

CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE GOMA DE ALTO AMORTIGUAMIENTO PARA EL DESARROLLO DE DISIPADORES DE ENERGÍA.

¹Pablo Mata Almonacid, ²Rubén Boroschek Krauskopf

¹Universidad de Girona, UdG, u1041389@correu.udg.es

²Profesor, Universidad de Chile, Depto. Ingeniería Civil.

RESUMEN

Un procedimiento que está tomando fuerza en control de vibraciones en edificios es la incorporación de dispositivos para incrementar la capacidad de disipación de energía de la estructura. En este trabajo se caracteriza una goma de alto amortiguamiento que se propone para el desarrollo de disipadores sísmicos de estructuras y se presentan ensayos cíclicos de carga en probetas para identificar la forma del ciclo histerético y los mecanismos de disipación. Los resultados indican que el material investigado es conveniente para el uso por su estabilidad y buena capacidad de disipación de energía. Además se observa que un modelo analítico permite la predicción de la respuesta en dispositivos para distorsiones menores al 100% donde no hay un endurecimiento importante del sistema.

Palabras Clave: Disipación de Energía, Control Pasivo, Amortiguamiento.

ABSTRACT

A procedure that is taking force in control of vibrations in buildings is the incorporation of devices to increase their energy dissipating capacity. In this work a high damping rubber is propose for the development of seismic dissipators for structures. The rubber is evaluated by controlled displacement tests to identify the form of the hysteretic behaviour and its dissipation mechanisms. The results indicate that the investigated material is recommendable for its use in structures for vibrating loads because of its stability and energy dissipation capacity. In addition it is observed that simple analytical models allow the prediction of the device response for distortions lower than 100%, where apparent hardening of the material is yet not present.

Keywords: Dissipation of Energy, Passive Control, Damping.

1. - INTRODUCCIÓN.

La ingeniería estructural tradicional ha estado principalmente centrada en tratar de diseñar estructuras que sean capaces de soportar las cargas impuestas por sismos a través de una combinación adecuada de energía elástica y de disipación en sus elementos principales. Sin embargo con el desarrollo de nuevos materiales es posible contribuir a la protección estructural utilizando dispositivos dedicados a la disipación de energía.

La función que cumplen estos dispositivos es la de absorber y disipar una parte de la energía que ingresa a la estructura, consiguiendo, de esta forma, que los elementos estructurales reciban una sollicitación menor y por consiguiente se vea minimizado su nivel de daños.

Este trabajo presenta la caracterización de una goma de alto amortiguamiento que disipa energía cuando es sometida a deformaciones de corte y que tiene una restricción a la deformación en la dirección ortogonal al movimiento. Para este propósito se ensayaron

probetas de goma de alto amortiguamiento [Ref. 6] bajo cargas cíclicas y movimientos arbitrarios. La respuesta fue analizada y se establecieron las principales variables que la definen. Posteriormente se contrastó la respuesta con los resultados derivados de un modelos matemático.

2. - DESCRIPCIÓN DE LA PARTE EXPERIMENTAL.

Se elaboraron tres probetas con goma para ser ensayadas en ciclos de carga y descarga aplicando deformaciones por corte. Las probetas poseían cinco segmentos, los dos segmentos extremos y el del centro eran de acero con perforaciones circulares con el fin de proporcionar la fijación de la probeta a la máquina de ensayo, Figura 1. Los otros dos segmentos estaban constituidos por placas de goma de 9 cm^2 de área y 6 mm de espesor, [Ref. 6]. Las caras de los segmentos de goma estaban adheridas a los cuerpos contiguos de acero. De esta forma fijando los segmentos extremos y forzando un desplazamiento del segmento intermedio se lograba desarrollar los ciclos de carga y descarga en los segmentos de goma, Figura 1. La secuencia de ensayos realizada es la siguiente:

