tipo de aisladores de goma laminada a fabricar se caracteriza por requerir un alto porcentaje de amortiguamiento, que está asociado al único elemento que aporta amortiguamiento, la goma. Por lo tanto, es necesario verificar si ésta cumple con dicha propiedad.

Además, el aislador debe satisfacer requerimientos asociados a la rigidez horizontal, tanto para pequeñas deformaciones como para la deformación media (50%). Esto se logra mediante una geometría del aislador y un módulo de corte G de la goma adecuados.

Para cuantificar en la goma los dos requerimientos anteriores, esto es, amortiguamiento y módulo de corte se diseñó un ensayo denominado " Prueba de Corte". En ella se somete una probeta de goma a ciclos de deformación de corte midiendo la carga aplicada.

Los ensayos de corte se realizaron en el Laboratorio de Vialidad en la máquina de ensayos MTS comandado por un microcomputador Digital PDP 11.

Esta máquina de ensayos tenía la capacidad de efectuar ensayos dinámicos cíclicos, y aplicar carga tanto en compresión como tracción. Consistía principalmente en un microcomputador que comanda, mediante un programa, a un actuador unido a una celda de carga. Este envía las lecturas en forma digitalizada de vuelta al computador. La información queda registrada en un archivo y/o puede verse graficada instantáneamente en una pantalla tipo osciloscopio. Es fácilmente programable en lenguaje similar al Basic y la precisión de los resultados es bastante alta, pudiendo tomar hasta 25 datos por segundo.

Para realizar el ensayo fue necesario diseñar una mordaza de aceros para fijar la probeta al actuador.

#### **- Descripción del Ensayo**

Básicamente el Ensayo de Corte consistió en someter una lámina de goma a deformaciones de corte cíclicas con un período similar al del edificio en condición aislada,  $T = 2$  seg. (Frecuencia 0,5 Hz) y simultáneamente medir la carga actuante y registrar la posición deformada dentro del ciclo.



La probeta está conformada por 3 bloques de acero macizo con dos láminas de goma de 6 mm de espesor intercaladas y vulcanizadas a estos bloques. Las dimensiones de la probeta se muestran en la figura N°3

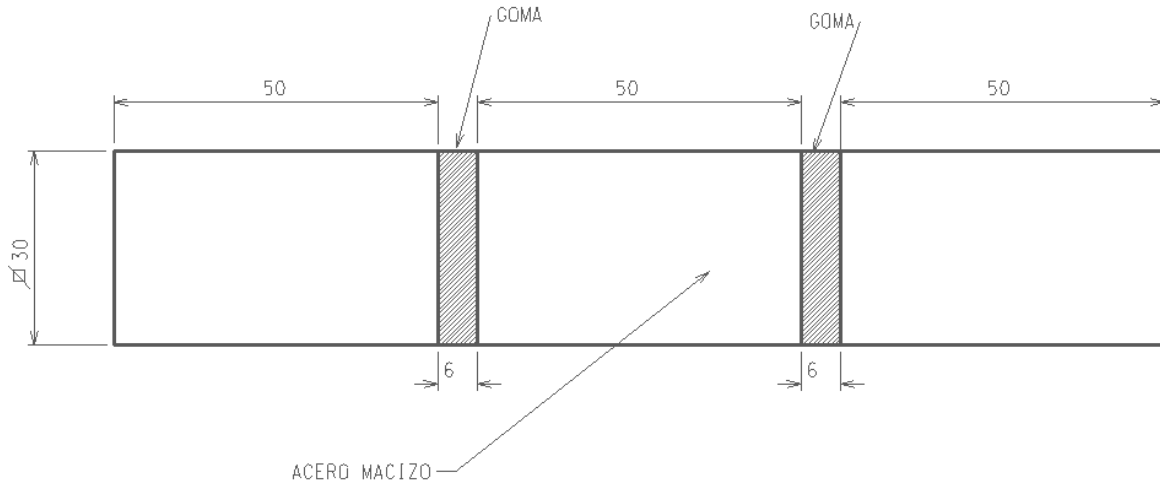


Figura N°3, Dimensiones de probeta para ensayo de corte. (dim. en mm)

Las deformaciones de corte se obtienen del desplazamiento del bloque central fuera del eje de la probeta. De este modo, dada la simetría de la probeta y la rigidez de los elementos de acero, se logra evitar giros obteniéndose deformación de corte puro.

Cada serie de 21 ciclos completos queda definida por la deformación de corte máxima en ambos sentidos. Se deberá registrar los ciclos N° 1, 5, 10 y 20 de cada serie de ciclos.

Los porcentajes de deformación máxima son los siguientes y en este orden:

2%, 10%, 30%, 50%, 75%, 100%, 150%.

En resumen, para cada tipo de goma se debieron fabricar como mínimo tres probetas. Las probetas se someten a una serie de 21 ciclos para cada una de las siete deformaciones máximas. Se registran 4 ciclos tensión-deformación de cada serie.

Como complemento se pudo registrar el tiempo en que se efectuó la medición, así fue posible verificar que la medición perteneciera al ciclo registrado.

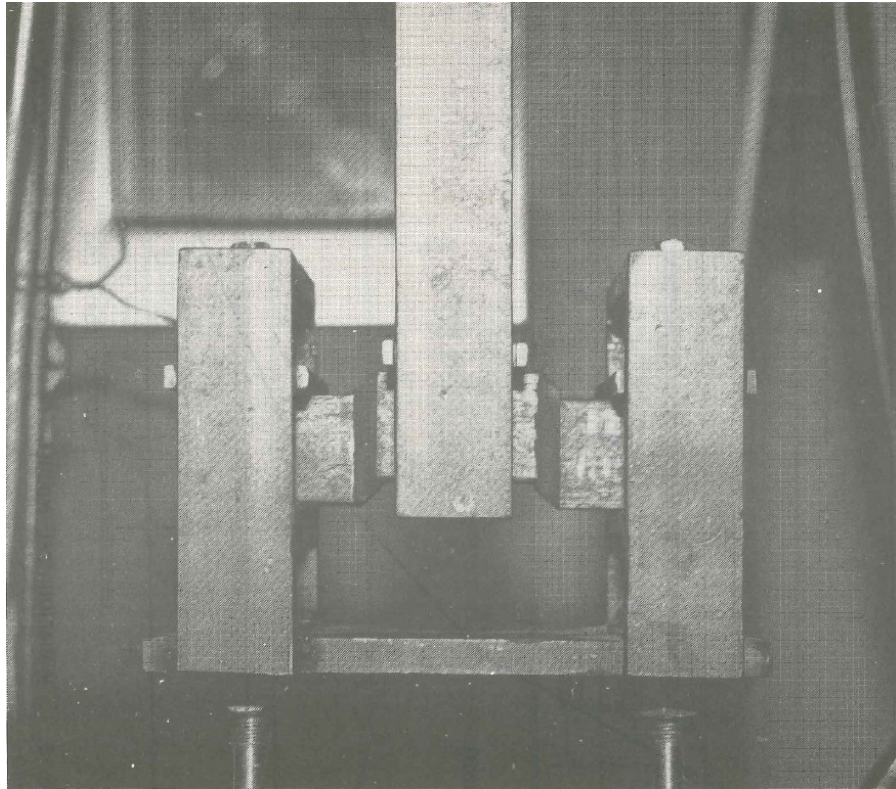


Figura N°4, Fotografía de probeta y mordaza en Máquina MTS actuando en ensayo de corte.

- Determinación del módulo de corte G de la goma

De los gráficos tensión - deformación es posible obtener el valor del módulo de corte para cada ciclo.

$$G\% = \frac{\tau_{\text{máx}} - \tau_{\text{mín}}}{\gamma_{\text{máx}} - \gamma_{\text{mín}}}$$

Siendo:  $\tau_{\text{máx(mín)}} =$  Tensión unitaria de corte máxima(mínima)

$\gamma_{\text{máx(mín)}} =$  Deformación unitaria de corte máxima(mínima)

Estos valores  $\tau$  y  $\gamma$  máximos y mínimos se pueden extraer de los datos medidos ya que es posible condicionar la obtención de datos para que se ajusten a esos puntos. Cabe recordar que los ciclos quedan regulados por la deformación de corte.

- Determinación del amortiguamiento de la goma.

El amortiguamiento viscoso es posible evaluarlo mediante la energía que se disipa por cada ciclo de deformación de corte.

Como se sabe:

$$C_{\text{crit}} = \frac{2 K_{\text{eff}}}{\omega_n}; \text{ Coeficiente de amortiguamiento crítico}$$

$$C = \frac{\tau_{\text{máx}}}{\omega_n * \gamma_{\text{máx}}}; \text{ Coeficiente de amortiguamiento}$$

$$K_{\text{eff}} = \frac{\tau_{\text{máx}}}{\gamma_{\text{máx}}}; \text{ Siendo } K_{\text{eff}}, \text{ rigidez al corte máximo, coincide con el valor del módulo de corte } G.$$

Asociando la curva a una elipse con la misma área encerrada, se obtiene el coeficiente de amortiguamiento equivalente  $C_{\text{eq}}$

$$\tau_{\text{máx}} = \frac{W_d}{\pi \gamma_{\text{máx}}} \quad \text{Con } W_d; \text{ área encerrada por la curva } \tau \text{ vs } \gamma$$

$$C_{\text{eq}} = \frac{W_d / (\pi \gamma_{\text{máx}})}{\omega_n * \gamma_{\text{máx}}} = \frac{W_d}{\pi \omega_n \gamma_{\text{máx}}^2}.$$

Sea  $\beta$  el porcentaje de amortiguamiento crítico

$$\beta = \frac{C_{\text{eq}}}{C_{\text{crit}}} = \frac{W_d / \pi \omega_n}{2 K_{\text{eff}} / \omega_n}.$$

$$\beta = \frac{W_d}{2 \pi K_{\text{eff}} \gamma_{\text{máx}}^2} * 100$$

Del ciclo representativo se extrae  $W_d$ ,  $\tau_{\text{máx}}$ ,  $\gamma_{\text{máx}}$  y se obtiene el porcentaje de amortiguamiento crítico ( $\beta$ ).

#### 5.4 Elección de la goma

Para obtener el elastómero se utilizó la siguiente metodología.

- Obtención de fórmula base
- Fabricación de probetas
- Ensayos inmediatos
- Ensayos de selección
- Prueba de Corte

Si en alguna de las etapas se detectaba que no se cumplían algunos de los requisitos se modificaba la fórmula base y se repetía el proceso.

##### 5.4.1 *Obtención de la Fórmula Base*

Para la fabricación de los aisladores se contó con la colaboración de dos industrias de goma presentes en ese entonces en el sector de Santiago (en la actualidad siguen en actividad);

Por un lado Good Year, una gran industria internacional productora de neumáticos y una pequeña industria nacional Pyton Ltda cuyo rubro es la producción de elementos de goma especiales para la industria y que se tuvo el apoyo directo de su dueño Don Enrique Heresi.

Para iniciar el proceso de búsqueda de la goma óptima se contó con cuatro fórmulas base. La primera fue obtenida de un documento con las especificaciones técnicas para la construcción de aisladores sísmicos en Italia preparado por el Dr. James Kelly. (Fórmula 1). La segunda fórmula (Fórmula 2) se obtuvo de un documento de la " Malaysian Rubber Producers Research Association". La tercera y cuarta fórmula son propias de cada una de las industrias recomendadas según el uso a las que serían sometidas. La fórmula 2 fue encargada a la industria internacional más la fórmula 3 que le era propia. El resto de las fórmulas, 1 y 4, las procesó la industria nacional.

## - Fabricación de las Probetas

En el capítulo anterior se detalló los requerimientos de la goma y la norma respectiva. En estas normas se especifica tamaño de probetas y su tolerancia. Además se especifica las dimensiones de las matrices para todas aquellas probetas no tradicionales.

Para la fabricación de las probetas destinadas a prueba de corte se diseñó una matriz " ad hoc " para vulcanizar las muestra a la probeta.

Existe otra forma de obtener las probetas, como por ejemplo las cilíndricas, que es, cortándolas desde una lámina de goma con sacabocado, pero se constató que las probetas adquieren dimensiones no uniformes, descartando el método, por lo que se recomienda utilizar las matrices.

La elaboración de la goma se inicia con un mezclado de los componentes seguido de un amasado a través de rodillos. Se obtiene entonces la goma cruda que se coloca en las respectivas matrices para iniciar la vulcanización.

El proceso de vulcanización consiste en someter la goma cruda a alta temperatura y alta presión simultáneamente durante un período de tiempo.

La temperatura oscila entre 130 C y 150 C y se logra mediante calefactores incluidos en las placas de la prensa.

La presión de vulcanización, que se obtiene desde la prensa, varía entre 50 y 300 Kg/cm<sup>2</sup>, sin embargo, estando dentro de este rango, no es un factor determinante en la calidad de la goma terminada.

Las formas de aplicar la presión son dos: por inyección o por compresión directa.

La inyección consiste en un émbolo que actúa directamente sobre la goma haciéndola escurrir hacia el interior de la matriz. En la compresión directa la prensa actúa sobre la matriz que comprime la goma hacia su forma definitiva, permitiéndole escurrir por pequeños orificios hacia el exterior para asegurar que se libere el aire atrapado y se completen todas las oquedades.

La calidad de la goma para una mezcla determinada tiene una gran dependencia de la temperatura y tiempo de vulcanizado. Sin embargo una vez completo el proceso de vulcanizado la calidad de la goma no varía aunque se prolongue el periodo de tiempo.

Es posible incorporar a la mezcla aceleradores de vulcanizado que apuntan a disminuir el tiempo de fabricación, pero los resultados de los ensayos arrojaron que estos aditivos alteraban las propiedades de la goma así que se evitó el uso de estos en las probetas de goma.

## - Ensayos inmediatos

Se ha clasificado como ensayo inmediato a aquellos que son posibles de realizar en la fábrica misma y que van a depender de la capacidad de laboratorio de ésta. Estos ensayos permiten rechazar las gomas antes de pasar a etapas de prueba siguientes, siendo posible reintentar con otra mezcla o condiciones de vulcanizado sin pérdidas de tiempo importantes.

En la industria nacional se hacían los ensayos de dureza y compresión sostenida. En la industria internacional no se hicieron ensayos inmediatos, pero se disponía de un sistema de medición de calidad de vulcanización que permitía conocer la temperatura y tiempo óptimos de vulcanizado.

- Ensayos de selección.

La etapa siguiente a los ensayos inmediatos consiste en someter las probetas a las pruebas restantes en un orden tal que la exigencia vaya disminuyendo. De este modo se evita hacer ensayos sobre gomas que no cumplen las exigencias mayores.

Finalmente, sobre las gomas que cumplieron con los rangos aceptables, se sometieron a la Prueba de Corte.

- Resultados prueba de corte.

