



DETERMINACION DEL AMORTIGUAMIENTO ADICIONADO POR UNA UNION SEMIRRÍGIDA A UN MARCO DE MADERA

F. Peñailillo Jorquera¹, N. Maureira Carsalade² y J. Padilla Reyes³

RESUMEN

En esta investigación se estudia el efecto de la adición de amortiguamiento a un marco de madera, por medio del uso de conexiones semirrígidas con capacidad de disipación de energía. Dichas uniones pueden trabajar como rígidas para cargas de servicio y como flexibles para cargas sísmicas de diseño, permitiendo la disipación de energía por deformación. Una característica diferenciadora de esta unión es que una vez retirada la carga sísmica, es capaz de volver a su forma original sin que esto implique deformaciones permanentes. Este dispositivo permitiría construir estructuras de madera grandes en tamaño, con elementos menos robustos en comparación con estructuras que usen conexiones tradicionales. Esto debido a que la conexión permite absorber las deformaciones que el sismo impone, reduciendo la demanda en los elementos resistentes como vigas y columnas. Con el uso de esta conexión la filosofía de diseño por resistencia puede ser cambiada por la un diseño por desplazamiento al incluir uniones muy flexibles que disipen parte de la energía del sismo y resistan las deformaciones impuestas, reduciendo la dimensión y costo de los demás elementos estructurales.

Se realizaron ensayos de vibración libre a un marco de madera a escala real con distintos desplazamientos iniciales impuestos para verificar el correcto funcionamiento de la conexión. Se determinó la energía disipada por la deformación relativa de las uniones propuestas, así como la correspondiente al amortiguamiento interno de la estructura. A través de estos ensayos se busca determinar capacidad de las uniones plásticas autocentrantes para adicionar capacidad de disipación de energía.

A partir de los resultados se pudo establecer la efectividad de amortiguamiento proporcionado por la unión propuesta. Esta fue capaz de incrementar el amortiguamiento interno de la estructura del orden del 4% con uniones rígidas, hasta niveles del 37% de amortiguamiento crítico al incorporar las conexiones semirrígidas.

PALABRAS CLAVE: Conexión semirrígida; vibración libre; amortiguamiento.

ABSTRACT

In this research the effect of the addition of damping to a wooden frame through the use of semi-rigid connections with energy dissipation capacity is studied. These joints can work as rigid for service loads, and work as flexible for design seismic loads, dissipating energy during the deformation. A distinguishing feature of this connection is that once the seismic load is removed, it is able to return to its original shape without permanent deformations. This device would allow the construction of large wooden structures, with less robust elements compared to structures that use traditional connections. This is because this connection allows absorbing the deformations that the earthquake imposes, reducing the demand on the resistant elements such as beams and columns. With the use of this connection the philosophy of design by resistance can be changed by the design by displacement. The above due to the inclusion of very flexible joints that dissipate part of the energy of the earthquake and resist the imposed deformations, reducing the dimension and cost of the other structural elements.

Free vibration tests were carried out on a real scale wooden frame with different initial displacements imposed to verify the correct functioning of the connection. The energy dissipated by the relative deformation of the proposed joints was determined, as well as the one corresponding to the internal damping of the structure. Through these

¹ Estudiante, Carrera de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, fapenailillo@ing.ucsc.cl

² Profesor Asistente, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, nmaureira@ucsc.cl

³ Profesor Informante, Eligemadera SpA, Bayona 1950 B 12, San Pedro de la Paz, CHILE, javiera.padilla@eligemadera.cl

tests, the aim was to determine the effectiveness of self-centering plastic joints in adding energy dissipation capacity to the structure.

From the results it was possible to establish the effectiveness of damping provided by the proposed connection. This junction was able to increase the internal damping from about 4% for the structure with rigid joints, up to levels of 37% of critical damping when the semi-rigid connections were incorporated.

KEYWORDS: Semi rigid connection; free vibration; damping.

1. INTRODUCCIÓN

Esta investigación nace de la necesidad de implementación de nuevas tecnologías para potenciar el uso de la madera como material estructural en la construcción. Con esto se busca ampliar el margen de utilización de este material a estructuras más grandes y de mayor número de pisos. También se busca posicionar a la madera como material constituyente de la estructura resistente principal en edificaciones de mayor envergadura y no solamente en elementos secundarios y/o ornamentales. Esto se pretende lograr por medio de la incorporación de conexiones plásticas en las cuales se pueda concentrar la deformación impuesta por el sismo, reduciendo la demanda en el resto de la estructura, ofreciendo así un mejor estándar de serviciabilidad y seguridad a sus ocupantes.

La motivación de este proyecto de investigación surge del hecho de que Chile es uno de los grandes productores madereros a nivel mundial, sin embargo, el uso de la madera como material estructural está muy por debajo de lo que ocurre en países desarrollados productores de madera como Estados Unidos y Canadá (Figura 1). Siendo Chile un país altamente sísmico, todas las construcciones deben cumplir con estrictos estándares de diseño que aseguren la resistencia y seguridad de las mismas (Padilla-Reyes, J. et al, 2018).

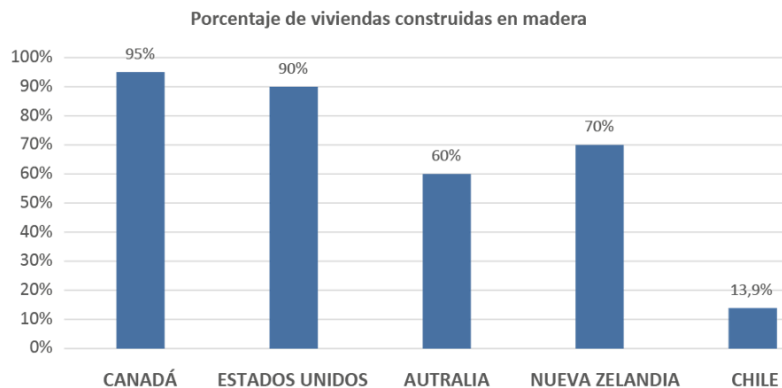


FIGURA 1: PARTICIPACIÓN DE LA MADERA COMO MATERIAL PREDOMINANTE EN VIVIENDAS

FUENTE: MINISTERIO DE VIVIENDA Y URBANISMO, 2016.