a. Se generaron ciclos de carga-descarga de forma sinusoidal con deformaciones impuestas en tres probetas, hasta llegar a niveles de deformación máxima del 10, 20, 50, 100, 150, 170 y 200 [%], realizando cada ensayo con las siguientes frecuencias de aplicación: 1/30, 0.5, 1.0 y 2.0 [Hz]. Cada ciclo para un determinado nivel de deformación y frecuencia de aplicación quedaba definido por medio de cincuenta puntos, repitiendo cada ciclo tres veces por cada probeta. Por medio de este conjunto de ensayos se caracterizaron cuantitativa y cualitativamente los ciclos de histéresis para los niveles de deformación mencionados y se comparó la variación en la energía disipada con la frecuencia de aplicación de la carga.

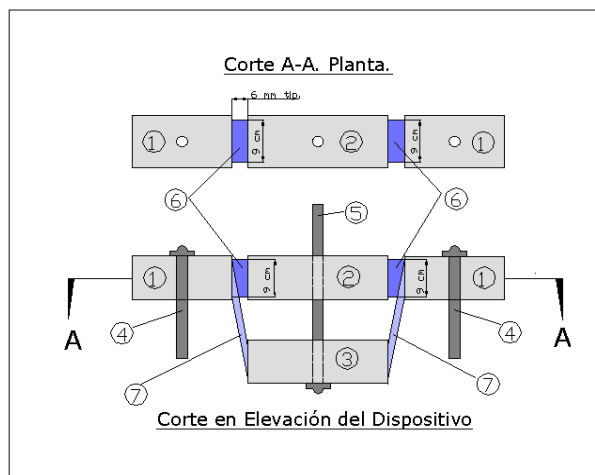


Figura 1. Dispositivo de Ensayo. 1) Segmentos de acero fijos. 2) Segmento de acero móvil. 3) Posición del cuerpo de acero móvil al desarrollar una deformación de corte. 4) Tornillos de Fijación. 5) Tornillo Móvil, (Émbolo de ensayo). 6) Placas de Goma en posición no deformada. 7) Placas de goma en posición deformada.

Para conocer la forma del ciclo histéretico se desarrollaron ensayos de forma sinusoidal a una frecuencia constante de 0.5 [Hz] con deformaciones máximas y mínimas distintas, Tabla 1.

Tabla N ° 1. Rangos de deformaciones máximas y mínimas.

Ensayo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Def max. [%]	200	200	200	200	200	200	200	200	150	150	150	150	150	150
Def min. [%]	170	150	100	50	20	-20	-50	-100	100	50	20	-20	-50	-100

Tabla 1. Continuación.

Ensayo	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
Def max. [%]	100	100	100	100	100	100	50	50	50	50	50	50	50
Def min. [%]	50	20	-20	-50	-100	-150	20	0	-20	-50	-100	-150	-200

Por medio de este conjunto de ensayos se pretende caracterizar la ley que rige el comportamiento de la goma dentro de ciclos de carga-descarga no simétricos con respecto al nivel de deformación cero de la goma. Por ejemplo, en el ensayo n 1 de la tabla n 1 la goma es llevada hasta un nivel máximo de un 200 % de deformación y se somete a ciclos sinusoidales que van entre 200 y 170 % de deformación, aplicados a una frecuencia de 0.5 [Hz].