Como se aclaró en el capítulo anterior los parámetros que arroja el ensayo de corte son el Módulo de corte y el amortiguamiento de la goma, que para el caso de los aisladores en cuestión debe tener valores cercanos a los siguientes:

Módulo de corte a 50% de deformación  $G_{50} = 6 \text{ Kg/cm}^2$

Amortiguamiento a 50% de deformación  $\beta = 10\%$  del amortiguamiento crítico

Además debe verificarse que la variación de estos parámetros cumpla con los siguientes requisitos:

El valor de G para deformaciones bajas debe ser 4 veces mayor que  $G_{50}$  como mínimo

El amortiguamiento  $\beta$  no debe ser menor que 8% del amortiguamiento crítico para 50% de deformación

La figura N°6 muestra el gráfico del ciclo de deformación unitaria de corte versus tensión de corte, para deformación máxima 50%, en el que se indica el módulo de corte y amortiguamiento para este caso. La figura N°7 muestra la variación del módulo de corte para distintas deformaciones de corte máximas. Ambas figuras corresponden a la goma de la Formula 1

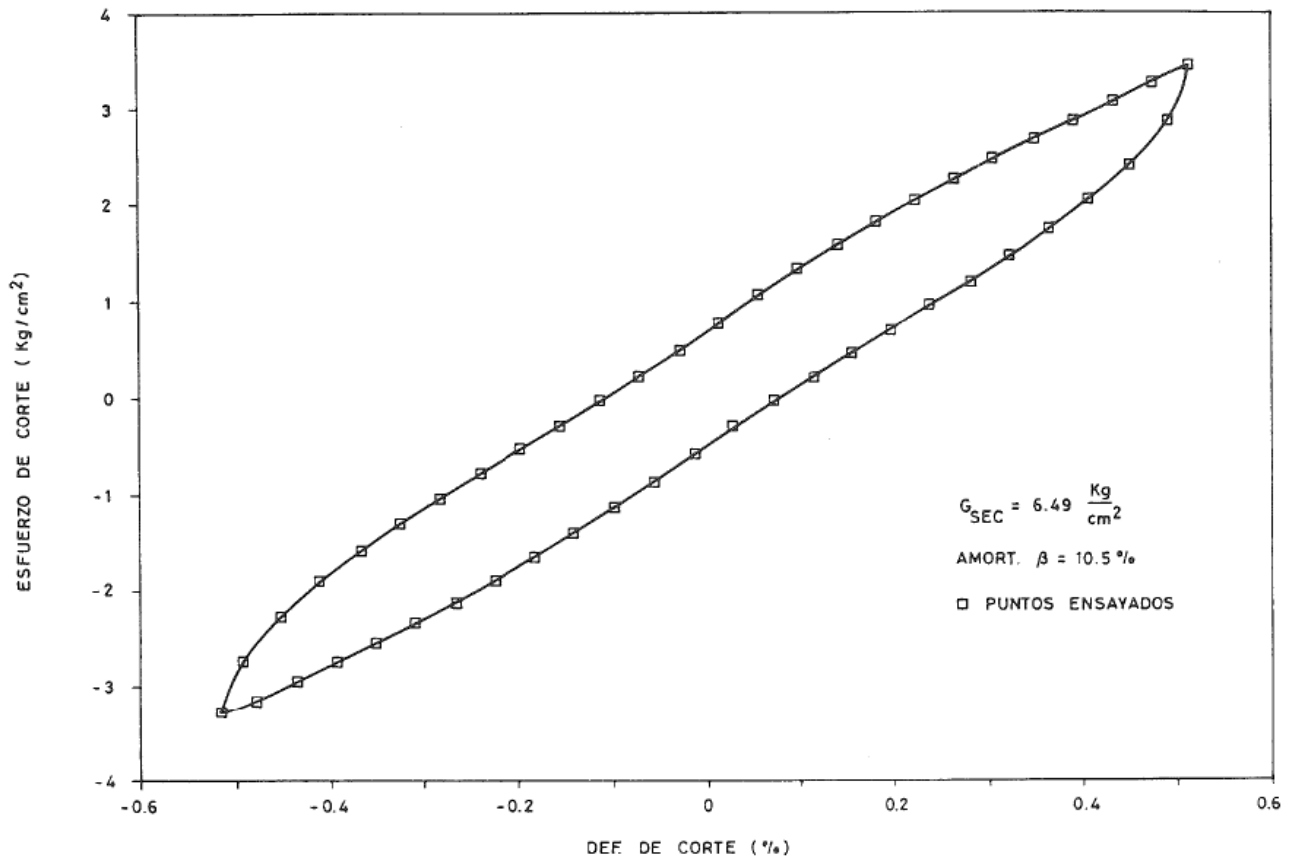


Figura N°6,  
Deformación unitaria de corte versus tensión de corte para def.. max 50% (Formula 1)

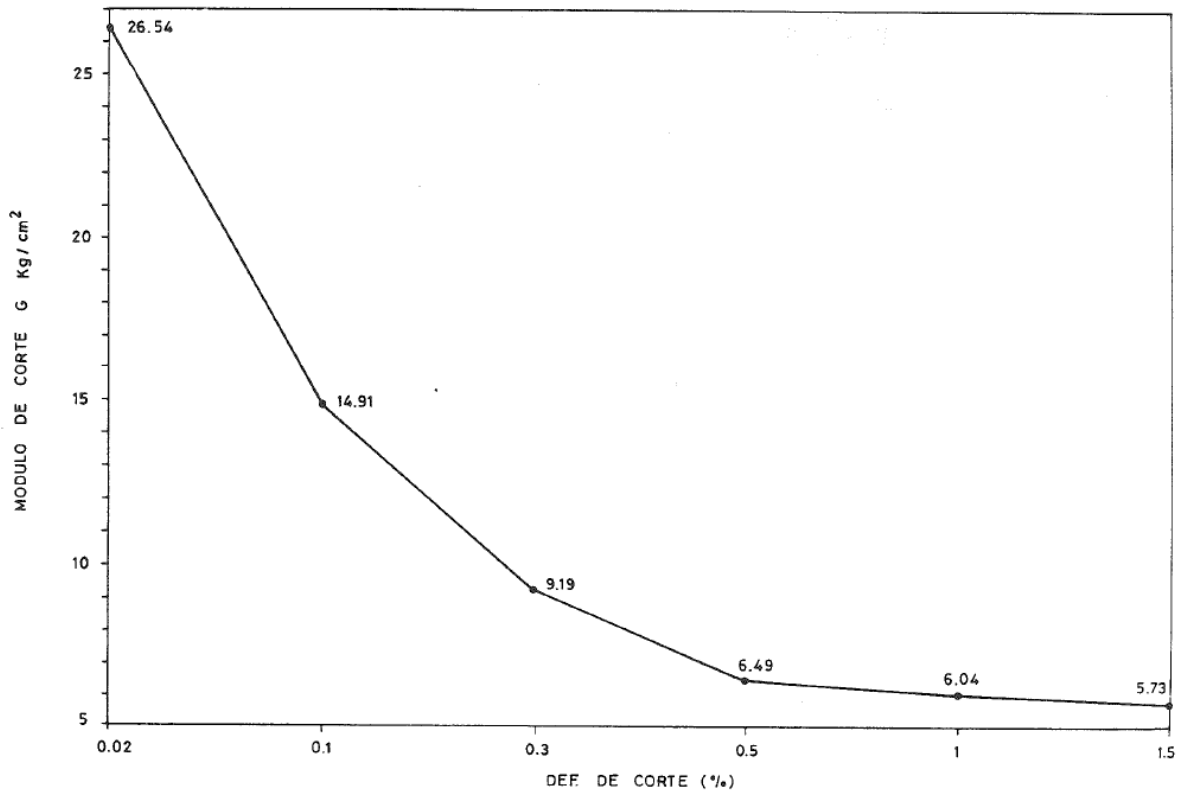


Figura N°7  
Variación del módulo de corte G para distintas deformaciones de corte. Formula 1

Los resultados indican que la goma proveniente de la Fórmula 1 cumple satisfactoriamente con los requisitos de:

Módulo de corte  $G_{50} = 6.49 \text{ Kg/cm}^2$ ,

además de Amortiguamiento  $\beta = 10.53 \%$  .

- Análisis de resultados

De los resultados de los ensayos se desprende que la goma de la Formula 1 cumplió con todos los requisitos. Tanto de los ensayos menores como al ensayo de Corte.

Otros resultados fueron:

Dureza = 55

Tracción hasta la rotura =  $177 \text{ Kg/cm}^2$



Elongación hasta la rotura = 580%

Deformación Remanente = 16%

Adherencia Goma-Metal =  $10,8 \pm 0,2 \text{ Kg/cm}^2$

Igualmente se debe mencionar que fue necesario efectuar algunas variaciones a la fórmula base para cumplir con los valores del módulo de corte y amortiguamiento para 50% de deformación.

El amortiguamiento alto fue una característica de la fórmula base 1, que se vio afectado hacia la baja al efectuar modificaciones tendientes a disminuir el módulo de corte.

Se pudo a la luz de los ensayos constatar que la exigencia sobre el módulo de corte igual a  $6 \text{ Kg/cm}^2$  requirió bastante esfuerzo, por lo menos en el tipo de goma analizada. Por lo tanto, se utilizó la goma de la Formula 1 para la fabricación de los aisladores prototipos.

Los gráficos que relacionaban el módulo de corte con la deformación indicaban la disminución de ésta a medida que la deformación aumenta. Teniendo un valor suficientemente alto para pequeñas deformaciones  $G = 26.5 \text{ Kg/cm}^2$ . ( 4 veces  $G_{50}$ ). Ver Figura 7.

Se definió como recomendable la realización de algún estudio que entregue la relación entre los ensayos menores con la prueba de corte, de esta manera se puede reconocer con anterioridad aquellas gomas que no cumplirán los requerimientos de los ensayos de corte.

## **6. FABRICACIÓN DE LOS AISLADORES**

Entre los objetivos de este estudio se encontraba el definir el método de fabricación más adecuado de los aisladores, en cuestión. Se pretendió producir al menos dos prototipos a escala natural y probarlos en el sistema de ensayo descrito en el capítulo 7.2.1

Estos dos aisladores dieron la pauta para la fabricación de los aisladores definitivos, al mismo tiempo que se verificó su funcionamiento.

Para la fabricación de los aisladores se contó con la colaboración de la pequeña industria nacional mencionada anteriormente. En ella se efectuaron todas las etapas de fabricación, incluyendo la fabricación de las probetas de ensayos de la goma. Adicionalmente se tuvo como ventaja que la goma que cumplió los requerimientos fue generada en este mismo lugar. Esta condición permitió que este memorista participase directamente en todas las etapas de la fabricación, además del bajo costo y el gran interés que tuvo el dueño de esta industria tanto para colaborar como para ampliar su experiencia en productos especiales de goma.

Todos los puntos anteriores no se hubieran logrado en alguna firma de mayor envergadura o internacional.

## **6.1 Procesos de Fabricación**

Debido al reducido número de aisladores a fabricar (2) no se alcanzó la experiencia suficiente para optimizar un método de producción. Sin embargo se logró dar las pautas para iniciar ese proceso, procurando que el sistema no sólo sirviera para obtener esos 2 prototipos sino que permitiera la fabricación en serie, generando una reducción del costo de cada aislador.

La forma de abordar el desafío fue tratando de obtener la máxima información de métodos de fabricación de productos con algún grado de similitud en Chile y de las experiencias extranjeras en fabricación de aisladores. De este modo, se aportan estos esfuerzos para diseñar la matriz más adecuada y planificar el método de fabricación. Una vez concluida la fabricación de la matriz, participar y supervisar todas las etapas de la fabricación de los aisladores, realizar pruebas preliminares que permitieron detectar y corregir anomalías para mejorar el método y finalmente, producir los aisladores prototipos definitivos.

Para lograr lo anterior se pasó por las siguientes etapas:

- Recopilación de información
- Diseño y fabricación de la matriz
- Método de Vulcanización y pruebas preliminares
- Mejoramiento del método de fabricación
- Fabricación de los prototipos

### **6.1.1 *Diseño y fabricación de la matriz***

Debido a las grandes dimensiones del aislador en relación a la prensa disponible y por el menor costo que representa se optó por el método de compresión directa para la vulcanización. Esto es, la prensa-calefactor actúa sobre la matriz que comprime la goma hacia su forma definitiva, para liberar el aire atrapado se permite escurrir a la goma por pequeños orificios hacia el exterior y así asegurar que se completen todas las oquedades.

De este modo la matriz se compuso de dos partes principales, molde e inyector. El molde que interiormente tiene la forma final del aislador mientras que el inyector o tapa superior tiene la geometría adecuada para empujar a la goma a su forma definitiva, confinándola lentamente en el molde y dándole la altura requerida.

Uno de los desafíos que surgieron, fue mantener la posición de las partes metálicas durante la vulcanización. Las placas de acero de 1 mm de espesor deben quedar a 7 mm de separación entre ellas y mantenerse centradas para permitir un recubrimiento perimetral de 3 mm.

La separación entre placas pudo obtenerse dejando una holgura en el espesor inicial de las láminas de goma antes del vulcanizado. Esta holgura se pierde durante compresión, logrando la separación final requerida.

Las fabricaciones preliminares, en que se probó varios espesores iniciales arrojaron que el espesor de los cojinetes de goma cruda que se coloca entre placas debe ser de 7,5 mm, que se puede asociar a un 7% de espesor adicional.

Para mantener el recubrimiento perimetral se incluyó en la matriz un eje central circular que nace desde la base y mantiene fijos horizontalmente los elementos metálicos.

De este modo cada placa metálica debió tener una perforación central de 20 mm de diámetro.

Las placas de acero superior e inferior que tienen 10 mm de espesor, también debieron presentar una perforación central de 20 mm para el paso del eje. Estas placas, destinadas a ser los elementos de fijación del aislador no debían girar en torno a este eje, puesto que tenían las perforaciones para los pasadores que les permitían fijarse exteriormente y que deben quedar verticalmente alineadas. Por esto fue necesario incluir en las tapas de la matriz topes que coincidían con estas perforaciones y las mantenían alineadas.

Las paredes del molde iban a estar sometidas a la presión que se genera producto de la carga sobre el inyector por lo que se optó por un espesor de paredes de 12 mm.

Otro de los desafíos que se presentaron fue la etapa de desmolde una vez finalizada la vulcanización. El molde cilíndrico, que era el elemento sometido a grandes presiones, para efectos de disminución de costos no era desarmable.

Por estas razones, para sacar las tapas de la matriz se incluyeron perforaciones hiladas que mediante pernos con asa actúen contra el borde del molde cilíndrico separando las tapas. De esta forma se lograba, girando los pernos casi en simultáneo, retirar las tapas.

La dificultad de sacar el aislador terminado de su molde cilíndrico fue solucionada mediante la inclusión de una camisa de acero que cubría interiormente las paredes del molde y que presentaba facilidades de extracción debido a una leve conicidad dadas tanto al molde como a la camisa. Una vez que la camisa metálica se extrae del molde junto al aislador, es fácilmente separable gracias a que la camisa se decidió que quedara conformada por dos medias caña.

Para permitir el escurrimiento, tanto interiormente para llenar los huecos, como hacia afuera, para liberar aire y goma en exceso, se optó por lo siguiente: interiormente puede escurrir a través del recubrimiento perimetral y hacia el exterior por dos rendijas que recorren verticalmente toda la altura del molde, que quedaban conformadas por la separación de las medias caña de la camisa de acero.

En la Figura N°8 y Figura N°9 se muestra la matriz, partes y dimensiones.