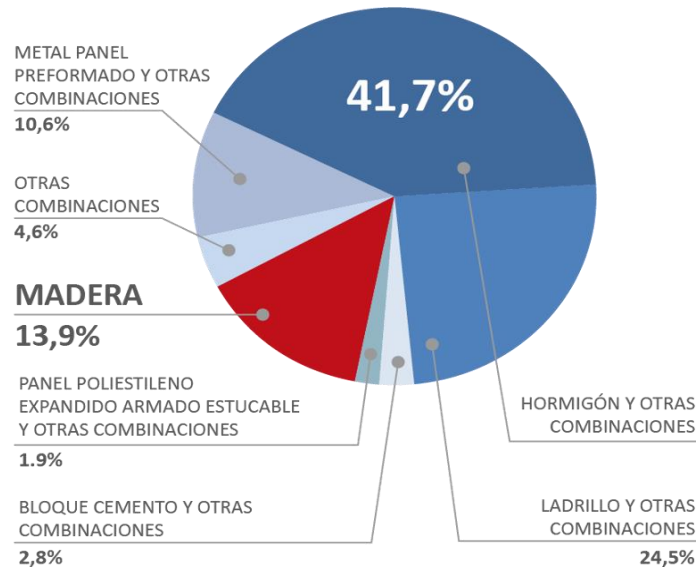


FIGURA 2: PARTICIPACIÓN DE LOS PRINCIPALES MATERIALES ESTRUCTURALES COMO PREDOMINANTES EN ESTRUCTURAL EN CHILE. FUENTE: MINISTERIO DE VIVIENDA Y URBANISMO, 2016.

Es por esto que para favorecer el uso de la madera en la estructura principal de edificaciones de mayor envergadura, es necesario proporcionar tanto resistencia como capacidad de deformación ante cargas sísmicas. De lo anterior surgió la idea de un tipo de conexión capaz de soportar las cargas de servicio como unión rígida, pero que a la vez pudiera adaptarse a la demanda de deformación que impone el sismo, limitando las cargas transmitidas a los elementos unidos y disipando parte de la energía impuesta por el sismo.

La conexión antes mencionada resuelve el problema de la demanda de resistencia impuesta a los elementos estructurales de madera en edificaciones de gran envergadura. Esto debido a que la conexión puede incrementar significativamente la ductilidad de la estructura que la incorpora en sus uniones. Esto permite transformar la demanda sísmica de fuerza a deformación, siendo esta última absorbida por las conexiones plásticas. Esto último permite limitar las fuerzas solicitantes en los elementos resistentes de madera, lo cual redundará en economía de materiales e incremento de la competitividad de la madera en construcciones grandes. Adicionalmente, la capacidad de disipación de energía de la conexión propuesta permitiría reducir la demanda global del sismo sobre la estructura. Lo anterior haría que no sólo la demanda de fuerza sea menor, sino que la demanda de desplazamientos puede ser similar a la correspondiente a una estructura con uniones clásicas, debido a la disipación de energía proporcionada.

Las uniones que existen actualmente en el mercado son elementos metálicos que funcionan por trabazón mecánica y transferencia de esfuerzo de corte por medio de clavos, tornillos y pernos. En algunos casos particulares el ingeniero diseña uniones específicas para una estructura particular. En ambos casos la unión intenta reproducir una rótula o una unión empotrada. En este tipo de uniones, si bien puede existir disipación de energía, esta suele estar asociada a daño permanente localizado en los elementos de madera unidos, modificando las propiedades mecánicas del sistema estructural.

La idea principal a la que se apunta es que, en vez de construir estructuras de madera con elementos de gran tamaño y muy robustas para tratar de resistir las fuerzas que el sismo impone, se propone lo opuesto. Esto es, resistir los desplazamientos que el sismo impone, reduciendo con ello la demanda de fuerza que solicita a los elementos estructurales. Esto permite que no se diseñen elementos muy grandes si no que se diseñan uniones muy flexibles capaces de adaptarse a la demanda sísmica, disipando energía en el proceso. En lugar de que el terremoto se traduzca en daño a la estructura este se concentraría en estos elementos de conexión y se libera en forma de calor o daño localizado en estas uniones con la ventaja que se puede reparar fácilmente. Adicionalmente, las



uniones propuestas tendrían la capacidad de cerrarse por sí solas una vez terminado el evento sísmico, sin presentar daños permanentes ante sismos de moderada a gran intensidad.

El efecto benéfico de incorporar estas uniones se midió por medio del incremento en la razón de amortiguamiento crítico del sistema, a partir de un análisis experimental de vibración libre. Para lograr lo anterior, se sometió al sistema a tres ensayos de vibración libre con diferente desplazamiento inicial impuesto. Estos fueron realizados en el laboratorio de ingeniería estructural de la UCSC, utilizando para medir la respuesta un acelerómetro y dos sensores de desplazamiento LVDT. Para aplicar el desplazamiento inicial, se utilizó un cable unido a la estructura el cual se enrolla hasta conseguir los desplazamientos iniciales requeridos. Se utilizaron desplazamientos iniciales de 4cm, 5cm y 7cm.

Los resultados mostraron que el amortiguamiento interno del sistema puede incrementarse desde aproximadamente un 4% a un 40% del amortiguamiento crítico, al comparar la estructura con uniones rígidas en relación a la misma estructura con uniones semirrígidas. Adicionalmente, se pudo verificar que las conexiones utilizadas efectivamente pueden cerrarse por sí solas cuando la carga solicitante es baja, comportándose como rígidas conexiones rígidas en dicha condición. Lo anterior representa una ventaja significativa respecto de otras conexiones disponibles comercialmente, ya que no sólo permitiría incrementar significativamente el amortiguamiento con la reducción consiguiente en la demanda, sino que permite absorber excesos de demanda de deformación, evitando el daño en la estructura.