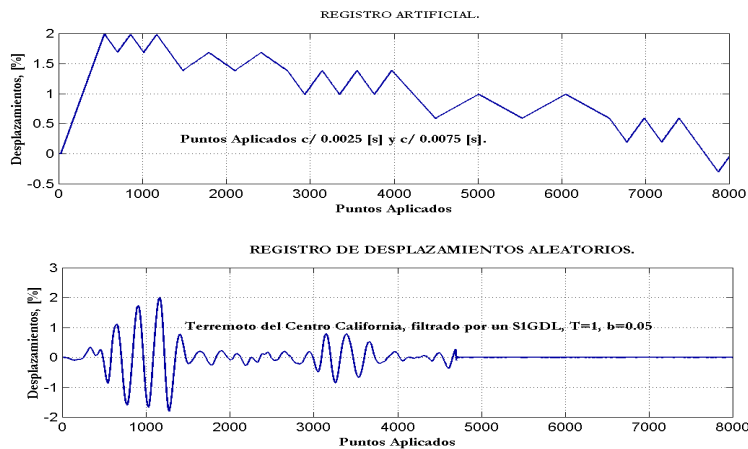


Figura 2. **Arriba:** Registro artificial, que genera incursiones cíclicas controladas. **Abajo:** Registro aleatorio.

c. Se sometieron las probetas a un conjunto de ensayos donde la deformación impuesta esta dada por los registros de la Figura 2.

3. - Comportamiento general de la goma.

El comportamiento general de la goma se puede describir como histerético, Figura 3, presentando una curva de esfuerzo – deformación no lineal con disipación de energía. Para una deformación dada el material sufre un deterioro paulatino de la rigidez inicial al ser sometida a ciclos sinusoidales de deformación, Figuras 3 y 4. Este proceso continúa hasta que se obtiene un ciclo estable. Este comportamiento se explica como un proceso de acomodamiento de las partículas al interior del material que compone la goma. [Ref. 5, 7].

Cuando se superponen en un mismo esquema las respuestas para las cargas cíclicas sinusoidales de amplitudes +/- 10, 20, 50, 100, 150, 170 y 200[%] se evidencia un fenómeno de endurecimiento o rigidización de la goma al aumentar la pendiente de la curva de esfuerzos-deformaciones para deformaciones superiores al 100 [%]. Figura 3.

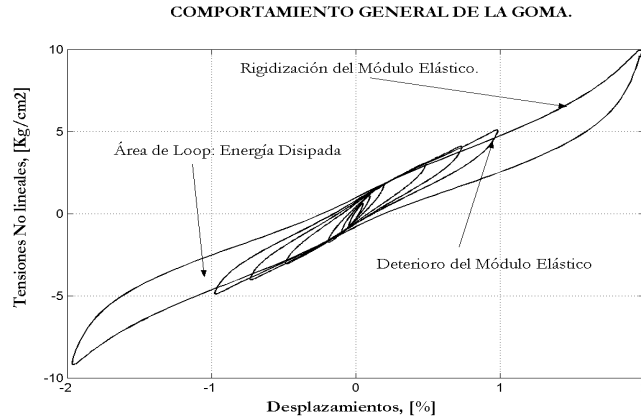


Figura 3. Comportamiento histerético. Ensayo cíclico.

Este fenómeno aparentemente se produce por una participación de esfuerzos de tipo axial adicionales a los de corte, (la probeta se encuentra restringida de desplazarse en la dirección longitudinal). La configuración deformada para la probeta de goma en deformaciones superiores al 100% hace que se generen estiramientos axiales de la goma que se suman en esfuerzo a las deformaciones por corte.