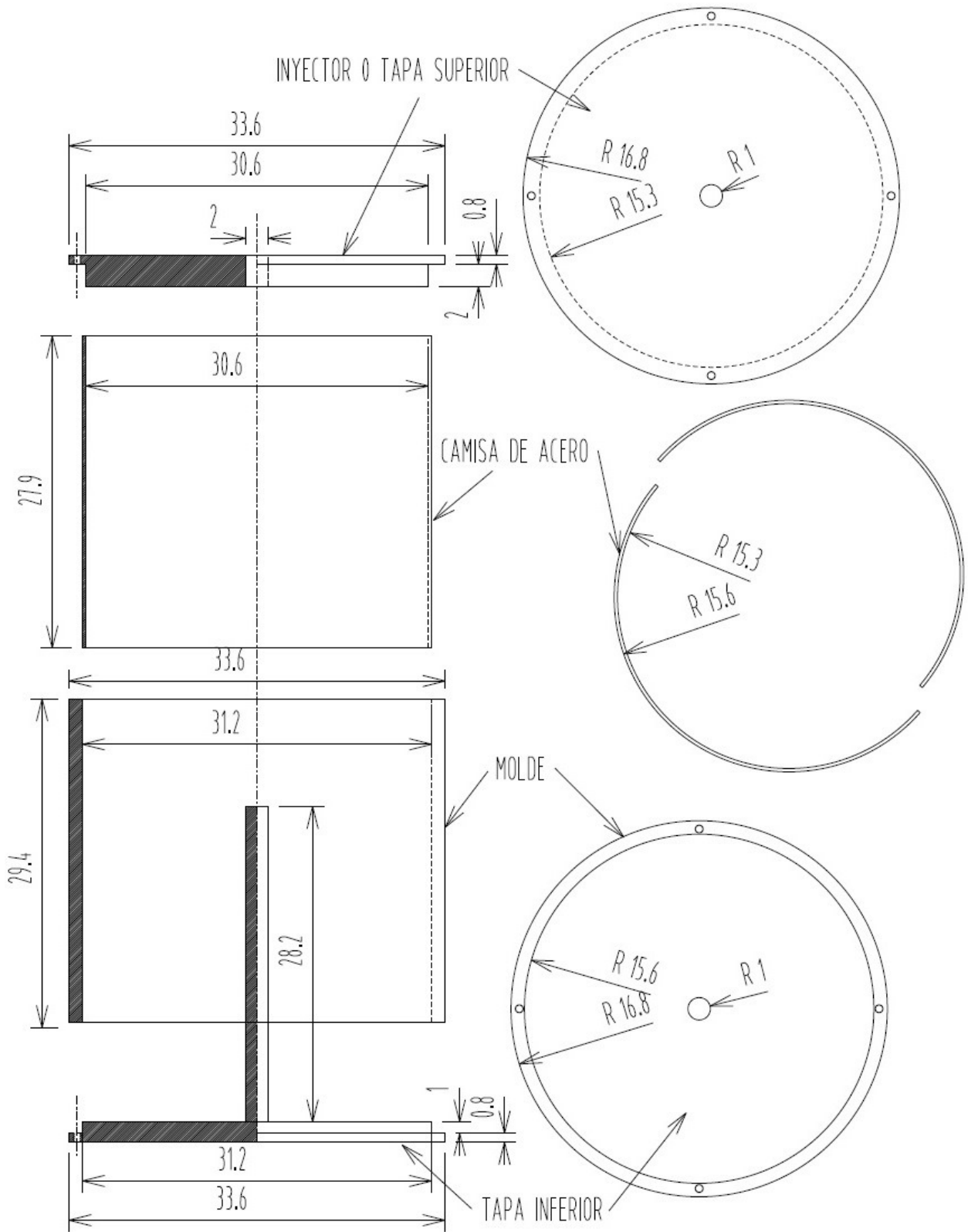


Figura 8, Componentes de Molde de aisladores Plantas y Secciones en vista y corte.(dim. en cm)

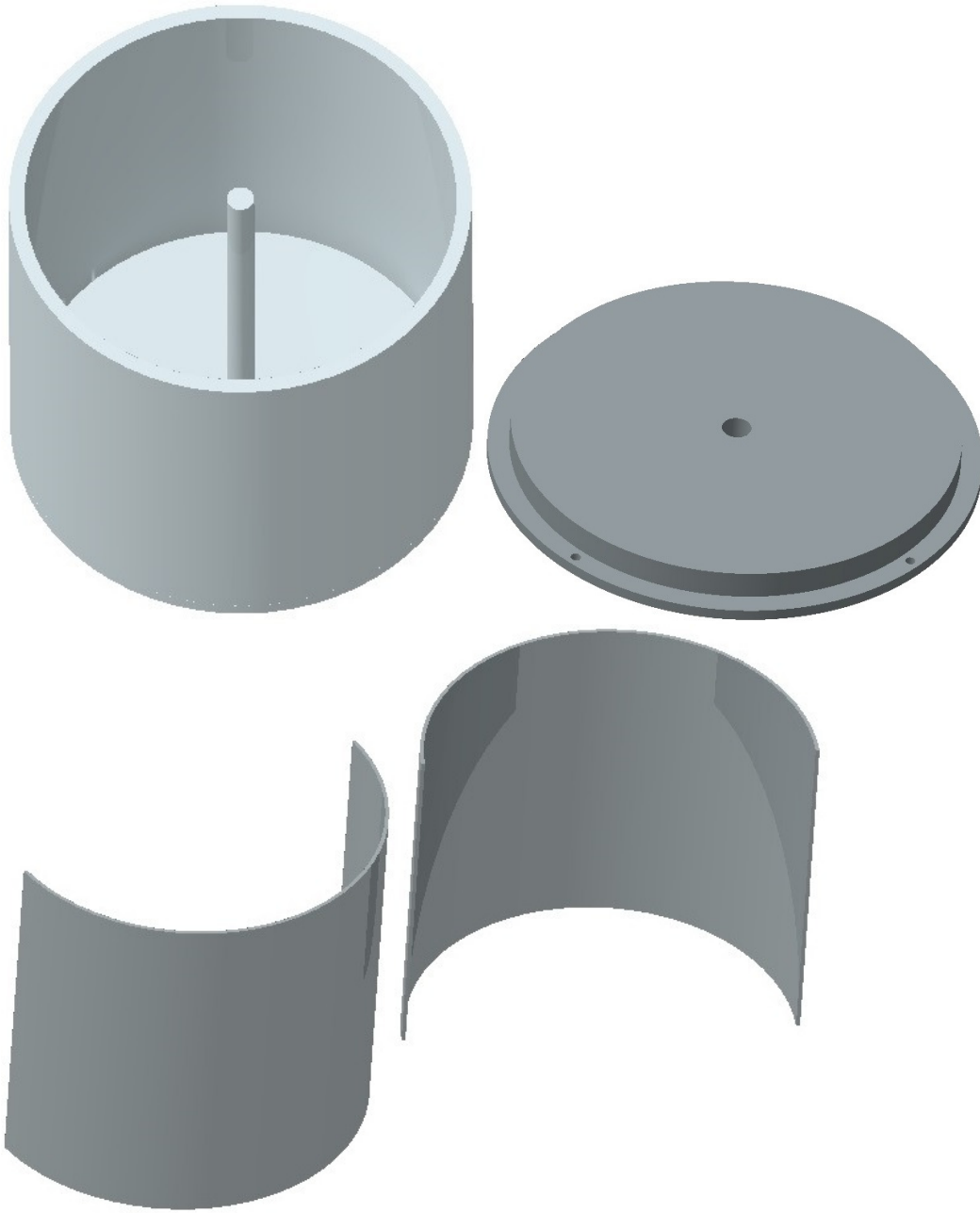


Figura 9, Componentes de Molde de aisladores, Isométricos

El material de la matriz es acero calidad A37-24ES. Las tapas superior e inferior se hicieron torneando placas de gran espesor, mientras que para el molde cilíndrico y la camisa se ocupó trozos de tuberías de acero.

### **6.1.2 Método de Vulcanización y pruebas previas.**

El programa de fabricación incluía producir algunos aisladores preliminares evitando que la goma y las placas de acero se adhirieran mediante vulcanización, para así poder acceder a sus elementos y medir las dimensiones finales. Posteriormente, en conocimiento de los resultados de los aisladores preliminares, fabricar los dos prototipos que formaban parte del objetivo de este estudio.

Las etapas de la vulcanización que se siguieron fueron las siguientes:

- Masticado del caucho, que permite mediante el paso sucesivo por rodillos para lograr se plastifique y suavice el caucho. Esto permite la mezcla con el resto de los componentes.
- Mezclado de componentes y amasado simultaneo hasta obtener el espesor requerido. Primeramente mezcla de los 9 componentes que no provocan reacciones químicas, posteriormente se agrega el azufre y el acelerante (CBS).
- Cortado de las rodela de goma cruda con un molde circular y pesado de cada una hasta alcanzar el peso requerido.
- Reposo de 24 horas para curado previo.
- Las partes metálicas debieron arenarse y cubrirlas con antioxidante, previo al montaje se pintan con pegamento (DESMODUR R). Los aisladores preliminares no se cubrieron con este pegamento, de esta forma no se producía la vulcanización goma-metal.

Una vez cumplido el periodo de reposo de las láminas de goma cruda se calienta la matriz durante 2 horas en los calefactores de la prensa. Esto es para subir la temperatura del molde y así alcanzar más rápidamente la temperatura de vulcanización una vez iniciado el moldeo.

El llenado de la matriz se hizo alternando láminas de goma con placas metálicas, compactando la goma, a medida que se colocaban, con un taco de madera. En la última etapa fue necesario posicional la tapa para prensar suavemente, acomodar las capas y dejar espacio para terminar el llenado. Una vez completado el llenado se posicionaba la tapa de la matriz para iniciar el vulcanizado.

En la primera etapa, el prensado debía ser lento, cargando y descargando; esto permitía el acomodo de las partes, el escape del aire y escurrimiento de la goma.

Una vez alcanzada la posición cerrada del molde en la prensa, según experiencia del fabricante, se debía mantener la presión en 3.000 Psi en el manómetro de la prensa y la temperatura en 130° por 12 horas.

A la recomendación del fabricante, basada en su experiencia de mantener una presión de 3000 Psi indicada en el manómetro, independiente del tamaño del elemento de goma que se está vulcanizando, tuvo que adoptarse algunas consideraciones para el caso de los aisladores. Como el diámetro del émbolo de la prensa utilizada era 170 mm, en relación al diámetro del aislador de 300 mm la presión efectiva es 3,1 veces menor que la indicada en el manómetro de la prensa (para una presión de 3.000 PSi la presión efectiva es 970 Psi).

Otra consideración fue que en el momento en que la matriz se cierra por completo la carga actúa contra las paredes del molde y no sobre la goma. Para esto fue necesario monitorear que esto no ocurriese.

Con respecto a la temperatura que se adquiere durante el moldeo, esta es dependiente del tiempo que se mantiene la matriz en los calefactores, requiriendo hasta 12 horas para alcanzar los 120 °C. Si se hubiese podido aplicar calor por distintos frentes, además que por los platos superior e inferior, el tiempo de vulcanizado podría haber disminuido notoriamente.

Si se hubiese instalado algún tipo de termostato inserto en la goma, en el centro del aislador, se habría determinado el momento en que se alcanzaba la temperatura adecuada y así minimizado el tiempo de aplicación de calor y presión de la prensa, generando un ahorro de energía y tiempo.

Uno de los objetivos del aislador de prueba, que sería desarmado y luego cortado, era verificar el grado de vulcanización para así confirmar las condiciones de tiempo, presión y temperatura de vulcanizado.

### **6.1.3      *Fabricación y resultados del aislador preliminar de Prueba***

El día uno se efectuó el masticado de 12 Kg de caucho. El segundo día se preparó la mezcla sin incorporar el Azufre y acelerador de vulcanizado CBS. El tercer día se completó la mezcla y se efectuó amasado hasta dejar una lámina de goma cruda de 8,5 mm de espesor.

El espesor de 8.5 mm considerado surgió como resultado del siguiente análisis: como la densidad de la goma terminada es de 1,3 gr/cm<sup>3</sup> y de la goma cruda es de 1,12 gr/cm<sup>3</sup>, se necesitan 20.056 gr de goma terminada, debiendo cada lámina pesar 668 grs. Por lo tanto, las dimensiones de las láminas de goma cruda resultaban ser de 8,5 mm de espesor y 300 mm de diámetro.

Posterior al vulcanizado y desarmado del aislador, el peso de las láminas resultantes fue el siguiente: 5 con 660 gr, 8 con 670 gr y 17 con 690 gr, totalizando 20.390 gr, 334 grs. más que lo calculado considerando que el sobrante debería haber escurrido.

Se siguió el procedimiento de llenado, vulcanizado y desarmado, observándose lo siguiente:

- Inicialmente el inyector o tapa sólo entró 8 mm de los 38 mm que debía descender para alcanzar su posición final.
- Durante la primera hora de vulcanizado escurrió hacia el exterior 150 gr de goma hasta el momento en que se detectó vulcanización.
- Transcurridas las doce horas el inyector presentaba 3 mm más de separación que en su posición inicial, a pesar que la presión no bajó de los 970 Psi durante todo el período.
- El desmolde del aislador terminado funcionó como estaba previsto, presentándose sólo dificultad en separar una de las medias caña de la camisa interior.
- La altura del aislador recién extraído fue de 304 mm debiendo ser 271 mm; 33 mm de diferencia.
- Una vez frío la altura del aislador descendió 3 mm a 301mm; alcanzado 30 mm más que la altura final requerida.
- El aislador fue desarmado y cortado verificándose un espesor de aproximadamente 8 mm para cada lámina de goma, 1 mm superior al requerido.
- La goma se presentaba completamente vulcanizada y homogénea en todo el interior del la fase goma del aislador.
- Las láminas de goma superior e inferior presentaban un espesor levemente menor, aproximadamente 7,5 mm.

#### 6.1.3.1 Conclusiones del proceso de fabricación del aislador de prueba

- La densidad de la goma terminada no fue la esperada, de ahí que la cantidad de goma fue considerablemente mayor que la necesaria. Por esta razón se obtuvo espesores de 8 mm en vez de 7 mm para las láminas de goma.
- Se pudo constatar que no se debe esperar que por las rendijas escape más que 100 grs. de goma ya que la tapa misma al acercarse a su posición final se va transformado en obstáculo para que la goma escurra con facilidad.
- Ocurre una dilatación térmica equivalente a 3 mm de variación en la altura total del aislador, por lo que se espera que el aislador en caliente tenga 3 mm más de altura que lo esperado.
- Considerando descontar el volumen adicional de carga se concluye que se requiere 17.790 gr de goma cruda para conformar el aislador total, esto equivale a láminas



de 590 gr a excepción de las superior e inferior que deben pesar 600 grs. c/u. Con esto, se disminuyó el espesor a 7.5 mm para cada lámina de goma cruda.

- Como se produce una variación en 3 mm en la altura del aislador a temperatura elevada, se puede prever que el inyector pueda quedar separado 3 mm de su posición final sin que la altura en frío del aislador resulte mayor que la requerida. Esta es una ventaja que permitía evitar que la tapa o inyector topara y trabajara contra el manto del molde evitando aplicar la presión requerida.

#### **6.1.4 Fabricación de los Aisladores Prototipo.**

El proceso de la fabricación de los prototipos representaba un punto cúlmine para los objetivos de este estudio; construir el primer aislador sísmico en Chile. Esta etapa, además, daba inicio a las pruebas sobre el prototipo a escala natural, siendo estas pruebas también pioneras en el campo de la tecnología de entonces.