2. METODOLOGÍA

Se presenta en esta sección una metodología con una serie de actividades cuyo fin es dar cumplimiento al objetivo general de esta investigación. Este último es determinar la efectividad del uso de conexiones plástica en la adición de amortiguamiento a un pórtico de madera, verificando el comportamiento de auto-centrado de las conexiones.

2.1. Estructura de pruebas

Se realizó el análisis de un marco de madera compuesto por dos columnas y una viga de sección tubular de 100mmX125mm, integrando en sus uniones conexiones semirrígidas con capacidad de disipación de energía. Las conexiones se materializaron utilizando resortes elásticos, bisagras de puertas y lija para metal para incrementar el coeficiente de roce y, por lo tanto la capacidad de disipación de la conexión. Los resortes permiten que el sistema recupere su forma original una vez retiradas las cargas solicitantes. Por su parte las bisagras están presionadas contra el elemento unido mediante una fuerza normal controlada, lo cual permite disipar energía por roce cuando la conexión se comporta como flexible. Las propiedades de esta conexión son definidas a priori, esto quiere decir que son independientes de la respuesta dinámica del sistema, siendo por lo tanto un sistema de control pasivo de vibraciones (Chopra, 1995).

Se diseñó una extensión a la mesa vibradora disponible en el laboratorio de estructuras de la UCSC que permite la instalación del marco ensayado, columnas cuya longitud es de 2.25m y una viga de longitud 2.4m. Este mecanismo consiste en dos bases soportadas por 6 rieles vinculados fijamente al suelo y sujetos a las bases por rodamientos lineales los cuales se bloquearon para que la base esté empotrada en todo momento. Ambas bases tipo patín fueron unidas entre sí por un par de vigas de madera de 2"x8". La plataforma completa es de más de 3 metros de longitud en dirección del movimiento (Figura 3).

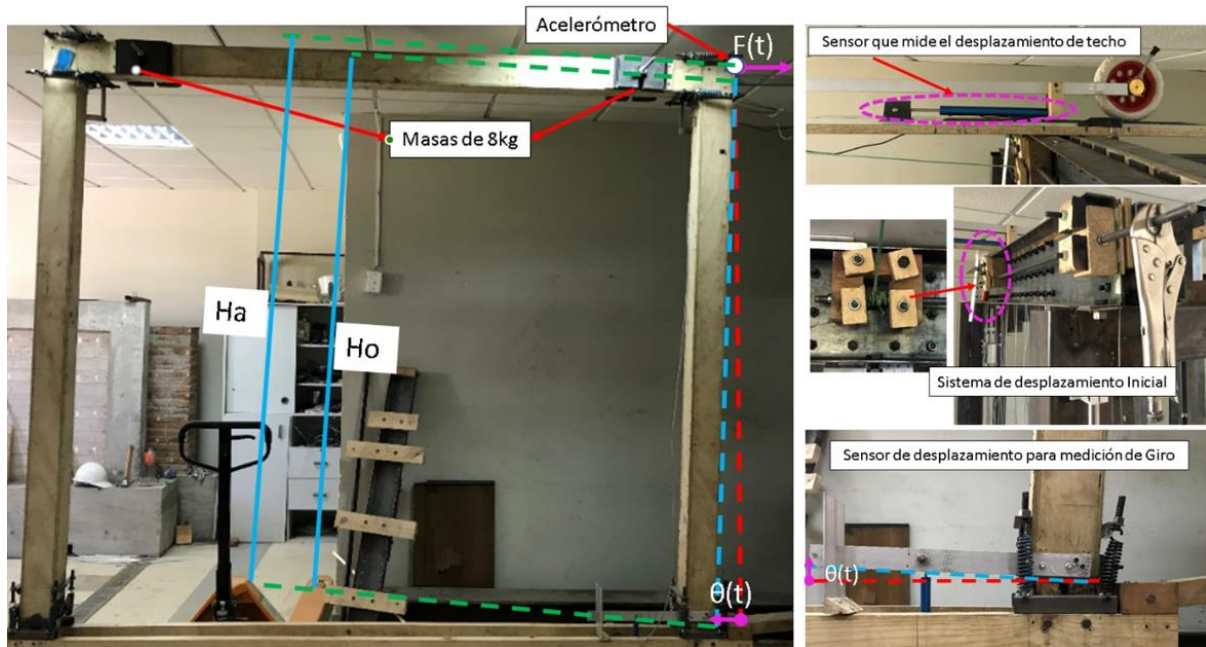


FIGURA 3: MARCO DE MADERA CON RÓTULAS PLÁSTICAS ENSAYADO, Y DEFINICIÓN DE PARÁMETROS GEOMÉTRICOS.



FIGURA 4: BASE DEL MARCO DE CARGA SOBRE RIELES EMPOTRADO.

En un inicio, con la finalidad de realizar un ensayo de movimiento forzado, se ensambló a la mesa vibradora (Figura 4, al fondo) a través de una barra rotulada en sus extremos, para solo transmitir desplazamiento horizontal.

Sin embargo, como finalmente sólo se realizó un ensayo de vibración libre, el sistema de deslizamiento horizontal que soporta al marco fue empotrado en su base con bisagras para evitar el deslizamiento. El desplazamiento inicial fue impuesto al marco por medio de un cable enrollado en un eje controlado manualmente por una manivela, llegando a 4cm, 5cm y 7cm, de modo que al soltar la manivela comienza su proceso de vibración libre.

La parte superior de la columna se conectó a un perfil de aluminio que en su otro extremo tiene una rueda que permite que la vibración no se vea alterada (Figura 3, arriba a la derecha). En la parte inferior del perfil metálico, se instaló un sensor de desplazamiento LVDT de desplazamiento máximo 15cm. Además, para contar con medición directa de la aceleración, sobre la unión columna y perfil de aluminio se instaló un acelerómetro.