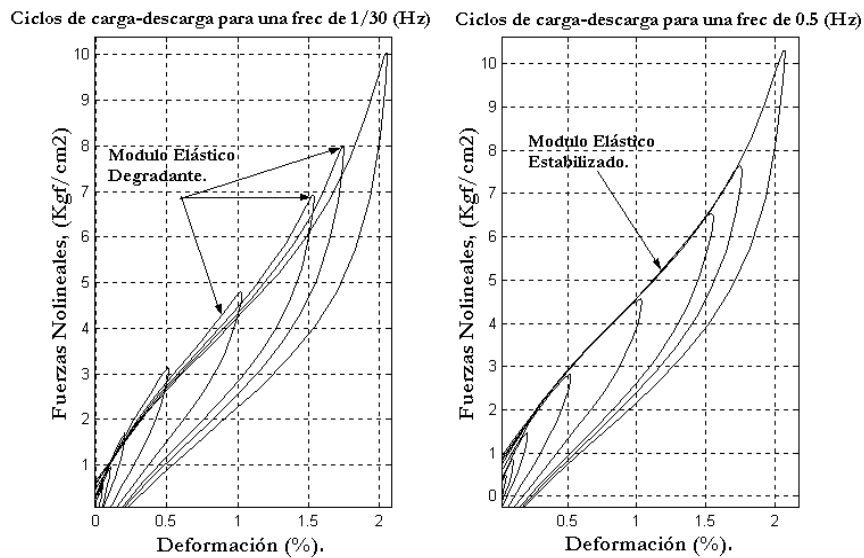


Figura 4. La figura de la izquierda permite ver la degradación paulatina del módulo elástico de la goma al repetir ciclos de deformación. A la derecha se aprecia el módulo elástico estabilizado luego de aplicar ciclos de deformación en forma reiterada.

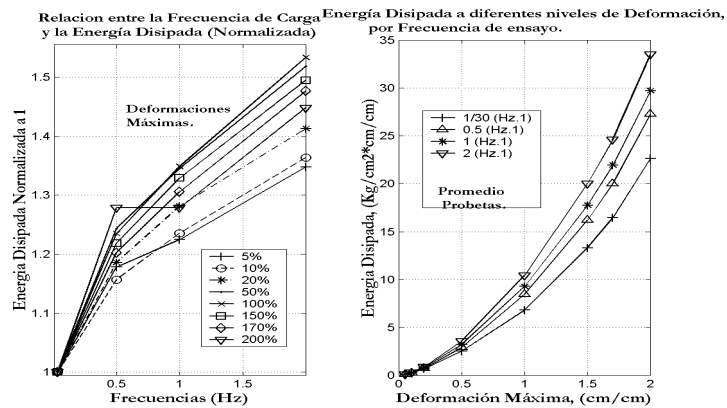


Figura 5. **Izquierda** : Energía disipada normalizada a 1 en función de la frecuencia de ensayo. Cada curva corresponde a un nivel de deformación máxima en el ensayo. **Derecha** : Energía disipada en función del nivel de deformación máximo alcanzado en el ensayo, para diferentes frecuencias de aplicación de la carga.

En este trabajo se calculó la energía disipada en cada ciclo por medio de una estimación del área de la histéresis. La figura 5 presenta la energía disipada en función del nivel de deformación. De esta se concluye que la energía disipada crece con la deformación.

Adicionalmente se calculó el amortiguamiento viscoso equivalente de los ciclos histeréticos a diferentes niveles de deformación máxima y frecuencia, Figura 6, [Ref. 3]

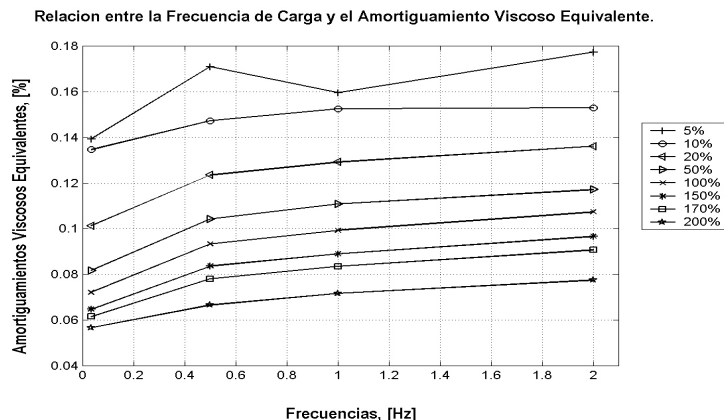


Figura 6. Amortiguamiento Viscoso Equivalente. Calculado para cada nivel de deformación máxima aplicada.

3.1 – Energía disipada en función de la frecuencia.