Para la fabricación se siguió la misma metodología utilizada para el aislador preliminar de prueba con las modificaciones que surgieron de las conclusiones. Esta vez se agregó el pegamento a las partes metálicas.

Del proceso de vulcanizado se observó lo siguiente:

- La goma escurrida no superó los 50 grs.
- El inyector ocupó su posición final, desplazándose los 3 mm remanentes hacía el final del período de 12 horas.
- El desmolde no presentó inconvenientes.
- La altura de los aisladores una vez fríos fue de 271 mm, que corresponde a la requerida.
- No se apreció defectos en la inspección externa.

El método de fabricación de los dos primeros aisladores sísmicos se pudo considerar exitoso.

## **7. ENSAYOS DE LOS AISLADORES**

La etapa siguiente a la fabricación consistió en someter los prototipos a pruebas que permitieran verificar los valores teóricos para cumplir los requerimientos de la aislación sísmica. Estos ensayos no estaban normalizados ni existían los diseños de los dispositivos de ensayos apropiados. Estos ensayos, también pioneros, darían la pauta para los ensayos que se deberían efectuar a los aisladores definitivos que se ubicarían bajo el edificio del estudio.

Los ensayos de los prototipos se efectuaron en el laboratorio de ensayo de materiales IDIEM, ocupando la infraestructura existente, pero agregando todos los elementos necesarios para realizar las pruebas especiales que no eran cubiertas por la experiencia del laboratorio. En este lugar el memorista también tuvo una gran participación directa en los ensayos y en la implementación del laboratorio.

### **7.1 Dispositivos de ensayo**

Teniendo presente que estos ensayos serán sólo una pauta para los ensayos finales de cada uno de los aisladores que van a ser usados en el edificio, aprovechar al máximo los recursos que se dispone y por ser primera experiencia en Chile, se descartó crear un sistema que se adapte a cualquier geometría de aisladores y se focalizó en efectuar las pruebas de los prototipos generados para este estudio.

Siguiendo este concepto, el aparato de ensayos que corresponde a un marco de reacción debió permitir un montaje sencillo y estar adaptado para que se efectuaran a las 5 pruebas que fueran necesarias de aplicar sobre los aisladores y que se describen en el capítulo 7.2.1

Como principal desafío, el marco de reacción debía permitir ensayos con desplazamientos laterales con la simultaneidad de aplicación de cargas verticales.

Para realizar las pruebas se contaba con la infraestructura del Laboratorio de Ensayos de Material de Idiem. Los equipos de aplicación de cargas disponibles entonces eran un set de gatos hidráulicos marca AMSLER con capacidades de 2,5,10,20 y 50 ton estáticas, una máquina de ensayos con una capacidad de 500 ton con viga de reacción y finalmente el equipo más relevante era un pulsador AMSLER para gatos múltiples más un acumulador de nitrógeno.

Las cargas verticales a aplicar en los ensayos tenían un máximo de 1,5 veces la carga de diseño, esto es 45 ton, para lo que era más que suficiente la máquina de 500 toneladas de capacidad. Además, este mismo equipo permitía aplicar la carga vertical hasta la rotura.

Las cargas horizontales máximas ocurrían en el ensayo estático para desplazamiento horizontal de 19 cm, para esto fue necesario ensayar los aisladores por pares, montados uno sobre otro y así efectuar un desplazamiento simétrico aplicando la carga en la placa interaisladores. Para esto, y considerando rigideces horizontales medias de 200 Kg/cm. se requería para 19 cm de desplazamiento y dos aisladores aproximadamente 7.5 ton, por lo tanto se ocupó un gato de 10 toneladas de capacidad.

Para los ensayos de desplazamiento lateral dinámicos se ocupó el pulsador AMSLER, pero dada su posibilidad de hacer ensayos dinámicos y estáticos, sólo se puede ocupar el 50% de la capacidad nominal del gato conectado. Debido a esto se requirió utilizar gatos de 20 toneladas de capacidad nominal para las cargas horizontales.

Entre los desafíos que surgieron en esta etapa del estudio fue, primero, el diseño del marco de reacción que permitía transmitir las cargas a los aisladores y, segundo, la poca carrera que disponían los émbolos de los dos gatos (sólo 10cm).

La carrera limitada de los gatos se solucionó, para el ensayo que requería desplazamiento horizontal máximo, aplicando las cargas horizontales por etapas, por lo que el marco de reacción debía tener la capacidad de sostener al aislador deformado mientras se acomodaba el equipo para continuar con la siguiente etapa de carga horizontal.

El marco de reacción consistió en un marco cerrado sin soporte externo, que tenía que cumplir con los siguientes requisitos:

- Bajo costo
- Desmontable
- Seguro
- Liviano
- Adaptable fácilmente a los distintos ensayos.
- No provocar resistencias a las cargas de ensayo (flexibilidad)

El marco de reacción construido se muestra en la figura N°10. El marco de reacción debía permitir efectuar los cuatro tipos de ensayo que se describen en el capítulo 7.2.1; carga vertical sostenida, carga vertical simultánea con carga horizontal estática unidireccional, carga vertical simultánea con carga horizontal dinámica unidireccional y carga vertical simultánea con carga horizontal dinámica bidireccional. Este último, a pesar que no se efectuó la experiencia, se previó su capacidad para las etapas futuras del estudio, el diseño efectuado para esta última se muestra en la figura N°11. Los distintos esquemas de montaje y los detalles del diseño para las distintas disposiciones y uso, se muestran en el ANEXO 2.

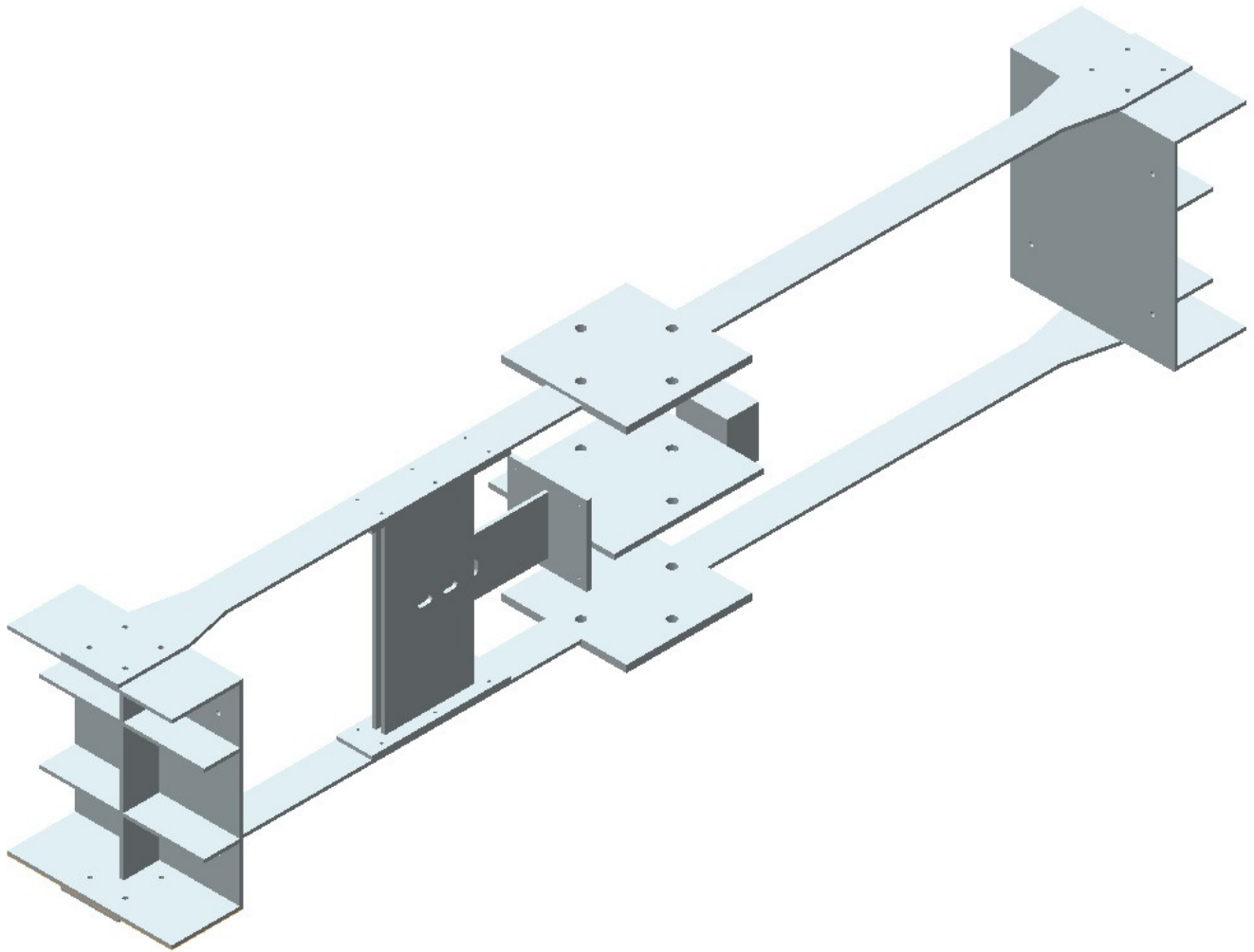


Figura 10, Marco de reacción. Disposición para ensayo con carga vertical simultánea con carga horizontal estática unidireccional. Isométrico

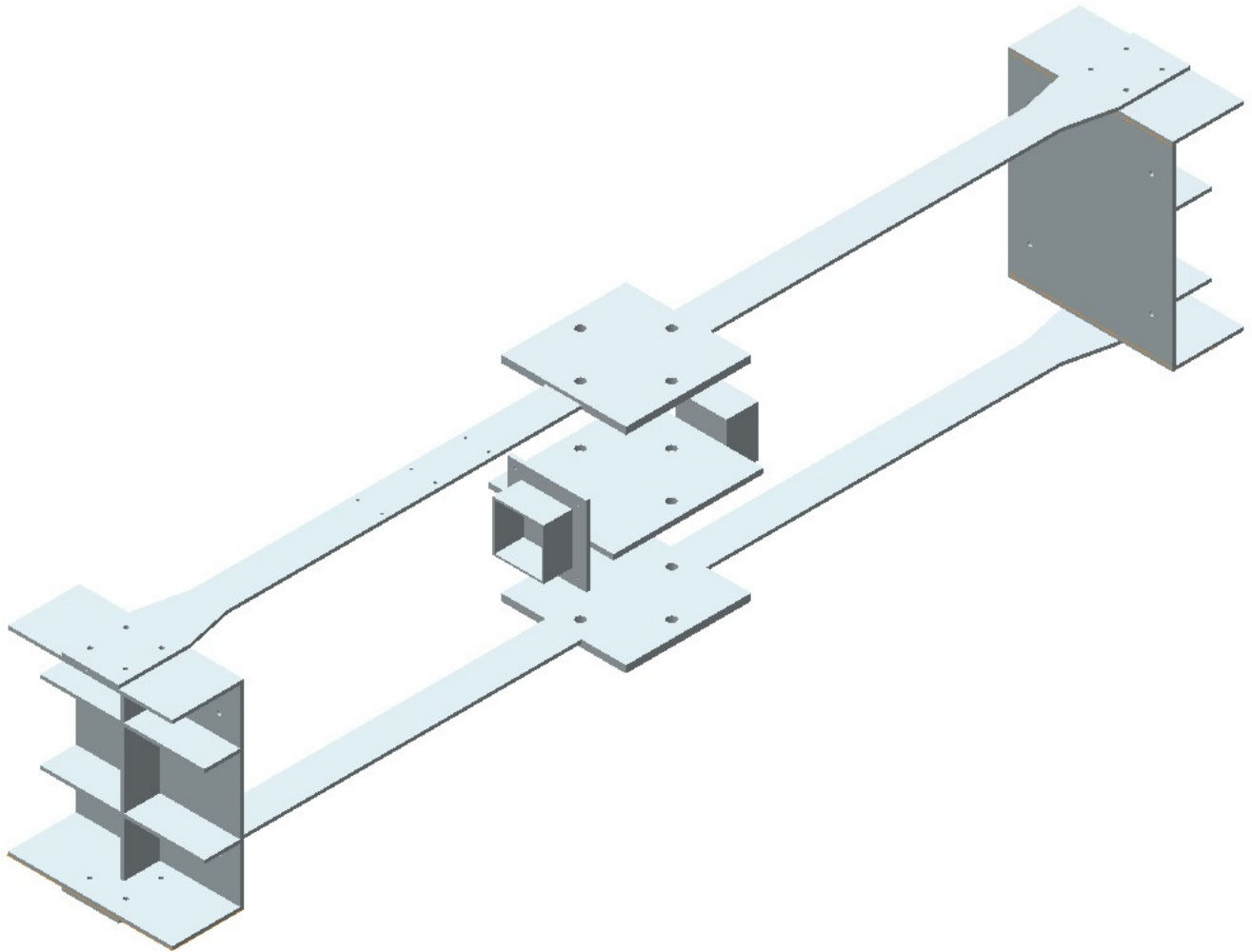


Figura 11, Marco de reacción. Disposición para carga vertical simultánea con carga horizontal dinámica bidireccional. Isométrico

El marco de reacción permitió transmitir todo el esfuerzo producto de cargas verticales hacia los aisladores, por esta razón los tensores horizontales eran elementos muy flexibles. Para la aplicación de estas cargas se ocupó la máquina de 500 toneladas de capacidad.

Para ligar los aisladores entre ellos y al marco de reacción se utilizó pasadores que cruzaban las perforaciones de las placas superior o inferior de los aisladores con las perforaciones de las placas del marco. La placa intermedia unía ambos aisladores también por medio de pasadores. La instalación de los aisladores se aprecia en el acápite 7.3 figura N° 12

Para lograr el ensayo estático unidireccional se agregó un elemento que permitía soportar el aislador deformado. Estaba conformado por una pieza metálica vertical que iba apernada en los tensores inferior y superior, éste sirve de guía a una placa que está unida a la base central del par de aisladores. Esta placa tiene una perforación al igual que la guía, en aquella posición en que las perforaciones coincidían se colocaba un pasador de acero que sostenía el par de aisladores en la posición deformada, de este modo se permitía descargar el gato, desenroscar el embolo para

alargar su alcance y continuar cargando. Esta secuencia se realizaba dos veces hasta alcanzar los 19 cm.

Para el ensayo dinámico unidireccional se utilizó el pulsador conectado a un gato que realiza los ciclos de cargas a una frecuencia de aproximadamente 0,5 Hz.

En el ensayo dinámico bidireccional se incorpora un gato de reacción que mantiene una carga constante ayudado por un acumulador de nitrógeno.

El ensayo unidireccional cíclico tiene la ventaja de alcanzar un desplazamiento de hasta 8 cm. en una dirección. El bidireccional sólo alcanza un desplazamiento de 4 cm. en ambas direcciones.

Las pulsaciones de los ensayos cíclicos horizontales son sinusoidales fluctuando entre una carga mínima y una carga máxima fijadas previamente, la frecuencia mínima es de 100 RPM lo que se reduce para grandes desplazamientos, llegando a 30 RPM (0,5 Hz) que corresponde a la requerida en los ensayos.