Para medir el giro en la rótula basal en cada instante, se incorporó una barra lateral empotrada a la columna, en cuyo extremo se instaló un sensor de desplazamiento LVDT de desplazamiento máximo 5cm. Este sensor registró la distancia desde el extremo libre de una palanca rígida unida horizontalmente a la base de la columna, hasta un punto de referencia fijo. Lo anterior, junto con las distancias a los dos ejes de pivote de la base de la columna, permitió obtener en forma indirecta el giro (Figura 3, abajo a la derecha).

2.2. Modelo concreto de la conexión

Se ideó e implementó un modelo concreto de la conexión en las uniones base-columna y columna-viga, todas secciones tubulares de madera de sección rectangular. Para caracterizar la componente elástica de la conexión se dispuso de resortes de acero pre-tensados en el exterior de las uniones, en el lugar donde se conectan ambos elementos. Estos resortes fueron ubicados al costado de las caras más alejadas del eje de giro de la misma para maximizar su efectividad en el auto centrado de la conexión. La pre-tensión de los resortes dispuestos en el exterior de las conexiones se aplicó mediante un sistema de pernos que fueron tensados por medio del apriete de tuercas (Figura 5). La tensión en los elementos elásticos antes mencionados no fue medida directamente, sólo se midió indirectamente por medio del estiramiento inicial del sistema de resortes, conocida previamente la curva fuerza-estiramiento de cada uno de los resortes usados.

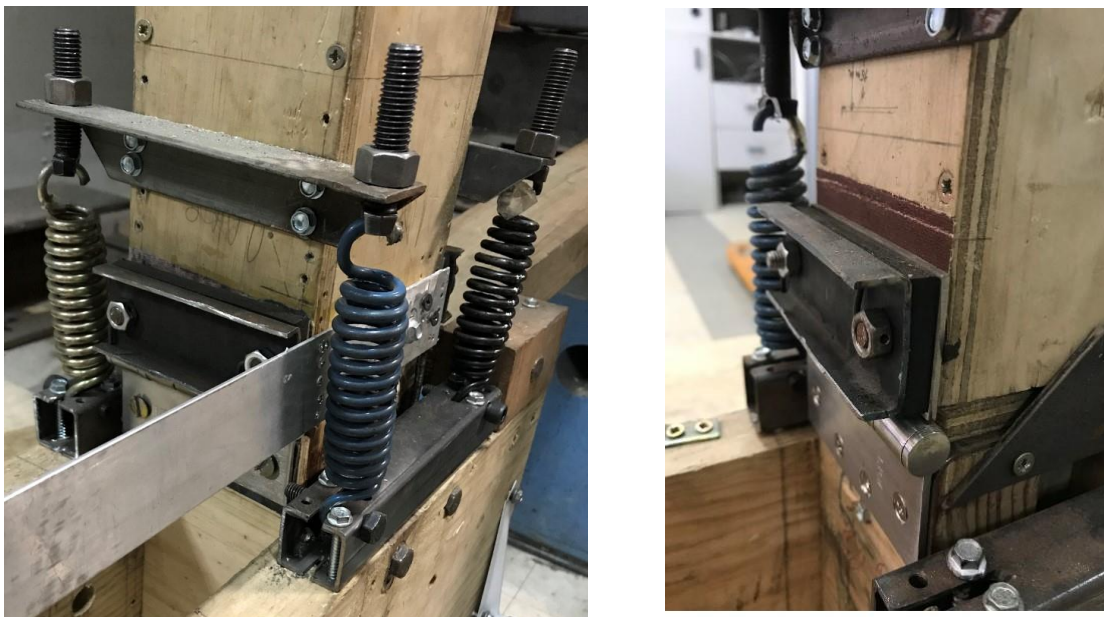


FIGURA 5: DISPOSITIVO DE UNIÓN PLÁSTICA AUTOCENTRANTE



FIGURA 6: FORMA DE ENTREGAR CARGA NORMAL A LA COMPONENTE DE ROCE

En las caras exteriores de la columna, paralelas al eje de giro inducido en los ensayos experimentales, se instalaron bisagras atornilladas a la base y vinculadas a la columna únicamente por roce. En las caras de las columnas en contacto con las bisagras se adhirieron láminas de lija fina con la finalidad de incrementar el coeficiente de roce entre las superficies en contacto. La fuerza normal entre las superficies en contacto de las bisagras y de la columna fue obtenida por medio de un par de pernos pre-tensados dispuestos en dirección ortogonal a eje de giro. La pre-tensión de los pernos fue aplicada controlando el torque de apriete de las tuercas de sujeción. Para disminuir el roce por torsión en el contacto de la cabeza de los pernos y las tuercas con las bisagras, se dispuso de rodamientos axiales entre ellas. Para regular de forma gradual el torque de apriete de los pernos y por lo tanto la pre-tensión de ellos, se dispusieron láminas de goma entre las superficies exteriores de las bisagras y perfiles de acero con forma de C que reparten uniformemente la presión de los pernos (Padilla-Reyes, J. et al, 2018). De esta manera, fue aplicado un torque de 10.55 Nm en cada uno de los pernos, logrando así que la fuerza normal entre las bisagras y el elemento de madera unido sea controlada y uniforme.

Respecto de los parámetros de diseño y modelo analítico de la conexión, éstos fueron escogidos con el objetivo de que la unión pudiera proteger a los elementos de madera limitando los esfuerzos internos que los solicitan y a la vez disipar energía en un evento sísmico. Esto se logra al diseñar la conexión para que comience a abrirse para una vez alcanzado un determinado momento en la unión, el cual debe ser menor al momento resistente de los elementos unidos. Alcanzado dicho momento, el momento solicitante transmitido a los elementos sufre incrementos marginales en comparación al momento de apertura, con incrementos significativos en deformación.