De la figura 5 se observa un nivel de dependencia de la energía disipada con relación a la velocidad del ensayo. Esto es un indicador de la presencia de fuerzas de disipación que pudiesen asociarse a un mecanismo viscoso. Estas fuerzas pueden estimarse si se asume que existe coeficiente que se mantiene constante para la disipación viscosa, C_{ij} , que tiene lugar en un intervalo de variación de frecuencias i y $i+1$. Para un ensayo cíclico, como los realizados, este coeficiente está dado por la siguiente ecuación:

$$C_{ij} = \frac{\Delta E_{ij}}{A_j^2 \left(\int_0^{T_{i+1}} w_{i+1}^2 \cos^2(w_{i+1}t) dt - \int_0^{T_i} w_i^2 \cos^2(w_i t) dt \right)}$$

$i = 1 \dots (N-1);$
 $A_j: \text{amplitudes}$
 $j = 1 \dots R$

(1)

Donde ΔE_{ij} es el incremento de energía disipada entre un ensayo a frecuencia w_i y un ensayo a frecuencia w_{i+1} , consecutivos, a una amplitud A_j . T_i , T_{i+1} son los períodos de asociados a las frecuencias mencionadas. Los valores discretizados de $C_{ij}(w,A)$ obtenidos para cada nivel de desplazamiento máximo "A_j" en particular, se han graficado en la figura 7. De las Figuras 6 y 7 se desprende que independientemente del desplazamiento máximo escogido el valor de disipación viscosa equivalente se puede suponer constante para frecuencias que están en el rango [0.5 - 2] [Hz]. Los valores que muestran una mayor variación son los calculados en el tramo [0.033 - 0.5] [Hz].

3.2 - Energía disipada en función del desplazamiento.

La presencia de una histéresis estructural se evidencia en los ciclos histeréticos a baja frecuencias de carga (1/30 [Hz]). En las Figuras 3 y 4 se puede observar que mientras las curvas de carga (velocidades > 0) convergen rápidamente a la envolvente superior de todas las curvas Fuerza-Desplazamiento, la curva de descarga del material recorre una ruta que depende del instante del cambio de velocidad en el ensayo. En estas figuras se aprecia, además, que si bien cada retorno en descarga recorre una ruta particular, todas ellas parecen converger en forma tangente a un punto común que en este caso es en torno a la deformación del 10 [%].

Adicionalmente se observa en las figuras 8 y 10, que muestran histéresis de carga bajo desplazamiento cíclicos asimétricos o arbitrarios, se observa que el material recorre una ruta de recarga que es función del punto de cambio de velocidad y que converge rápidamente a la envolvente de carga.

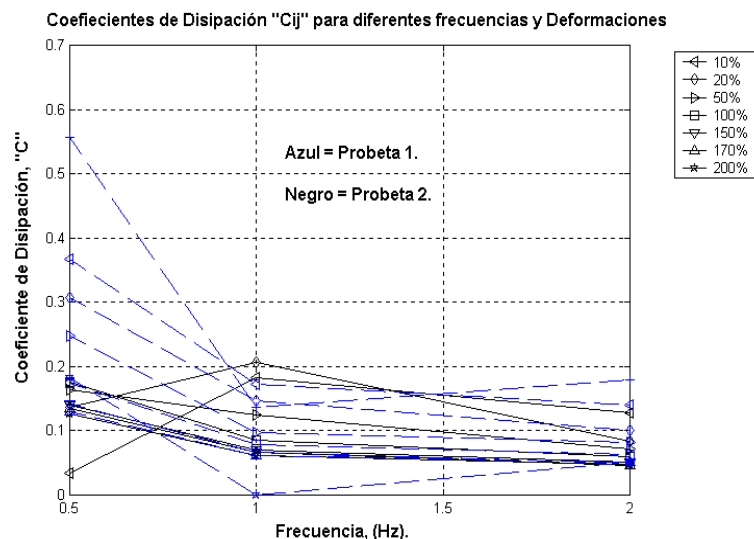


Figura 7. constante de disipación entre frecuencias consecutivas de ensayo, C_{ij} , para diferentes niveles de deformación

La curva de histéresis además presenta un endurecimiento (transición de curvas convexo-cóncavas en carga) para deformaciones mayores al 150 [%].