Para los ensayos cíclicos bidireccionales el gato mantenedor de carga debería estar conectado a un acumulador de nitrógeno y a un péndulo AMSLER. Este gato es capaz de mantener la carga en un valor determinado durante los ciclos de deformaciones controlados por el gato pulsante. Haciendo la diferencia entre las cargas de distinto sentido, se obtendría la carga neta sobre los aisladores.

Para la medición de las deformaciones se utilizó varios LVDT y diales. Las deformaciones verticales se miden con dos diales ubicados diametralmente opuestos en cada aislador. Las deformaciones horizontales estáticas se miden con LVDT y dial, las deformaciones horizontales cíclicas se medían sólo con un LVDT de 100 mm de carrera.

La medición de las cargas cíclica se obtenían de los manómetros del pulsador y de un manómetro tipo BURDON. Este consistía en un espiral de acero conectado al final de la manguera proveniente del gato. La presión en el gato se transmite al helicoide que se deforma, midiendo esta deformación mediante un LVDT se puede obtener la carga con que estaba actuando el gato en forma instantánea y la información podía ser enviada a un computador.

Para registrar las mediciones, sobre todo de los ensayos dinámicos se utilizó un computador personal IBM, un emisor de señales ACUREX y un programa recuperador de señales análogas para ACUREX (ANA). El programa computacional estaba en lenguaje BASIC y se le incorporaron las modificaciones necesarias para los ensayos en cuestión.

Los LVDT estaban conectados al ACUREX el que, controlado por el programa ANA, enviaba las señales y recibía las respuestas de los LVDT, para luego registrarlas en un arreglo en la memoria del PC. Terminado el ensayo el arreglo era copiado en un archivo del disco duro.

## **7.2 Ensayo de los prototipos**

Los aisladores de goma de alto amortiguamiento pertenecían en ese entonces a una tecnología no suficientemente comprobada en Chile, y la experiencia internacional aún no entregaba resultados

definitivos. Esto llevaba a que los aisladores que sean utilizados debían ser probados uno por uno antes de su instalación.

Por una parte se debían someter a condiciones extremas verificando que los aisladores no fallaran, y por otra se debía medir las propiedades para comprobar que se encontraban en los rangos esperados.

Se debe aclarar que la metodología que se usó en los ensayos estaba íntimamente asociada a los recursos disponibles y a los objetivos del estudio, sabiendo que serían mejorados hasta acercarse a una norma general.

Para iniciar la experiencia de ensayos se fabricaron dos aisladores; uno que debía emular todo el ciclo como si estuviera destinado a ser ubicado en el edificio del estudio complementario y el otro que se destruiría en ensayo a la rotura. Esto daría la pauta para las pruebas de los aisladores definitivos, que serían parte de etapas posteriores.

Las recomendaciones internacionales pedían probar el 20% de los aisladores a instalar, que se visualizaba como el porcentaje que se debía ensayar cuando la experiencia aumentara. En este caso, como el número es reducido (preliminarmente 16) y la experiencia también, era necesario que todos fueran probados.

En el capítulo 7.1 se describe la máquina de ensayo que se construyó para realizar las pruebas, que fue debidamente adaptada a los ensayos mismos y a los equipos disponibles.

### **7.2.1 Descripción de los ensayos**

Las pruebas que se definió se efectuarían a todos los aisladores (exceptuando el ensayo e), que sólo se hizo como parte de este estudio), fueron las siguientes:

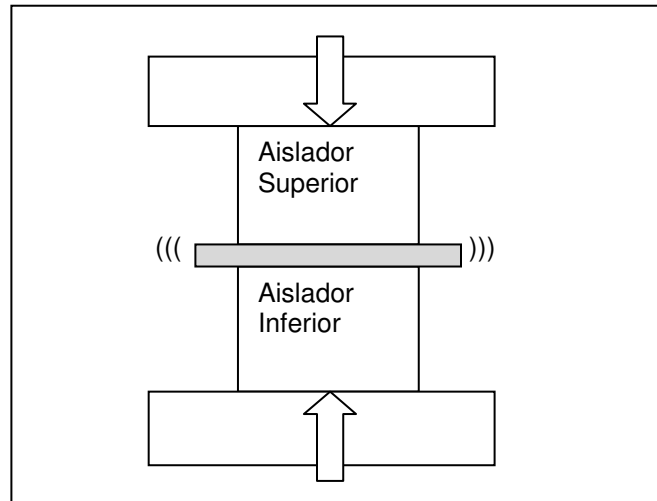
- a).- Compresión sostenida
- b).- Compresión variable
- c).- Carga horizontal estática
- d).- Carga horizontal dinámica
- e).- Compresión hasta la rotura.

#### **a).- Compresión Sostenida**

Los aisladores fueron sometidos a carga vertical sostenida, comprimiéndolos con una fuerza 1,5 veces la carga de diseño por un período de 12 horas. Se debía registrar las deformaciones verticales en el tiempo y observar la aparición de grietas o señales de pandeo del aislador.

Para medir la deformación vertical se situaron dos diales en los costados de los aisladores ubicados diametralmente opuestos, siendo el promedio de ambos el valor adoptado.

Para reproducir el estado del aislador de empotramiento por un lado y libre por el otro este ensayo debe hacerse por pares uno sobre otro, así en caso de inestabilidad se apreciaría un desplazamiento de la placa base interaisladores. La disposición se indica en el Esquema 1



Esquema 1: Disposición. Ensayo Compresión Sostenida

#### b).- Compresión Variable

Cada aislador debió ser cargado hasta 1,5 veces la carga de diseño y luego reducida a 0,7 veces la carga de diseño. Inmediatamente se repite el ciclo anterior manteniendo 0,7 veces la carga de diseño durante un minuto. En esa posición se marca la deformación cero. Entonces debía efectuarse ciclos de carga a una tasa uniforme, entre 1,1 y 0.7 veces la carga de diseño.

Para los aisladores prototipos, la carga de diseño era 30 ton, por lo tanto las cargas de prueba serían 45 ton. (1,5 veces), 21 ton. (0,7 veces), 33 ton (1,1 veces) y la tasa de variación de carga vertical sería 4 ton cada 5 segundos.

Debía medirse la deformación vertical de cada uno de los aisladores puestos uno sobre el otro, en disposición similar a la adoptada para el ensayo de compresión sostenida (Cap 7.2.1 a)). Se tomaron datos cada 4 toneladas de carga y se realizó 3 ciclos completos. También debía registrarse si aparecían grietas superficiales en la goma.

De los resultados se obtendría la rigidez vertical de los aisladores y se verificaría la no aparición de grietas en la goma.

#### c).- Ensayo estático, carga horizontal:

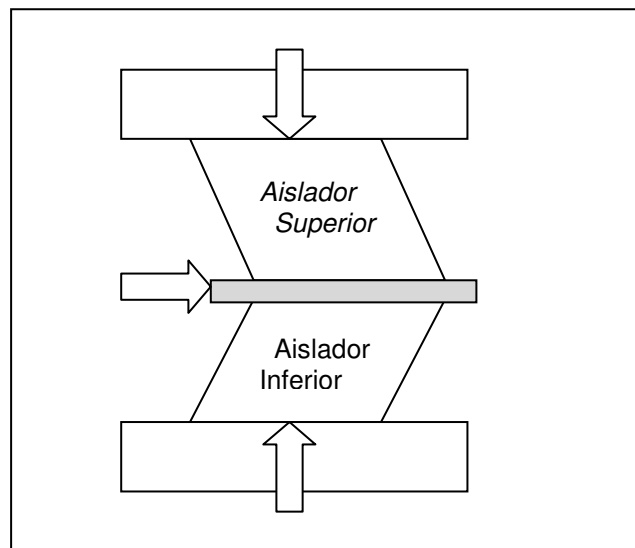
Cada aislador debe cargarse lateralmente hasta alcanzar la deformación horizontal máxima de diseño. Su definición se describe en el capítulo 4.3 y corresponde a 19 cm. Simultáneamente el aislador se mantiene comprimido verticalmente con la carga de diseño que es 30 ton.



Para realizar adecuadamente esta experiencia se debió resolver varios desafíos. Para lograr deformar horizontalmente se debió nuevamente recurrir a la conformación de un aislador sobre otro, aplicando la carga horizontal en la placa intermedia del par de aisladores hasta la máxima deformación que permitiera el gato, que era 7 cm. En esa posición, los aisladores deformados eran sostenidos, el gato descargado y se modificaba la posición del embolo del gato. Esto permitía cargar nuevamente hasta 14 cm y se repite el proceso, luego se carga hasta obtener la deformación de 19 cm. Este método generó varias condicionantes en el diseño del marco de reacción descrito en el capítulo 7.1

Se debía medir la deformación horizontal cada 0,5 ton de carga y la carga con que se alcanzaba la deformación máxima de 19 cm. Adicionalmente en tal posición de máxima deformación se debe verificar que no apareciesen de grietas en las paredes del aislador ni se observase alguna falla por estabilidad.

Durante el proceso de descarga nuevamente se medía las deformación horizontal cada 0,5 ton de disminución de carga. La disposición se indica en el Esquema 2



Esquema 2: Disposición. Ensayo estático, carga horizontal.

d).- Carga horizontal dinámica:

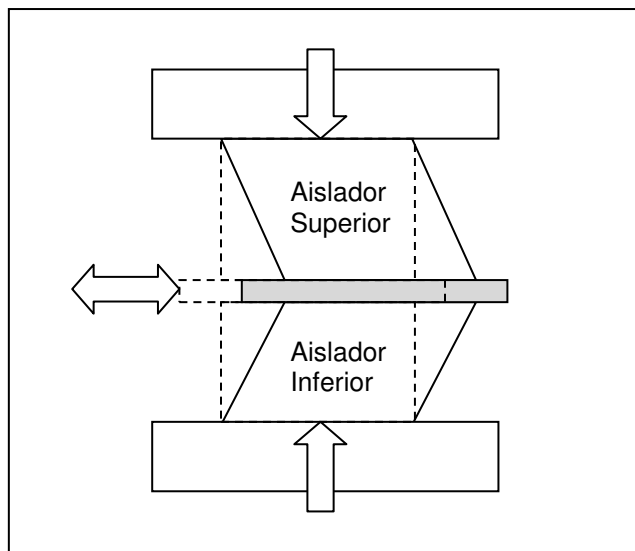
Para reproducir aproximadamente el comportamiento del aislador durante un sismo se debió efectuar un ensayo en que el aislador se deforme horizontalmente hasta el desplazamiento máximo hacia ambos lados, manteniendo un período de 2 segundos y comprimido verticalmente con la carga de diseño.

La disposición del Laboratorio de Idiem, que representaba uno de los con mayor capacidad en Chile para este tipo de ensayos, más la incorporación del marco de reacción descrito en el capítulo 7.1, permitía efectuar el ensayo descrito de la siguiente manera: un ensayo cíclico con período de 2 seg, alcanzando un desplazamiento máximo de 4 cm. para cada lado y carga vertical

simultánea (ver disposiciones en Anexo 2), o bien efectuar un ensayo no simétrico, con período de 2 seg pero con desplazamiento máximo de 8 cm en un solo sentido.

En esta etapa del estudio resultaba ambicioso realizar ambos tipos de ensayo dada la dificultad para instalar el sistema del ensayo simétrico y la falta de experiencia en su funcionamiento, y considerando que el desplazamiento del ensayo en el caso simétrico era pequeño comparado con el desplazamiento máximo teórico, se optó por dejar para una etapa posterior el ensayo dinámico hacia ambos lados y se efectuó sólo el ensayo cíclico no simétrico. Esto aportaría la experiencia para que a posteriori se realice el ensayo simétrico además del no simétrico.

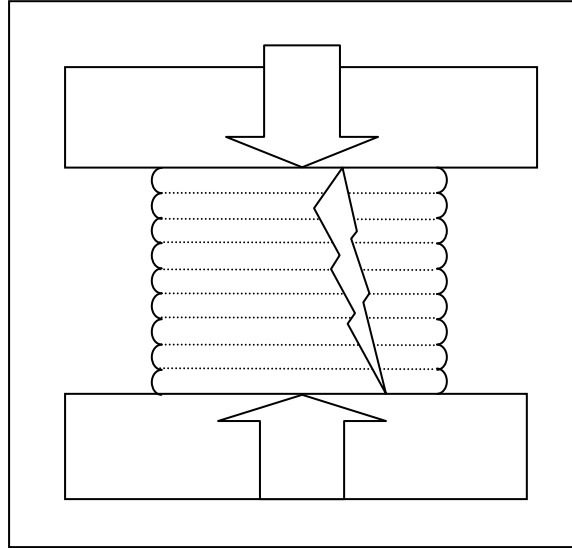
Por lo tanto, la prueba consistió en someter el par de aisladores, nuevamente ubicados uno sobre otro, a deformaciones cíclicas horizontales entre 1 y 7 cm. con un periodo aproximado de dos segundos, simultáneamente los aisladores estaban sometidos permanentemente a una carga vertical de 30 ton. Se registraron los ciclos carga- deformación en forma digital y las deformaciones máximas y mínimas a través de diales. Además, mediante inspección visual se verificaba la aparición de grietas o de fallas por deformación de las placas metálicas. La disposición se indica en el Esquema 3



Esquema 3: Disposición. Ensayo Carga Horizontal Dinámica

e).- Compresión hasta la rotura

Otra información que se consideraba valiosa fue reconocer alguno tipos de falla del aislador, siendo uno de ellos la falla por carga vertical, o también, verificaría la bondad del sistema para mantenerse sin fallas al sobrepasar niveles de carga extraordinarios lo que permitiría analizar los factores de seguridad. Se debe recordar que la combinación de la goma confinada con el acero tiene el objetivo de resistir las cargas verticales. De este modo, a uno de los prototipos se sometió a una carga vertical hasta la rotura. Se registró la deformación vertical cada 10 ton de carga y en caso que se detectaran síntomas de falla se aumentaría el número de medidas según fuese la forma de colapso. La disposición se indica en el Esquema 4.



Esquema 4: Disposición Ensayo Compresión hasta la rotura.

### 7.3 Resultados de Ensayos de los Prototipos

El par de aisladores se sometió a la serie de ensayos descritos en el capítulo anterior. Simultáneamente se hicieron las pruebas de corte, dureza, compresión sostenida, tracción y elongación descritos en el capítulo 5.2 para la goma con que se fabricaron los prototipos. Para esto se extrajeron muestras del caucho amasado en etapa previa a su vulcanización.

Los ensayos de la goma mostraron que satisfacía los rangos esperados, incluso un adecuado amortiguamiento, mas se detectó que el módulo de corte, como resultado de la prueba de corte, tenía un valor considerablemente superior al que se esperaba. Estos resultados se muestran en Anexo 1. La diferencia pudo estar provocada por el proceso de vulcanizado, aunque se siguió la misma metodología para la fabricación de las probetas de goma descrita en el cap 5.4.1. Como conclusión, los resultados de los ensayos de los aisladores debieron ser analizados considerando este hecho.

Una manera de mitigar lo anterior era efectuando las pruebas de la goma antes que la fabricación de los aisladores, o bien realizar un control más riguroso en la fabricación de las probetas para verificar que la metodología sea la misma.

Una meta importante de alcanzar podría ser que a través de los ensayos de las gomas sea posible predecir el comportamiento del aislador, sin necesidad de someter todos éstos a ensayos. Se concluyó que era recomendable monitorear los resultados de ensayos a realizar en estudios posteriores para efectuar correlaciones entre resultados de la goma y de los aisladores.