El marco puede rotar en las uniones en torno a los ejes de las bisagras, cambiando de un eje al del borde opuesto cuando el momento interno invierte su sentido. Por las características del roce, este siempre actúa en el sentido opuesto a la dirección de desplazamiento o giro que lo induce, haciendo que éste siempre busque frenar el movimiento. En presencia de rotación en la conexión, el momento debido al roce genera disipación de energía.

La configuración de los resortes en el sistema estructural (Figura 6) es simétrica incorporando cuatro resortes por tanto en la unión base-columna, como columna-viga. Para evitar el efecto de torsión del sistema, la cual no se busca evaluar, se arriostró al modelo estructural con cables ligeramente tensados, entre las caras de las columnas y la base, en planos perpendiculares a la dirección de la vibración libre.

En este documento se describe, los ensayos y análisis experimentales realizados al modelo estructural propuesto con diferentes casos de desplazamiento inicial impuesto, con el fin de evaluar el desempeño estructural de la conexión y su efectividad en incrementar el amortiguamiento en el modelo sometido a vibración libre.

Se diseñó una manivela para poder obtener el desplazamiento inicial deseado en los ensayos de vibración libre (Figura 7). Para esto se usaron rectángulos de madera con perforaciones a la cual se les instalaron rodamientos axiales que permiten que una barra de acero de 8mm pueda girar libremente con un roce mínimo. Se sujetó al marco de madera por medio de un cable flexible, el cual en su extremo opuesto se fijó a la barra de acero antes

mencionada. Al girar la barra el cable se enrolló, tirando del marco hasta alcanzar el desplazamiento deseado. Para poder girar la barra de acero, en su extremo libre se sujetó un caimán, pudiendo así aplicar torque y enrollar el cable unido a la estructura.



FIGURA 7: MATERIALIZACIÓN DEL MECANISMO PARA IMPONER LA DEFORMACIÓN INICIAL

2.4. Protocolo del ensayo experimental

Se realizaron ensayos de vibración libre en el laboratorio de ingeniería estructural de la UCSC, utilizando un sistema de desplazamiento inicial unidireccional (Figura 2). El desplazamiento inicial es generado por un sistema que cuenta con un cable que es enrollado a través de una manivela hasta tener el desplazamiento inicial requerido. Este cable se conecta al techo de la estructura principal, así una vez alcanzado el desplazamiento inicial requerido, al soltar el sistema permite generar el movimiento de vibración libre de la estructura. El sistema de tuercas en la unión de las bisagras y resortes en las uniones es ajustable, éstos pueden ser cambiados para generar un cierre rápido de las rotulas. Entre mayor es el desplazamiento inicial, mayor es la energía entregada al sistema, la cual se traduce en energía cinética por vibración y en energía disipada principalmente en las conexiones. Habiendo sido fijados los resortes y pernos en las bisagras de las conexiones, el funcionamiento del sistema de vibración libre está condicionado al desplazamiento inicial que permiten vibraciones unidireccionales debidas al cambiar dicho desplazamiento inicial. En los ensayos realizados se varió el desplazamiento inicial en 4cm, 5cm y 7 cm.



FIGURA 8: MODELO ESTRUCTURAL INSTALADO CON SISTEMA DE VIBRACIÓN LIBRE

2.5. Modelos estructurales a escala

Un modelo estructural se define como cualquier representación física de una estructura o parte de ésta, que una vez sometidas a cargas permiten obtener mediciones de magnitudes de interés previamente definidas por el investigador (San Martín, 2017). Existen diferentes formas de clasificar un modelo estructural, generalmente las más usadas aluden a la utilidad del modelo y a los resultados que se pretenden obtener.

Para determinar experimentalmente el efecto que tiene el amortiguamiento adicionado en términos de reducción de la respuesta del desplazamiento de techo y corte basal, se llevó a cabo la construcción de un modelo estructural semejante a un marco típico de una vivienda. Este modelo estructural semejante reproduce las propiedades dinámicas de marcos de características reales con diferentes razones de amortiguamiento, ξ .

El modelo estructural construido para el desarrollo de esta investigación es una estructuración fija, la cual consiste en un sistema de marco compuesto por una viga y dos columnas resistentes en dirección la dirección del desplazamiento inicial (Figura 8). Las conexiones de los elementos estructurales (vigas, columnas) que conforman el modelo estructural, son uniones que incorporan bisagras, resortes y gomas específicamente diseñadas. Adicionalmente se conectan al sistema dos sensores de desplazamiento y un acelerómetro con un pequeño factor de corrección ya que este se encuentra levemente por sobre la línea media de la viga. El sensor de desplazamiento pequeño que corresponde a 5 cm, es conectado en la unión base-columna y de esta manera medir el giro en la base, y así poder determinar cuándo se abre la rótula y el tiempo que demora en cerrarse. También se agrega un sensor de desplazamiento en el techo de la estructura, que corresponde a un LVDT de 15 cm, el cual medirá los desplazamientos de la estructura en dirección al input. Por último la estructura es empotrada en su base para poder estudiar los resultados buscados.

2.6. Giro en la base

El giro en la base se obtiene indirectamente, ya que el sensor solo mide desplazamiento. El pivote es variable según la apertura de la rótula, la configuración se muestra en la Figura 9.



FIGURA 9: DISPOSITIVO PARA OBTENER GIRO INDIRECTAMENTE A TRAVÉS DE DESPLAZAMIENTO

De esta manera se utiliza la siguiente ecuación para obtener su valor asumiendo que $\theta \approx u_\theta/L_\theta$:

$$\theta_b = \frac{u_\theta}{L_\theta + \frac{b}{2}(\text{Sign}(u_\theta) + 1)} \quad (1)$$

Donde:

θ_b : Giro en la base.

u_θ : Desplazamiento vertical Registrado en LVDT.