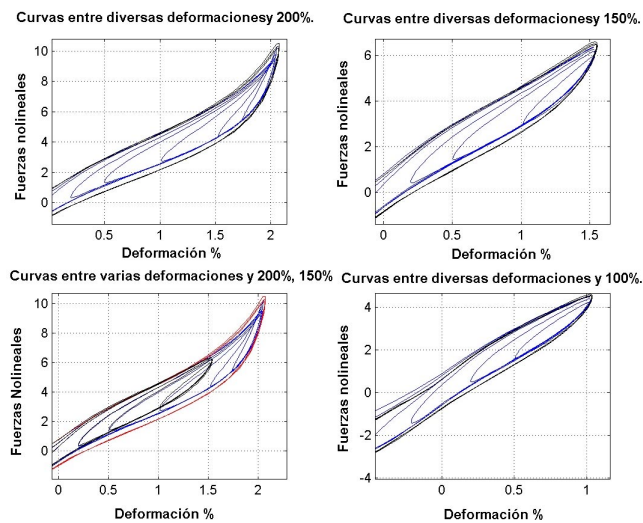


Figura 8. Ciclos de carga y descarga entre diversas deformaciones mínimas y máximas.

4. - Modelos matemáticos.

Se investigó la posibilidad de representar la respuesta de la goma por medio de dos modelos matemáticos ampliamente difundidos. Éstos modelos son: el modelo de suavización de curvas del software de análisis estructural SAP2000 [Ref. 4].

4.1 - Modelo de Curvas Suavizadas.

El modelo para fuerzas restitutivas histeréticas que se propone en el manual Analysis Reference Volumen I, publicado por Computers and Structures, Inc, para su producto SAP2000, [ref.4], se obtiene resolviendo por medio del método de diferencias finitas el siguiente sistema de ecuaciones diferenciales:

$$f = K_y d + (K_e - K_y) e \quad (2)$$

$$\text{Si } \dot{d} e \neq 0 \quad \dot{e} = \left(1 - \left|\frac{e}{d}\right|^n\right) \dot{d} \quad (3)$$

$$\text{Si } \dot{d} e = 0 \quad \dot{e} = \dot{d} \quad (4)$$

Donde f , son las fuerzas no lineales, K_y , la pendiente de postfluencia, K_e , la pendiente de la zona elástica, d , los desplazamientos reales del sistema y la variable e , representa una variable de deformaciones elásticas artificiales y tiene valores dentro de un rango $[-d_y, d_y]$, (Magnitud de la deformación de fluencia del material). El parámetro "n" aporta el grado de suavización que se le desee dar a la transición de pendientes pre y post fluencia, en el ciclo histerético. Un valor bajo de n implica una transición suave y a medida que n crece el modelo se acerca a un comportamiento bilineal. Figura 9.

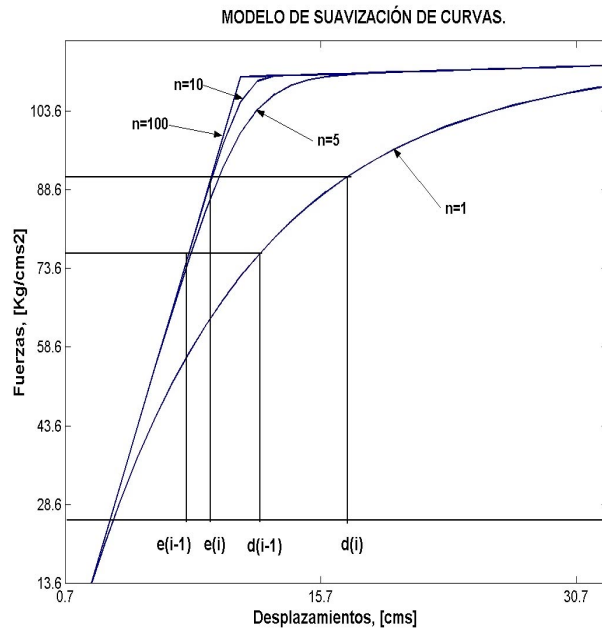


Figura 9. Suavización de la transición del sistema entre la pendiente de pre y post fluencia. A medida que el parámetro “n” crece el sistema se acerca al comportamiento bilineal perfecto.