Ahora bien, los resultados de las gomas arrojaron que el módulo de corte era mayor que el requerido, pronosticándose que si el aislador presentaba una rigidez al 50% de deformación mayor que 160 Kg/cm se traduce en un menor grado de aislación pero aún efectivo. Esto es, que

el periodo propio del edificio del estudio complementario se reducía de 2,0 seg esperado a 1,7 seg, que en comparación con los 0.5 seg de período del edificio sin aislar sigue teniendo un grado de aislación bastante efectivo.

Por otro lado, como los ensayos no estaban normalizados, es posible que no se hayan tomado las precauciones necesarias para mantener constantes otros factores, como por ejemplo, velocidad de ensayo, temperatura ambiente, tiempo transcurrido desde el vulcanizado, etc. Esto apuntó a insistir en que un tema de estudio podría ser analizar la influencia de estos factores en los resultados de los ensayos, tanto de la goma como de los aisladores terminados.

A continuación se presenta los resultados y conclusiones de los ensayos efectuados sobre los aisladores.

- Compresión sostenida.

Se mantuvo el par de aisladores por 12 horas cargado con 45 ton verticales, registrando la deformación vertical de cada aislador.

Se apreció que durante las primeras cuatro horas la deformación aumentó sin que la carga aumentara, esto indicaba una relajación del aislador a carga constante. Pasadas las 4 horas, la deformación tiende a un valor fijo y es posible deducir que la deformación alcanzó un límite máximo a carga constante.

Se observó una estabilización entre la cuarta y décima hora, hacia un valor levemente superior al que se alcanzó en las primeras 4 horas, la cual no se debió a una falla en los aisladores ya que ambos se comportaron de la misma manera en forma independiente. La posible explicación que es por el método de ensayo, en que se mantenía la carga aproximadamente constante mediante bombas hidráulicas y cualquier relajación de la goma producía un descenso de la carga aplicada, la que en el momento de ajustarla y aumentarla provocaba que la goma se deformara por variación de carga. Una recomendación que surgió fue que este ensayo se efectuara con carga gravitacional para evitar que ocurrieran esas alteraciones.

Los resultados arrojaron que la deformación vertical tiene un límite aproximado de 4 mm para carga permanente y de valor 1,5 veces la carga de diseño. Esta deformación no afectaría la estructura a aislar, puesto que todos los aisladores debieran presentar un descenso similar que además es paulatino a medida que se levantan los pisos del edificio y la carga real difícilmente sobrepasaría el 80% de la carga aplicada en el ensayo.

No se apreció falla alguna en los aisladores y estos recuperaron instantáneamente su altura inicial una vez descargados.

- Deformación horizontal máxima.

Debido a que este ensayo no destructivo fue el más exigente de la serie, se puede considerar satisfactorio el hecho que los aisladores no resultaron con daño alguno después de deformarlos horizontalmente hasta 19 cm la primera ocasión y 16 cm. la segunda. Sólo se apreció una pequeña deformación remanente horizontal del orden de 8 mm en el sentido de aplicación de la carga horizontal, que era producto de la falta de simetría del ensayo, sollicitación que no ocurre en

la realidad, ya que las deformaciones son alternadas. Sin ir más lejos, bastó con aplicar una deformación de 3 cm en el otro sentido para que se recuperara la forma original del aislador.

Se destacó la influencia del método de ensayo en los resultados, en relación al efecto de mantener sostenido el aislador durante algún tiempo mientras se acomodaba el gato. El aislador se relajaba y sufría una deformación adicional con sólo recuperar la carga que tenía inicialmente, fenómeno que afectó también al ensayo de compresión vertical permanente. Se concluyó que la velocidad de ensayo influyó en los resultados. En este caso la tasa de deformación fue de 1 cm cada 2 minutos aproximados en aquellos tramos de ensayos continuos.

Si se desestimaba la relajación de la goma para este ensayo estático se podía apreciar que a medida que la deformación era mayor se requería menos carga para aumentarla, incluso llegando al extremo en que cerca del límite máximo la deformación aumentaba prácticamente a carga constante. Pero a pesar de lo estático de la prueba y de las relajaciones sucesivas de la goma, para alcanzar la deformación máxima se requirió aplicar una carga superior a 4 toneladas, lo que equivalía a una rigidez secante de 220 Kg/cm. considerablemente superior a la utilizada en la modelación del edificio a aislar del estudio complementario.

Además, se detectó que para pequeñas deformaciones (1cm), la rigidez tenía un valor aproximado a 500 Kg/cm lo que no satisfizo el requisito que esta rigidez fuera 4 veces mayor que la de diseño para 50% de deformación.



Figura N°12, Reproducción de Ensayo de Deformación horizontal máxima.

- Compresión alternada

El par de aisladores puestos uno sobre otro se cargó verticalmente a una tasa de 4 ton cada 5 segundos hasta alcanzar 20 ton en la fase de preparación, se mantuvo esta carga durante un minuto y se marcó como deformación cero. Se hizo 20 ciclos entre 20 y 33 ton a una tasa de 1 ton cada 5 seg. Se registró la carga y deformación vertical cada 5 seg.

En el proceso de preparación se apreció que la rigidez se mantuvo constante para los niveles de carga.

Los aisladores tendieron a relajarse ante la carga vertical, registrando una deformación mayor que cero al retomar 20 ton de carga. Esto reflejó que los aisladores podrían sufrir este fenómeno puestos bajo la estructura en caso de cargas verticales variables.

En los ciclos de carga y descarga aparecían curvas de histéresis a pesar de la baja velocidad del ensayo. Esto refleja que existe algún grado de amortiguamiento vertical que podía ser útil como aislación ante vibraciones como las producidas por un ferrocarril subterráneo. El amortiguamiento no fue cuantificable puesto que el ensayo fue demasiado lento y las vibraciones aludidas son de alta frecuencia.

Lo principal a rescatar de los ciclos resultantes fue la rigidez vertical, que como se ha descrito se debía verificar que fuera al menos 400 veces mayor que la rigidez horizontal. Esta gran rigidez vertical está orientada a evitar que aparezcan esfuerzos por asentamientos diferenciales en la losa o viga que va sobre los aisladores.

Para el aislador superior se obtuvo una rigidez vertical de 33.3 ton/cm y para el aislador inferior, 26,7 ton/cm

Del ensayo estático horizontal se obtuvo, para una deformación horizontal de 50%, una rigidez horizontal de 250 kg/cm, por lo que se obtiene:

$$\frac{K_v}{K_h} = \frac{33.000 \text{ kg/cm}}{250 \text{ kg/cm}} = 130$$

Y como

$$\left(\frac{f_v}{f_h}\right)^2 = \frac{K_v}{K_h} = 130$$
$$\frac{f_v}{f_h} = 11.4$$

No se verificó que la frecuencia esperada vertical fuera al menos 20 veces mayor que la frecuencia esperada horizontal.

Sí se verificó que las rigideces verticales de ambos aisladores son similares, demostrando algún grado de homogeneidad en la producción de aisladores.

Una vez descargados los aisladores, se detectó una deformación remanente de 2 mm, que se recuperó al cabo de algunos minutos.

No se apreció ningún tipo de falla, ni a través de resultados ni en forma visual. No se detectó inestabilidad del par de aisladores y no se apreció ninguna grieta superficial.

-Ensayo de carga horizontal dinámica.

Se efectuó el ensayo para el par de aisladores, midiendo aproximadamente 50 ciclos, con cargas verticales de 30 y 25 ton.

Se obtuvo la carga aplicada promedio entre ambos aisladores y la deformación horizontal en la placa interaisladores, seis valores por ciclo. Se superpuso cinco ciclos sucesivos para formar un ciclo representativo del rango.

Por otra parte, para cada ciclo representativo se obtuvo la rigidez secante y el amortiguamiento. También se obtuvo el porcentaje de deformación máxima del ciclo.

El amortiguamiento se extrae del área encerrada por el ciclo de histéresis según la siguiente relación

$$\beta = \frac{W_d}{2 \pi K \text{Def}_{eq \text{ máx}}^2} * 100 \quad \beta : \text{porcentaje de amortiguamiento crítico}$$

$W_d$  (ton-cm) ; área encerrada por la curva Fuerza vs Deformación

$K$ ; (ton/cm) rigidez al corte secante

$\text{Def}_{eq \text{ máx}}$  (cm) : deformación equivalente máxima considerando eje centrado, se obtiene de:

$$\frac{\text{Def}_{\text{máx}} - \text{Def}_{\text{mín}}}{2}$$

La rigidez del aislador se obtuvo de cada ciclo, dada por la rigidez secante.

$$K = \frac{C_{\text{máx}} - C_{\text{mín}}}{\text{Def}_{\text{máx}} - \text{Def}_{\text{mín}}}$$

Siendo:  $C_{\text{máx(mín)}}$  = Carga máxima(mínima) de cada ciclo

$\text{Def}_{\text{máx(mín)}}$  = Deformación en cada ciclo, máxima(mínima)

De la observación de los ciclos y de los valores obtenidos se pudo concluir que:

- A medida que los ciclos se suceden, el par de aisladores tiende a relajarse, aumentando la deformación para los mismos niveles de carga máxima y mínima. Una vez finalizado el ensayo los aisladores quedaron con una deformación horizontal remanente de 0.8 cm.
- La forma de las curvas representativas refleja que los ciclos son histeréticos similares a los obtenidos en los ensayos de corte sobre las probetas de goma. Los valores de rigideces horizontales obtenidos promediaban los 635 Kg/cm para los casos con 30 ton y 25 ton de carga vertical respectivamente, ambos casos dentro de un rango de 33% de deformación.
- El amortiguamiento resultó de 11.5% para los aisladores sometidos a 30 ton de carga vertical, y 14,3% de amortiguamiento para los sometidos a 25 ton.
- El fenómeno de relajación de los aisladores en este ensayo se debió principalmente a que las deformaciones eran aplicadas en un solo sentido, asimilándose a una carga horizontal en una sola dirección. Si las deformaciones fuesen simétricas, como ocurre durante un sismo no se apreciaría relajación, ni los aisladores quedarían con deformación remanente de importancia.
- La similitud de forma en los ciclos histeréticos de este ensayo y la pruebas de corte indicó que podía ser posible pronosticar los resultados de los ensayos a escala natural a través de los ensayos sobre probetas de goma. Cabe, entonces, proponer lo anterior como un tema de estudios interesante.
- Por otra parte, la forma de las curvas reflejaba que la goma tenía un grado de amortiguamiento suficiente, que se traduce en valores entre 11% y 15% del amortiguamiento crítico. Se debe recordar que un amortiguamiento de 10% se consideraba que satisfacía los requerimientos de disipación de energía a aportar por los aisladores.
- Las deformaciones horizontales de 33% se sitúan en un rango menor al 50% en que se definieron los rangos de rigidez y amortiguamiento. Experiencias extranjeras y los ensayos sobre probetas arrojaron que a medida que la deformación aumenta el amortiguamiento y la rigidez disminuyen. El amortiguamiento, cuyo valor resultaba sobre 10%, podía esperarse que al aumentar las deformaciones hasta 50%, el valor de amortiguamiento se mantenga cercano a aquel valor. Respecto de la rigidez horizontal, presentó un valor demasiado alto, aun estando en deformaciones bajas.

El sistema de adquisición de datos, a pesar que respondía a una condición dinámica, requería que se efectuara una calibración. Esto hizo que los resultados fueran de carácter referencial hasta efectuar dicho proceso.



## **- Ensayo de compresión hasta la rotura.**

Con el objetivo de descubrir la forma en que el aislador fallaba para cargas verticales, se sometió uno de los aisladores a una carga vertical hasta 205 toneladas en forma paulatina, esto es, más de seis veces la carga de diseño.

Se apreció claramente la esperada deformación en barril de cada lámina de goma en su contorno apareciendo el efecto de confinamiento provocado por las placas metálicas

La deformación vertical que se alcanzó fue de 3,8 mm para 205 toneladas, siendo esta distribuida en forma uniforme en las 30 láminas que componen el aislador, cada uno se deforma 0,48 mm, menos que 7%.

Otra forma de detectar que no hubo fallas fue mediante la curva de carga versus deformación. La relación fue prácticamente una recta y no se apreció ningún cambio de pendiente ni salto que acusara falla interna.

Además, se midió la deformación horizontal del aislador a media altura para detectar deformaciones por estabilidad. Esta no sobrepasó los 1.5 mm con una carga vertical de 205 ton.

Al descargar el aislador se mantuvo una deformación horizontal remanente de 1.2 mm, que fue disminuyendo paulatinamente hasta desaparecer al cabo de algunas horas.

Se concluyó que el aislador probado tuvo una capacidad resistente a la compresión mayor que la teórica y fue posible deducir que si no hay problemas de fabricación, este tipo de aisladores se puede utilizar en edificio del estudio complementario. Si los valores obtenidos del ensayo fueran una realidad para todos los aisladores, su resistencia se compararía a la resistencia característica de un bloque de hormigón con dimensiones similares.

En resumen, los resultados llevaron a recomendar un análisis más a fondo de la aplicabilidad de la teoría para dimensionar los aisladores, y sobre todo porque la estabilidad vertical es la que controla el dimensionamiento e incluso se llegó a exigir a la goma propiedades difíciles de obtener debido a ese requisito.

## **8. CONCLUSIONES**

Los primeros pasos para introducir la tecnología de la aislación sísmica mediante apoyos de caucho (goma) con láminas de acero que fueron parte de este estudio, efectuado entre los años 1988 y 1990, se consideraron exitosos. Sin embargo, algunos objetivos iniciales fueron cambiando durante el desarrollo, como por ejemplo que los prototipos fabricados pudieran utilizarse directamente en el sistema de aislación del edificio de vivienda económica de 4 pisos, pero sin duda la experiencia sentó las bases para los estudios posteriores que desembocarían en la fabricación de los aisladores finales.

Efectuar la fabricación de los primeros prototipos de aisladores sísmicos, definir y efectuar los ensayos de prueba fueron un desafío inmenso en el que hubo que pasar un sin número de barreras, buscando soluciones creativas en todas las etapas.

Se pudo confirmar que el elemento más sencillo que aporta flexibilidad era la goma y que confinando la goma mediante placas metálicas horizontales intercaladas se obtiene una gran capacidad resistente y gran rigidez ante las cargas verticales.

Se confirmó que es posible generar en Chile una goma de alto amortiguamiento con materia prima disponible en Chile, a un bajo costo y de fácil fabricación y que se puede utilizar la tecnología disponible en Chile para fabricar y probar aisladores sísmicos y sus componentes.

Los criterios adoptados para el diseño teórico de los aisladores dieron paso a prototipos que presentaron características que se aproximan bastante a la solución requerida, como era el requisito de generar un período propio de 2 seg en el edificio aislado. Los parámetros que se verificaron fueron; capacidad resistente a la compresión, flexibilidad, desplazamiento horizontal, alta rigidez vertical y estabilidad al volcamiento.

La capacidad resistente de la goma a compresión no confinada  $\sigma_g = 110 \text{ kg/cm}^2$  cuyo valor fue obtenido de experiencias de fabricantes de goma chilena dio buenos resultados como dato inicial del componente goma y si además se aplica un factor de seguridad FS=2 se obtiene un área resistente que permite asegurar la estabilidad al pandeo y volcamiento.