L_θ : Distancia entre Sensor de desplazamiento y borde interno de la columna.

b : Distancia entre los ejes de giro de las bisagras.

2.7. Corte basal

Debido a que con el acelerómetro se obtiene directamente la aceleración en el grado de libertad, por lo que el corte basal se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$Q_o = m_{eq}^{(u_t)} \ddot{u}_t^{abs} \quad (2)$$

Donde:

Q_o : Corte Basal.

u_t : Desplazamiento de techo.

$m_{eq}^{(u_t)}$: Masa equivalente del sistema dinámico, proyectada al grado de libertad de techo.

\ddot{u}_t^{abs} : Aceleración absoluta del grado de libertad de techo.

2.8. Razón de amortiguamiento del sistema

La razón de amortiguamiento es una propiedad imprescindible para describir la respuesta vibratoria de una estructura. Con ella se pueden realizar modelos computacionales de manera de mejorar el análisis y dimensionamiento de estos sistemas.

La energía disipada por un sistema dinámico en vibración se relaciona con su razón de amortiguamiento interno. Con el fin de determinar esta última, la energía disipada fue calculada en cada ciclo del ensayo de vibración libre. Ésta fue comparada con la energía disipada por un sistema de igual masa y rigidez pero con amortiguamiento viscoso, con el fin de determinar por equivalencia la razón de amortiguamiento, ξ_{eq} , del sistema completo. Esto permitió determinar cómo varía ξ_{eq} en cada ciclo, en función del desplazamiento máximo en cada ciclo de vibración libre.

De esta manera igualando la energía histerética disipada por la estructura analizada con la energía disipada de un sistema viscoso equivalente, se tiene un ξ equivalente para cada ciclo:

$$E_{dis}^{Hist} = E_{dis}^{Visc} \rightarrow \xi_{eq} \quad (3)$$

Donde la energía disipada viscosa del sistema equivalente se calcula de la siguiente manera.

$$E_{dis}^{Visc} = \int_{1c} (2\xi_{eq}\bar{\omega}M_{eq})\dot{u}^2 dt \quad (4)$$

De esta manera se puede determinar el amortiguamiento equivalente en el ciclo de análisis como:

$$\xi_{eq}^{1c} = \frac{E_{dis}^{Hist(1c)}}{2\bar{\omega}M_{eq} \int_{1c} \dot{u}_t^2 dt} \quad (5)$$

Donde la frecuencia la frecuencia natural característica, $\bar{\omega}$, se obtiene a través de la siguiente expresión:

$$\bar{\omega} = \frac{2\pi}{T_c} \quad (6)$$

Donde:

T_c : Tiempo de duración del ciclo de análisis.

$\bar{\omega}$: Frecuencia característica o fundamental de la estructura en el ciclo de análisis.

M_{eq} : Masa equivalente del sistema proyectada al grado de libertad de desplazamiento de techo.

Luego se efectuó el procesamiento de datos en el programa MATLAB aplicando un filtro de frecuencias para eliminar los ruidos externos a la medición considerando la alta sensibilidad de los equipos utilizados. Obteniendo así gráficamente la aceleración filtrada del sistema de donde se pudo extraer los datos de interés en cada ciclo obtenido

Gráficamente se visualizaron las amplitudes generadas en cada ensayo de vibración libre realizado al sistema, de esta manera determinar la razón de amortiguamiento crítico ξ mediante la técnica de decremento logarítmico, la cual se describe siguiente expresión:

$$\xi = \frac{\sqrt{1-\xi}}{2\pi \cdot N} \cdot \text{Ln} \left(\frac{A_k}{A_{k+N}} \right) \approx \frac{1}{2\pi \cdot N} \text{Ln} \left(\frac{A_k}{A_{k+N}} \right) \quad (7)$$

Donde:

- N : Número de ciclos consecutivos
 A_k : Amplitud inicial
 A_{k+N} : Amplitud N ciclos consecutivos después

3. RESULTADOS

Los gráficos fueron truncados en 4 zonas, la primera donde se inicia el ensayo, la segunda corresponde al punto donde la aceleración pasa por el punto cero por segunda vez, el tercer truncamiento corresponde a la zona de mayor amortiguamiento, y el último define donde la rótula se cierra.

El truncamiento es debido a que el análisis dinámico comienza en la segunda línea vertical, y es debido a esto que el desplazamiento inicial no se asocia al indiciado, ya que desde ahí hacia atrás no fueron considerados los datos debido a que en el inicio hay una carga estática, y la fuerza inercial no está siendo caracterizado correctamente. Una vez que la aceleración entra en régimen y el comportamiento extraño desaparece, el resultado de corte basal se puede predecir desde ahí en adelante como fue mostrado en la ecuación de corte basal.

Al observar el gráfico de corte basal versus desplazamiento de techo, se puede verificar como disminuye el corte basal, por lo que disipa una gran cantidad de energía debido a que crecen los valores negativos de corte a medida que ocurre el primer desplazamiento de techo. Esta gran disipación ocurre apenas en una mitad de ciclo, y corresponde a la zona donde más energía está disipando el sistema de rotulas.