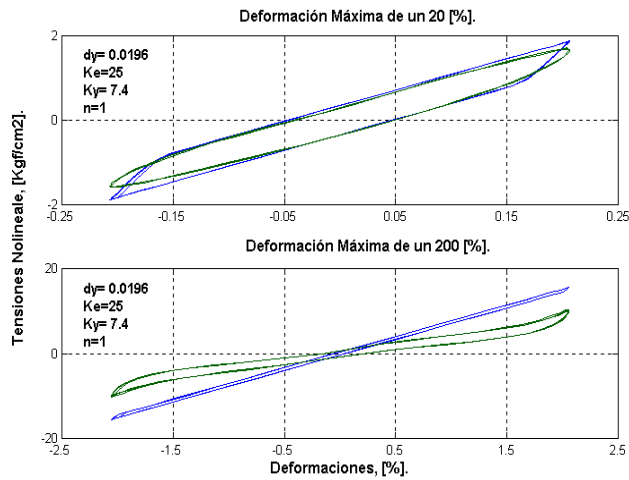


Figura 10. **Arriba.** Se puede ver un ajuste del modelo de suavizaci3n de curvas al ciclo de la goma de deformaci3n máxima de un 20% y 0.5 [Hz] de velocidad de aplicaci3n de carga. Se aprecia una buena concordancia entre la energía disipada experimentalmente (verde) y la predicha por el modelo ajustado (azul) (error=3.65 %). Además, se observa un buen ajuste entre ambos datos en términos de la forma del ciclo predicho (trayectoria de esfuerzos-deformaciones). **Abajo,** los mismos valores de los parámetros ajustados al caso de arriba no proporcionan una buena simulaci3n del comportamiento de la goma para una deformaci3n del 200% y 0.5 [Hz] de velocidad aplicaci3n de carga

Este modelo tiene tres parámetros y posee la misma pendiente de pre-fluencia y de descarga. Por este motivo presenta dificultades para la simulación del material en estudio. Especialmente en la estimación del área de los ciclos de histéresis. Además este modelo sólo puede simular transiciones de forma de convexa a cóncava en carga, por lo tanto, no es posible simular el endurecimiento observado en la goma para distorsiones mayores al 100%.

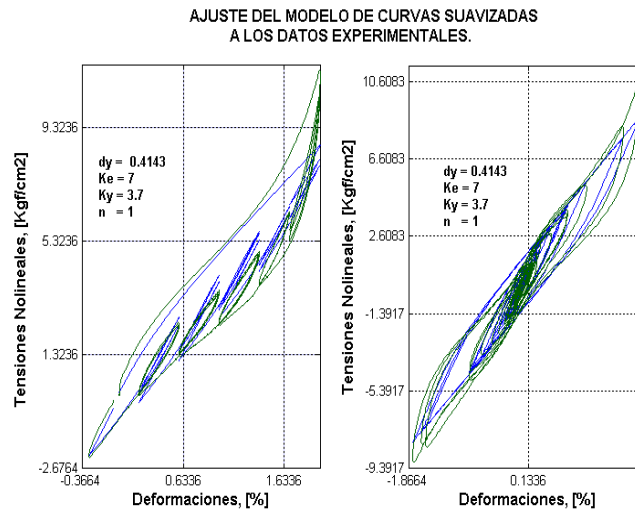


Figura 11. Contraste entre la respuesta del Modelo de Suavización de Curvas y los datos experimentales. Izquierda ciclos de recarga controlada. Derecha movimiento arbitrario.