El test denominado Ensayo de Corte, proporcionó adecuadamente el valor del módulo de corte G y mostró como varía este valor según la deformación máxima de goma. Se verificarón conceptos como que a bajas deformaciones G es alto y disminuye para deformaciones mayores. También se confirmó que para efectos de diseño y análisis, utilizar el módulo de corte G obtenido con deformaciones de corte de 50%, denominado  $G_{50}$ , es adecuado.

Los componentes para generar la goma más importantes son:

- Caucho natural
- Negro de Humo
- Azufre
- Acelerante (CBS).

La fórmula de la goma que se ajustó más a los requerimientos del polímero fue una variación menor de la obtenida de un documento con las especificaciones técnicas para la construcción de aisladores sísmicos en Italia, preparado por el Dr. James Kelly. Esta fue procesada en la pequeña fábrica nacional.

Procesos de vulcanizado, presión y temperatura se consideraron adecuados, tanto para las probetas de goma como para los prototipos de aisladores. No hubo cuestionamientos observados ni medidos en la calidad de la goma asociado al vulcanizado. Se aplicó una temperatura de 130°

por 12 horas a una presión efectiva para los prototipos de 970 Psi, para las probetas de goma la presión efectiva fue considerablemente mayor y distinta en cada caso.

Las matrices para la fabricación de probetas, especialmente las de prueba de corte, resultaron adecuadas.

Los ensayos de la prueba de corte dinámico efectuados en el Laboratorio de Vialidad, en la máquina de ensayos MTS, y los resultados obtenidos fueron satisfactorios, entregando los valores del módulo de corte y del amortiguamiento de la goma. El diseño de la mordaza para fijar la probeta al actuador y las probetas mismas cumplieron su objetivo.

Los resultados que permitieron seleccionar la goma fueron:

Módulo de corte  $G_{50} = 6.49 \text{ Kg/cm}^2$ ,

Porcentaje de amortiguamiento  $\beta = 10.53 \%$ .

Módulo de corte para pequeñas deformaciones  $G = 26.5 \text{ Kg/cm}^2$ . ( 4 veces  $G_{50}$ )

## 8.1 Conclusiones generales de los fabricación de los aisladores

El proceso de fabricación de los prototipos representaba un punto clave para los objetivos de este estudio, construir el primer aislador sísmico en Chile. Esta etapa además daba inicio a las pruebas sobre el prototipo a escala natural, siendo estas pruebas también pioneras en el campo de la tecnología de entonces.

El método de fabricación de los prototipos mediante comprensión directa fue suficiente, considerando el excesivo aumento de costo al utilizar métodos como la inyección. El molde diseñado para efectuar el vulcanizado, que fue construido parcialmente con materiales reciclados y con aceros de calidades estándares A37-24ES cumplió su objetivo.

El procedimiento de fabricación y posterior desmolde mostró ser efectivo. Si se hubiese instalado algún tipo de termostato inserto en la goma, en el centro del aislador, se habría determinado el momento en que se alcanzaba la temperatura adecuada y así minimizar con gran seguridad el tiempo de aplicación de calor y presión de la prensa, generando un ahorro de energía y tiempo.

El aislador de prueba permitió efectuar todas las verificaciones previas para que fuesen aplicadas en la fabricación de los prototipos, estas fueron:

- Mezcla de la goma
- Grado de vulcanización para así confirmar las condiciones de tiempo, presión y Temperatura de vulcanizado
- Cantidades necesarias de aportar para la conformación de las láminas de goma

- Desmolde
- Verificar la geometría final.
- Apariencia externa

Se concluyó que el espesor de goma cruda necesaria para obtener 7 mm de espesor de cada lámina debió ser de 7.5 mm. La perforación central con que los aisladores quedaban debido al método de fabricación no influyó en forma general en su funcionamiento

Se apreció que ocurre una dilatación térmica equivalente a 3 mm de variación en la altura total del aislador, por lo que se espera que cualquier aislador construido bajo estas condiciones, en caliente tenga proporcionalmente mayor altura que lo esperado. La altura de los aisladores una vez fríos fue de 271 mm, que correspondía a la requerida.

Debido al reducido número de aisladores a fabricar (2) no se alcanzó la experiencia suficiente para optimizar un método de producción, sin embargo, estos dos aisladores dieron la pauta para la fabricación posterior de los aisladores definitivos, al mismo tiempo que se verificó su funcionamiento general.

## **8.2 Conclusiones de los ensayos de los aisladores**

Se pudo concluir que en las pruebas aplicadas a los prototipos se sometieron a los aisladores a condiciones que permitían validar su uso como elementos aisladores para edificios de 4 pisos, por lo tanto se pueden considerar suficientemente adecuadas. Estos ensayos pioneros, además, dieron la pauta para los ensayos que se efectuaron a los aisladores definitivos que se ubicarían bajo el edificio del estudio en la etapa siguiente. A continuación se mencionan diversas conclusiones que se pudieron extraer del estudio.

La infraestructura del laboratorio de ensayo de materiales IDIEM, complementado con los dispositivos de ensayos particulares diseñados para este estudio permitió realizar las pruebas necesarias a los prototipos de aisladores. Los diseños de los dispositivos de ensayos resultaron muy apropiados, quedando incluso adaptados para ensayos previstos para etapas siguientes.

El marco de reacción construido para los ensayos resultó de montaje sencillo, fue de bajo costo, seguro, muy liviano, resistente, flexible para no provocar resistencias a las cargas de ensayo, capaz de efectuar ensayos con desplazamientos horizontales con la simultaneidad de aplicación de cargas verticales y muy adaptable, lo que permitió efectuar las 5 pruebas necesarias.

La utilización de pasadores para ligar los aisladores entre ellos y al marco de reacción no presentó inconvenientes.

Se verificó que el pulsador AMSLER para gatos múltiples cumplió su objetivo y se concluyó que permitiría, gracias al acumulador de nitrógeno, efectuar las pruebas futuras de carga vertical simultánea con carga horizontal dinámica bidireccional.

El espesor de láminas (1 mm) y la calidad (acero comercial CAP) considerados fue más que satisfactorio, al mismo tiempo que la adherencia lograda contra esta lámina producto de la serie de tratamientos superficiales a las placas metálicas y pegamentos superó todas las expectativas. No apareció falla alguna relacionada con el acero o su ligazón con la goma.

La secuencia de ensayos, toma de resultados e infraestructura concluyó que es absolutamente viable efectuar ensayos a cada uno de los aisladores que fueran a ser utilizados bajo edificios. Sin duda se debería estudiar si los ensayos generan algún tipo de degradación.

De antemano se descarta efectuar ensayos con aplicación de cargas más allá de las de diseño como fue el ensayo de Compresión hasta la Rotura.

Se debe aclarar que la metodología que se usó en los ensayos estaba íntimamente asociada a los recursos disponibles y a los objetivos del estudio, sabiendo que serían mejorados hasta acercarse a una norma general.

- Algunas Conclusiones particulares de los ensayos de los aisladores fueron las siguientes:

La etapa de ensayos de los prototipos permitió verificar parcialmente los valores teóricos esperados para cumplir los requerimientos de la aislación sísmica.

El resumen de las pruebas efectuadas a los aisladores, fueron las siguientes:

- a).- Compresión sostenida
- b).- Compresión variable
- c).- Carga horizontal estática
- d).- Carga horizontal dinámica
- e).- Compresión hasta la rotura.

Una meta importante de alcanzar podría haber sido que a través de los ensayos de las gomas sea posible predecir el comportamiento del aislador, sin necesidad de someter todos estos a ensayos. Se concluyó que era recomendable monitorear los resultados de ensayos a realizar en estudios con posterioridad para efectuar correlaciones entre resultados de la goma y de los aisladores.

Se verificó a través de los ensayos de compresión, que las rigideces verticales de ambos aisladores eran similares, demostrando algún grado de homogeneidad en la producción de aisladores. Una vez descargados los aisladores se detectó una deformación remanente de 2 mm, que se recuperó al cabo de algunos minutos. No se apreció ningún tipo de falla, ni a través de resultados ni en forma visual. No se detectó inestabilidad del par de aisladores y no se apreció ninguna grieta superficial.

Una recomendación que surgió fue que este ensayo de Compresión sostenida se efectuara con carga gravitacional para evitar que ocurrieran fenómenos por ajuste de cargas frente a relajaciones del aislador.

Además, se detectó que para pequeñas deformaciones (1cm), la rigidez tenía un valor aproximado a 500 Kg/cm, lo que no satisfizo el requisito de que esta rigidez fuera 4 veces mayor que la de diseño para 50% de deformación.

El ensayo de carga horizontal estática permitió que el desplazamiento horizontal máximo, obtenido de la Norma Americana (SEAO 89), cuyo valor fue 19 cm, fuera verificado, y los aisladores no presentaron falla alguna al alcanzar esta deformación. Para obtener este desplazamiento se requirió efectuar sobre los aisladores una carga de aproximadamente 4 ton, lo que coincidió con lo previsto en la etapa de diseño. Sólo se apreció una pequeña deformación remanente horizontal del orden de 8 mm en el sentido de aplicación de la carga horizontal por la falta de simetría del ensayo. Bastó con aplicar una deformación de 3 cm en el otro sentido para que se recuperara la forma del original del aislador. La aplicación de las cargas horizontales por etapas, resultó satisfactoria, a pesar que se detectaron fenómenos de relajación de la goma.

Por otro lado, como los ensayos no estaban normalizados es posible que no se hayan tomado las precauciones necesarias para mantener constante otros factores como por ejemplo, velocidad de ensayo, temperatura ambiente, tiempo transcurrido desde el vulcanizado, etc. Esto apuntó a insistir en que un tema de estudio podía ser analizar la influencia de estos factores en los resultados de los ensayos, tanto de la goma como de los aisladores terminados.

Se detectó que el ensayo de carga horizontal dinámica puede ser mejorado al aplicar las cargas en ambos sentidos y que el sistema de medición de cargas y deformación dinámicas debía ser calibrado exhaustivamente para garantizar la simultaneidad de las mediciones.

Se verificó que la rigidez horizontal del aislador se reduce al cargar al aislador verticalmente.

No se pudo satisfacer el requerimiento de que la frecuencia horizontal superara la frecuencia vertical en más de 20 veces, llegando sólo a 11 veces. Este valor se obtuvo de la relación entre la rigidez vertical y la horizontal, pero para la rigidez vertical se obtuvo en forma indirecta de ensayos que tenían otros objetivos, por lo tanto los ensayos pudieron no ser los más adecuados para obtener dicho parámetro.

En el Ensayo de carga horizontal dinámica, a medida que los ciclos se sucedían, el par de aisladores tendió a relajarse, aumentando la deformación para los mismos niveles de carga máxima y mínima. Una vez finalizado el ensayo los aisladores quedaron con una deformación horizontal remanente de 0.8 cm. La forma de las curvas representativas refleja que los ciclos son histeréticos similares a los obtenidos en los ensayos de corte sobre las probetas de goma.

El amortiguamiento resultó de 11.5% para los aisladores sometidos a 30 ton de carga vertical, y 14,3% de amortiguamiento para los sometidos a 25 ton. El fenómeno de relajación de los aisladores en este ensayo se debió principalmente a que las deformaciones eran aplicadas en un solo sentido. Como las deformaciones durante un sismo no se producen en dirección ni sentido preferencial, no se apreciaría relajación, ni los aisladores quedarían con deformación remanente.

Al aplicar una carga vertical de hasta 205 toneladas en el Ensayo de compresión hasta la rotura, se apreció claramente la esperada deformación en barril de cada lámina de goma en su contorno apareciendo el efecto de confinamiento provocado por las placas metálicas. La deformación vertical que se alcanzó fue de 3,8 mm. Se concluyó que el aislador probado tuvo una capacidad resistente a la compresión mayor que la teórica y fue posible deducir que si no hay problemas de fabricación y este tipo de aisladores se utilizarán en el edificio del estudio complementario debieran resistir la carga vertical de diseño sin ninguna dificultad e incluso mucho más.

## **9. BIBLIOGRAFÍA**

- 1.- Kelly, James (1987) Comunicación Personal
- 2.- Tarics, A.G. , J. Kelly, D.Way y R.Holland (1986), “ Quality Assurance and Control of Fabrication for a High-Damping-Rubber base Isolation System”. Proc. ,Seminar and Workshop on Base Isolation and Passive Energy Disipation, ATC, March 1986, San Francisco, Cal EE.UU
- 3.- Seismic Isolation Design Requirements, “Structural Engineers Association of Northern California" (SEAOC).
- 4.- Alejandro Figueroa, Diseño Sísmico de Edificios de Vivienda con Aislación en la Base. (1990), Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. Universidad de Chile.
- 5.- Julio Yoma, Diseño Sísmico de Edificios Publicos de Hormigón Armado con Aislación en la Base. (1990), Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. Universidad de Chile.