3.1. Resultados con $u_0=4\text{cm}$:

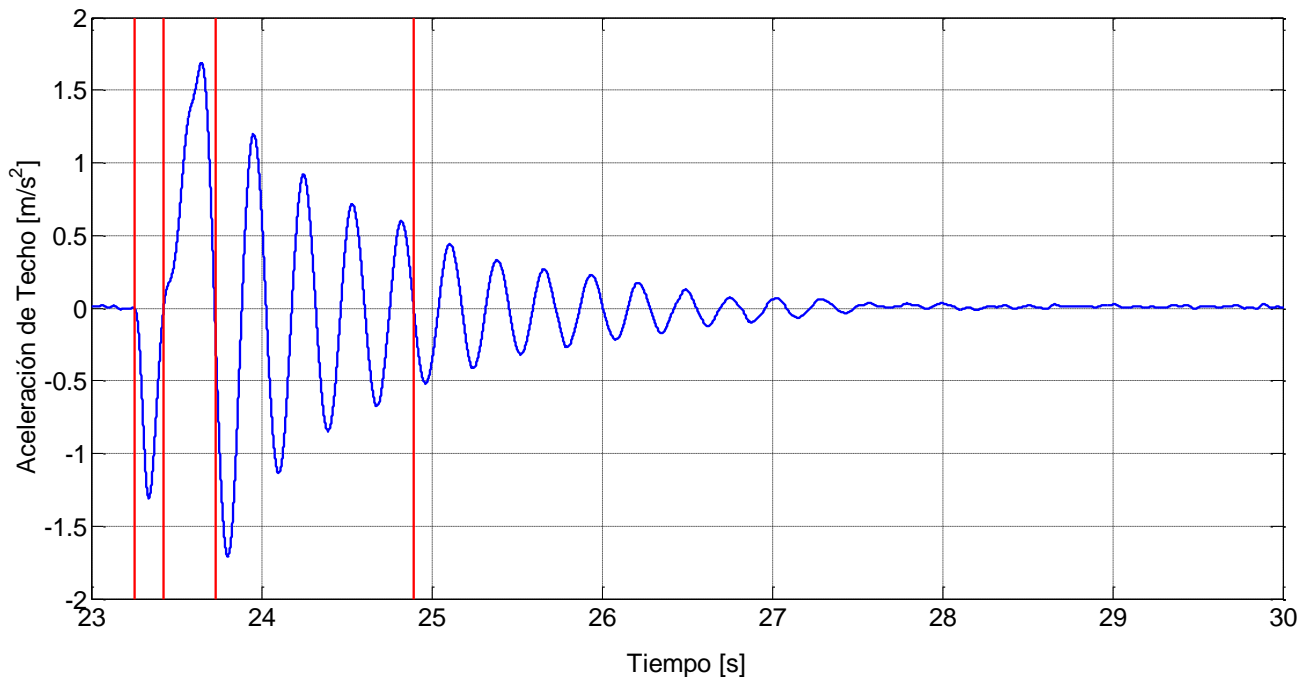


FIGURA 7: PROCESAMIENTO DE DATOS DE REGISTROS DE ACCELERACIÓN, VERSUS TIEMPO, DE UN ENSAYO CON DESPLAZAMIENTO INICIAL DE 4CM.

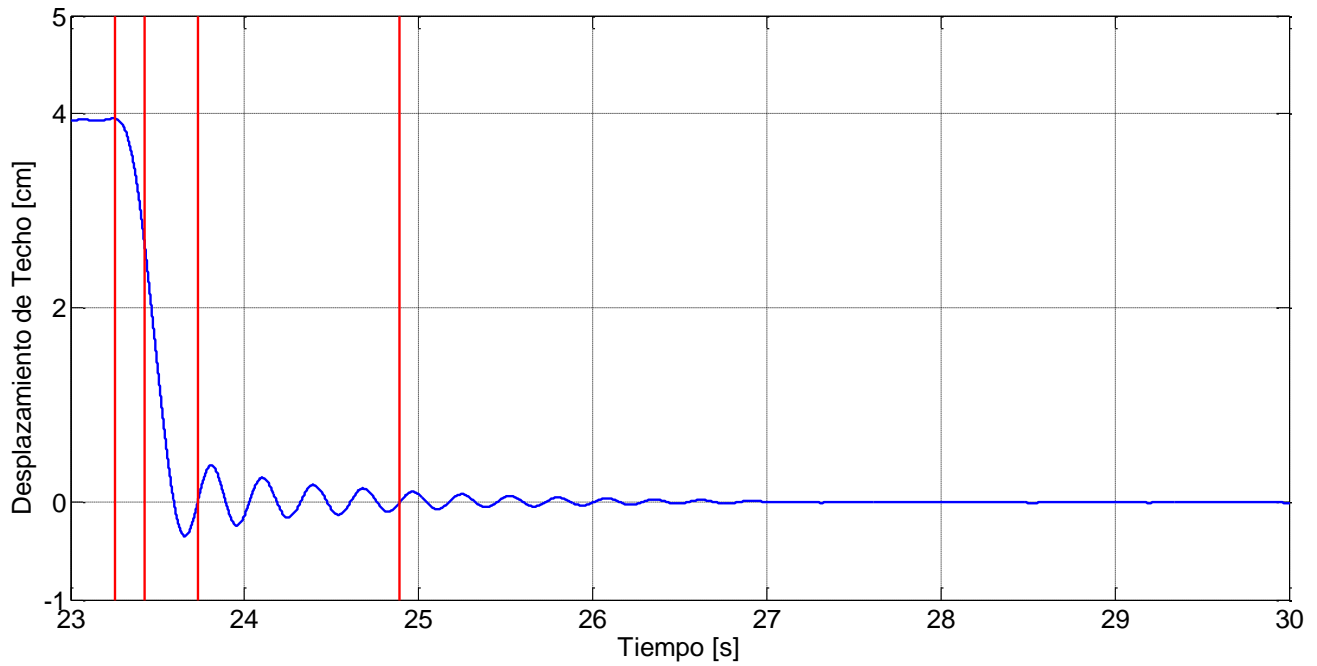


FIGURA 8: PROCESAMIENTO DE DATOS DE REGISTROS DE DESPLAZAMIENTO DE TECHO, VERSUS TIEMPO, DE UN ENSAYO CON DESPLAZAMIENTO INICIAL DE 4CM.