Por ejemplo en la Figura 10 se presenta un ajuste para el 20% de deformación máxima, con un error entre el valor experimental de la energía disipada y el predicho por el modelo, de un 3.65%. Al ser utilizado para evaluar la respuesta para una deformación máxima del 200% el error es de más de un 400% en el valor de la energía disipada y la relación de esfuerzo deformación sigue una ruta diferente entre el modelo y los datos experimentales. Sin embargo es posible utilizar este modelo para aproximar, con un procedimiento lineal-equivalente, una excitación arbitraria como las mostradas en la Figura 11. A pesar que la concordancia no es buena en el tiempo esta puede ser mejorada con procesos de iteración.

5. CONCLUSIONES.

El comportamiento mostrado por la goma investigada permite concluir que es un material que posee la facultad de disipar energía en forma estable por medio de histéresis al ser excitada por una acción dinámica de forma arbitraria. Esta condición permite su utilización como material base para el desarrollo de mecanismos pasivos de protección sísmica de construcciones. Su modelación es posible pero deben utilizarse modelos lineales-equivalentes o no lineales para reproducir su capacidad de disipación de energía y su envolvente histerética.

6. - REFERENCIA.

1. - Asano, M. Masahiko, M y Yamamoto, M. Año 2000. "The Experimental Study on Viscoelastic Material Dampers and the Formulation of Analytical Model". M. 12 WCEE 2000.
2. - Chen, Q. Douglas, B. M. Maragakis, E. and Buckle, I. G. 26 de Mayo de 1998 "Extraction of Nonlinear Hysteretic Properties of Seismically Isolated Bridges from Quick-Release Field Test". Center for Civil Engineering Earthquake Research. University of Nevada at Reno. University Station. Reno, Nevada 89507-8121. Technical Report. MCEER-98-0001.
3. - Chopra, Anil K. 1995. "Dynamics of Structures, Theory and Applications to Earthquake Engineering". University of California al Berkeley. By Prentice Hall Inc.
4. - Edward L. Wilson, Edward L. Julio de 1998. "Three Dimensional Static and Dynamic Analysis of Structures, a Physical Approach with Emphasis on Earthquake Engineering". Computers and Structures, Inc. Berkeley, California, USA.
5. - Kojima, H and Fukahori, Y. Abril 1990. "Performance, Durability of High Damping Rubber Bearings for Earthquake Protection". BRIDGESTONE CORPORATION, Abril, 1990. Rubber World, V. 202. 1.
6. - Moroni, O., Sarrazin, M., Boroschek, R. Valdebenito, R. y Romo, Año 2000. "Analysis of Seismic Records Obtained in Isolated Structures". D. 12 World Conference in Earthquake Engineering, New Zealand.
7. - "Sommer, J. G. December 1989. "Effects of Shape and Other Design Factors on Rubber Behavior". Consultant. Rubber World, V. 201. 3.
8. - Soong, T. T. Dargush, G. F. 1997. "Passive Energy Dissipation System in Structural Engineering". State University of New York at Buffalo. USA.
9. - Sues, R. H. Mau, S. T. and Wen, Y. K. Members, ASCE. Journal of Engineering Mechanics, Mayo, 1988. "System Identification of Degrading Hysteretic Restoring Forces". Vol. 114, 5.
10. - Wen, Y. Abril de 1976. "Method for Random Vibration of Hysteretic System". Journal of the Engineering Mechanics Division.

7. – AGRADECIMIENTOS.

Se agradece el apoyo Universidad de Chile, Proyecto Fondecyt 1970732, para la utilización de las probetas que se emplearon en los ensayos.

Y de igual manera se agradece el apoyo recibido por parte de la Universidad de Girona, UdG, para la divulgación de los resultados de esta investigación.