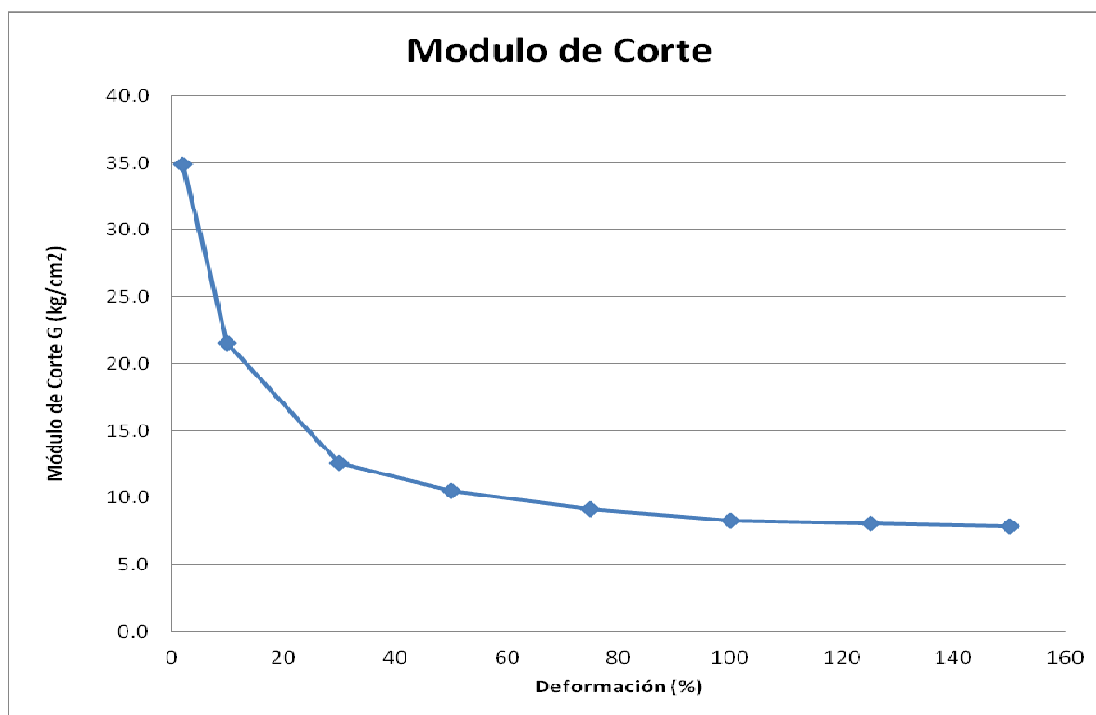
## **10. ANEXOS**

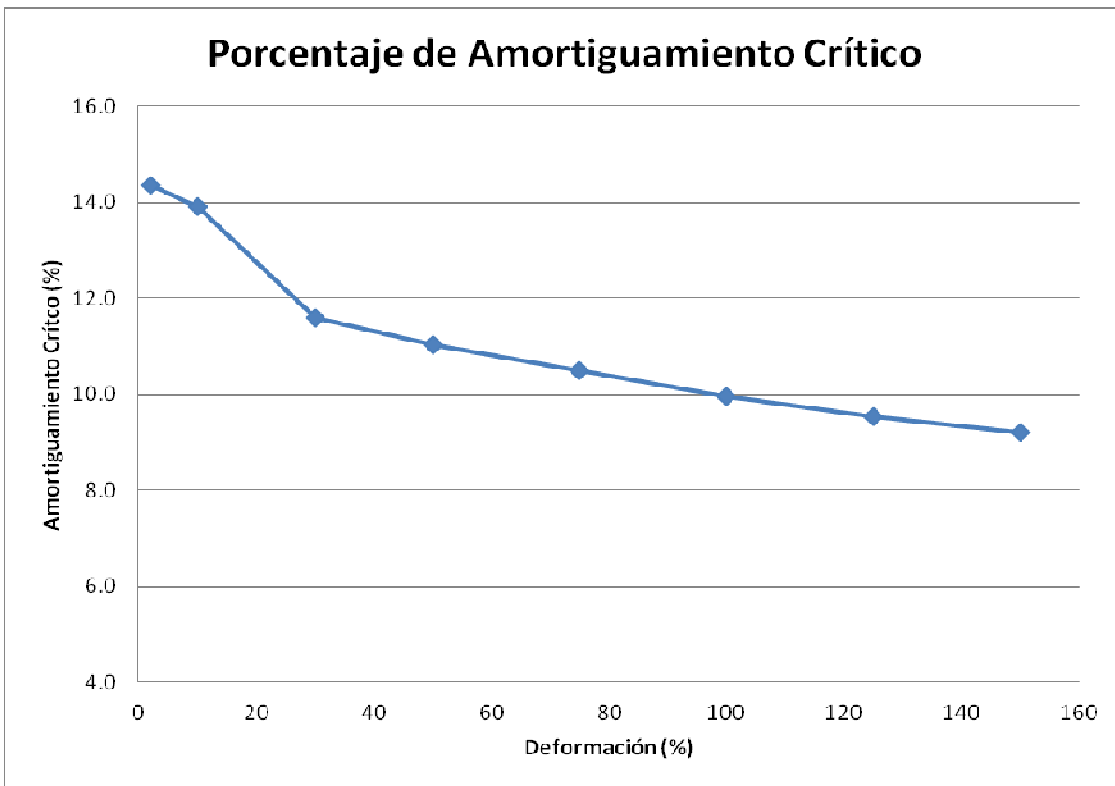


## Anexo 1 Resultados ensayos de la goma utilizada en prototipos

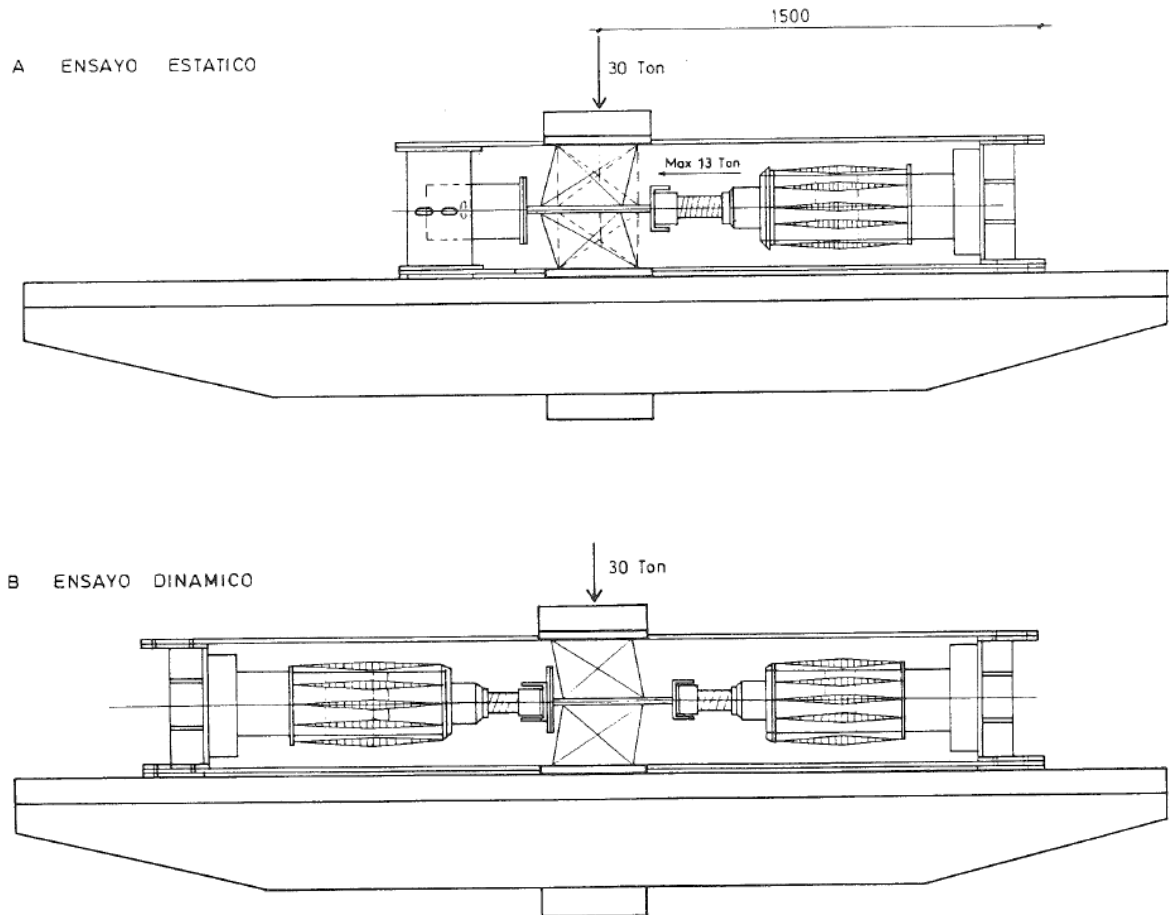
DEFORMACIÓN (%)	Modulo de Corte (kg/cm <sup>2</sup> )				Porcentaje de Amort. Crítico (%)			
	Probetas			Prom	Probetas			Prom
	A	B	C		A	B	C	
2	30.2	47.8*	39.6	34.9	15.4	12.8*	13.3	14.4
10	17.6*	21.8	21.3	21.6	14.3*	13.9	13.9	13.9
30	27.7*	12.8	12.3	12.6	12.7*	11.6	11.6	11.6
50	11.2	10.2	10	10.5	11.3	10.9	10.9	11.0
75	9.3	8.9	9.2	9.1	10.5	10.5	10.5	10.5
100	8.6	8.3	7.8	8.2	10.1	9.9	9.9	10.0
125	8.3	8	7.7	8.0	9.6	9.5	9.5	9.5
150	8	7.9	7.5	7.8	9.4	9.1	9.1	9.2

(\*) No considerados en valor promedio

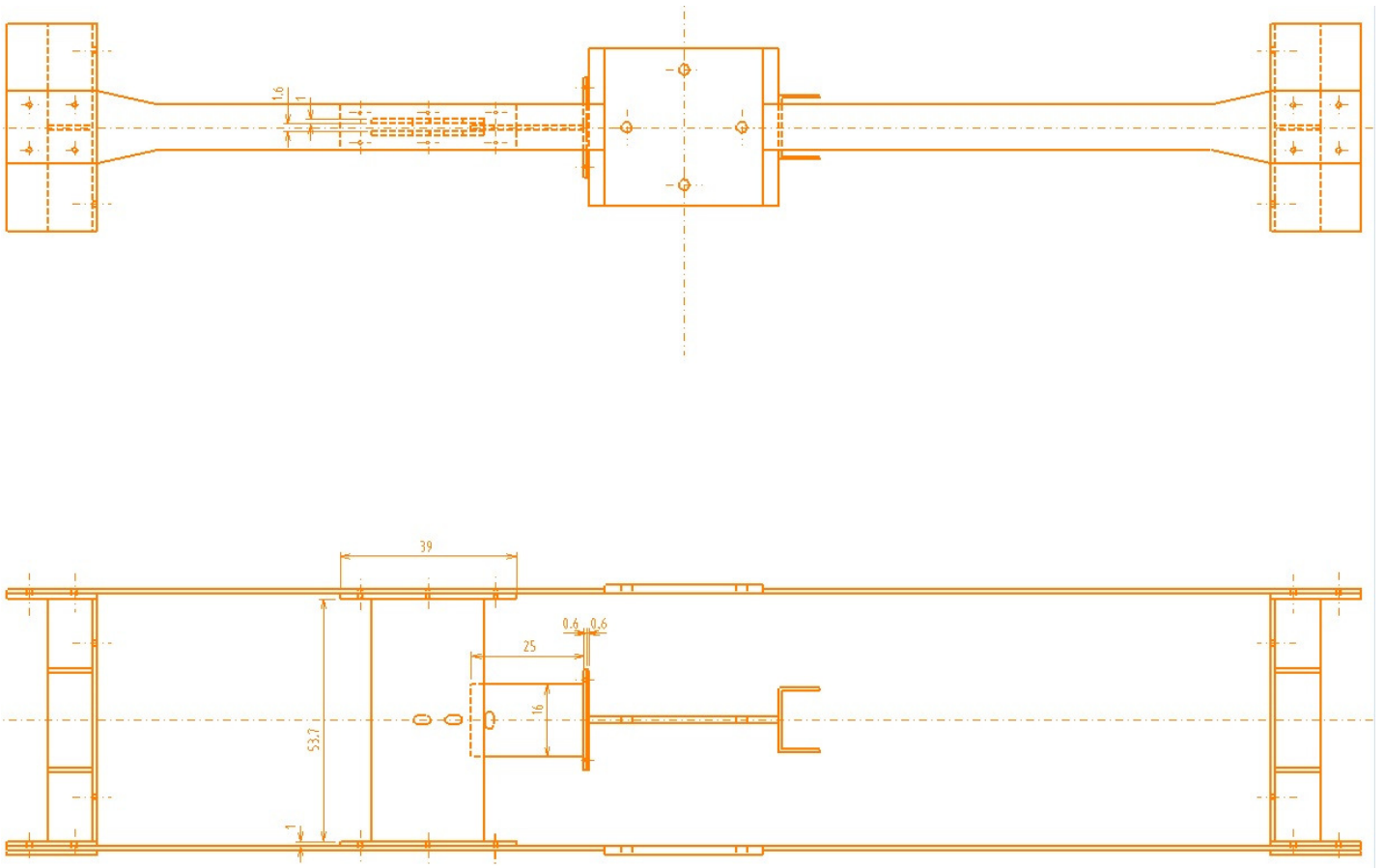




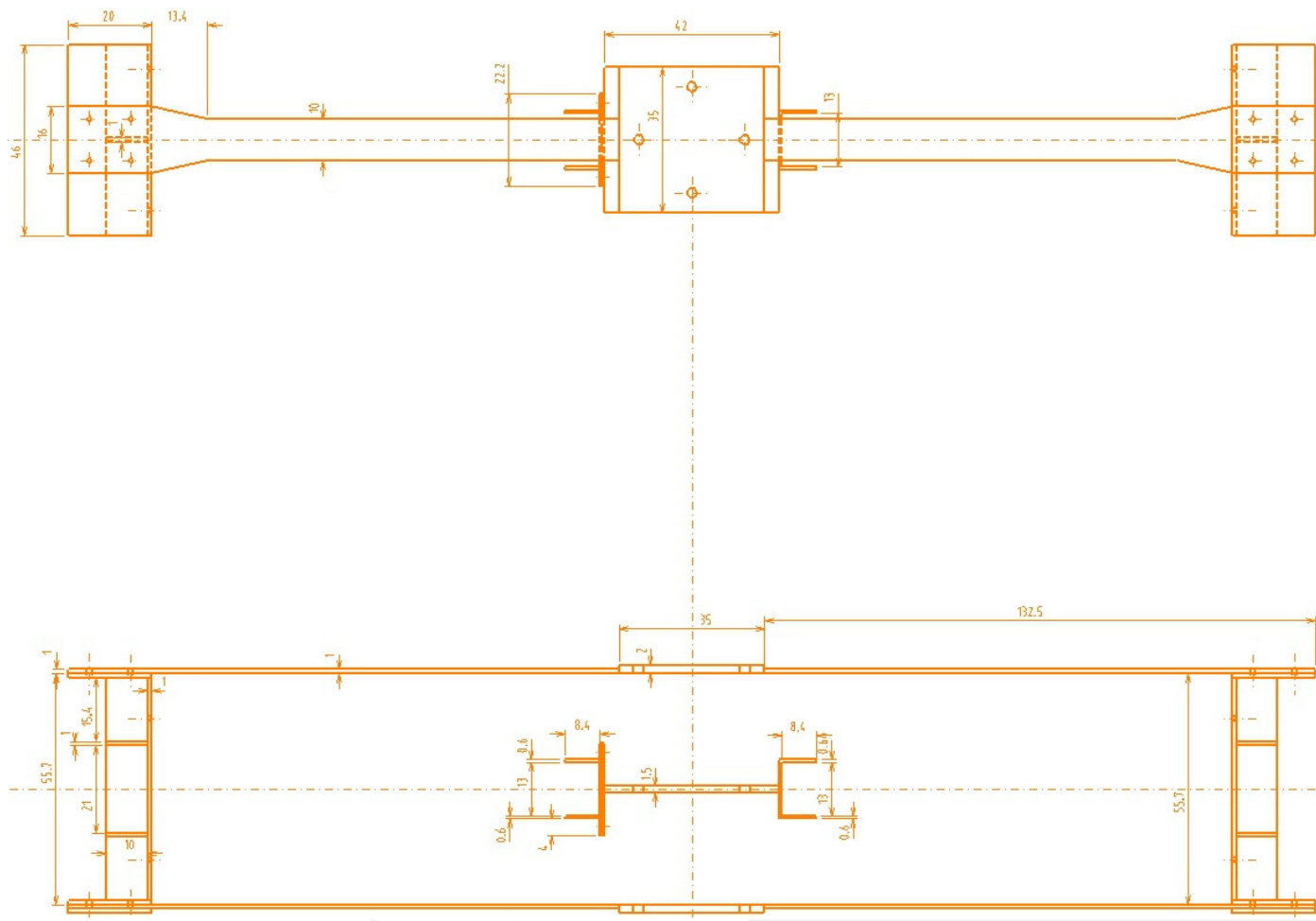
## Anexo 2 Disposición de ensayos de prototipos



### Anexo 3 Marco de reacción, detallamiento



Planta y Elevación Marco de Reacción Disposición para ensayo con carga vertical simultánea con carga horizontal estática unidireccional.



Planta y Elevación Marco de Reacción Disposición para ensayo con carga vertical simultánea con carga horizontal dinámica bidireccional.

**Anexo 4 Reproducciones Referenciales de los Aisladores**