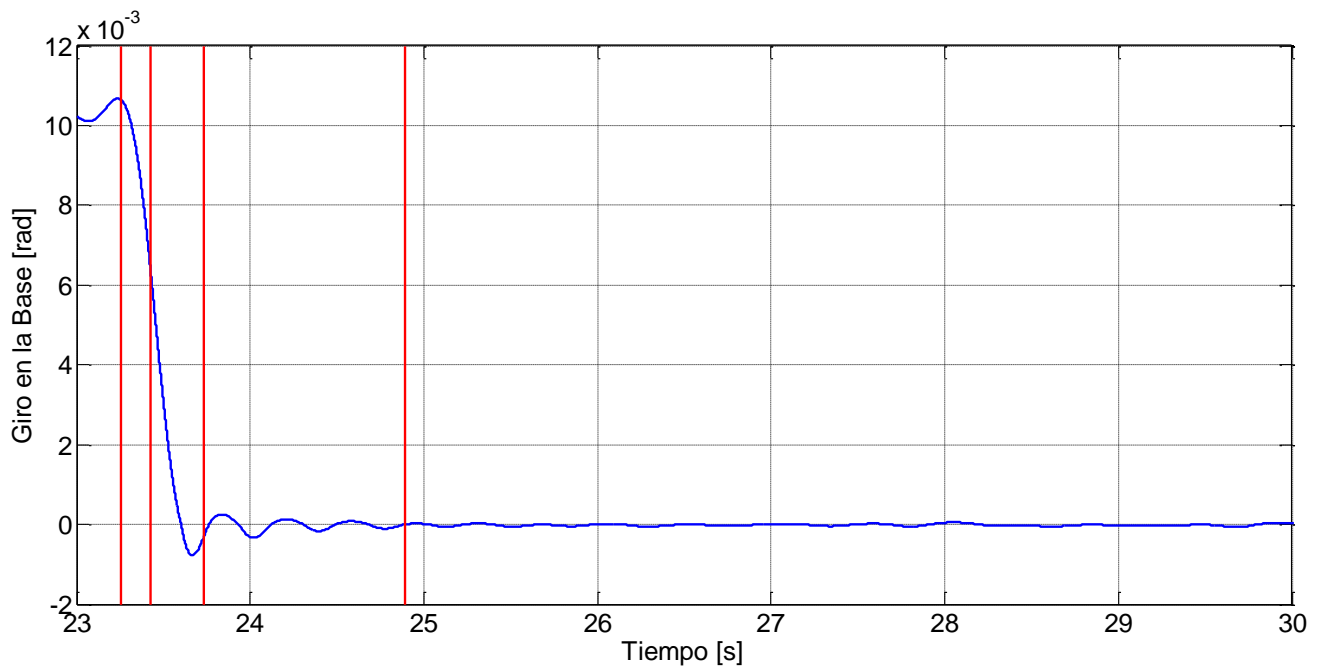


FIGURA 9: PROCESAMIENTO DE DATOS DE REGISTROS DE GIRO EN LA BASE, VERSUS TIEMPO, DE UN ENSAYO CON DESPLAZAMIENTO INICIAL DE 4CM.

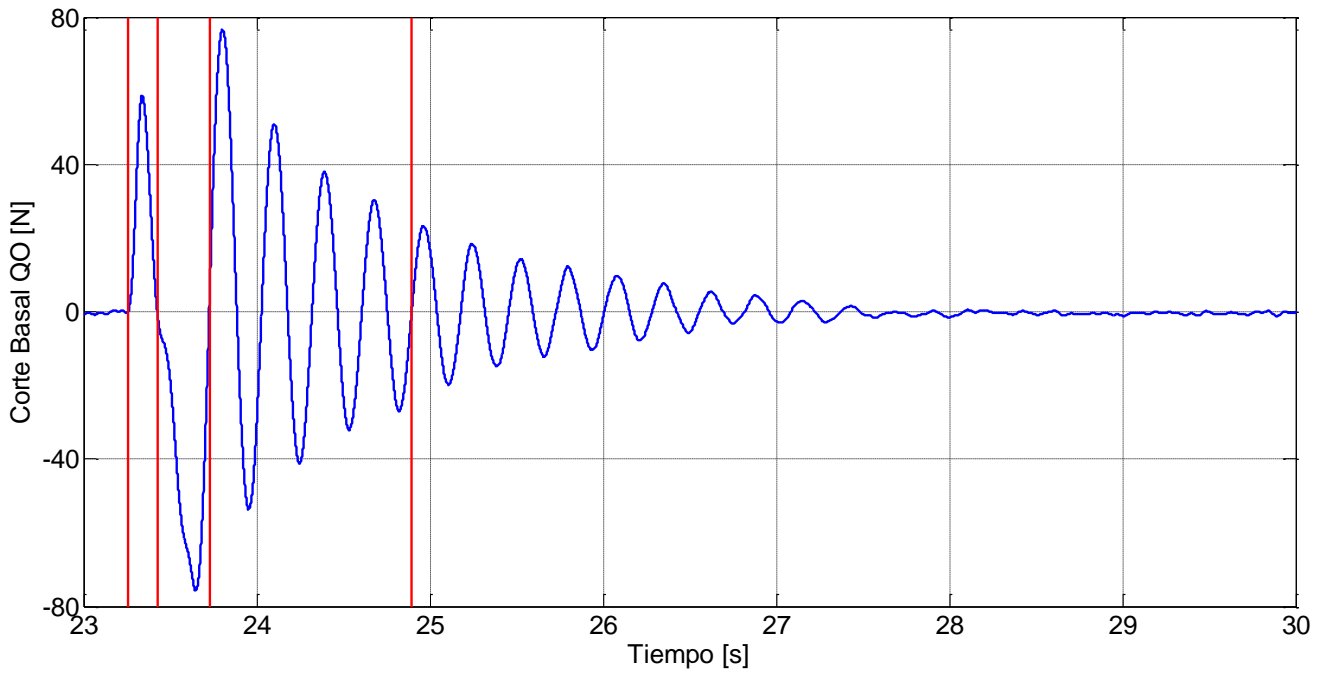


FIGURA 10: PROCESAMIENTO DE DATOS DE REGISTROS DE CORTE BASAL, VERSUS TIEMPO, DE UN ENSAYO CON DESPLAZAMIENTO INICIAL DE 4CM.

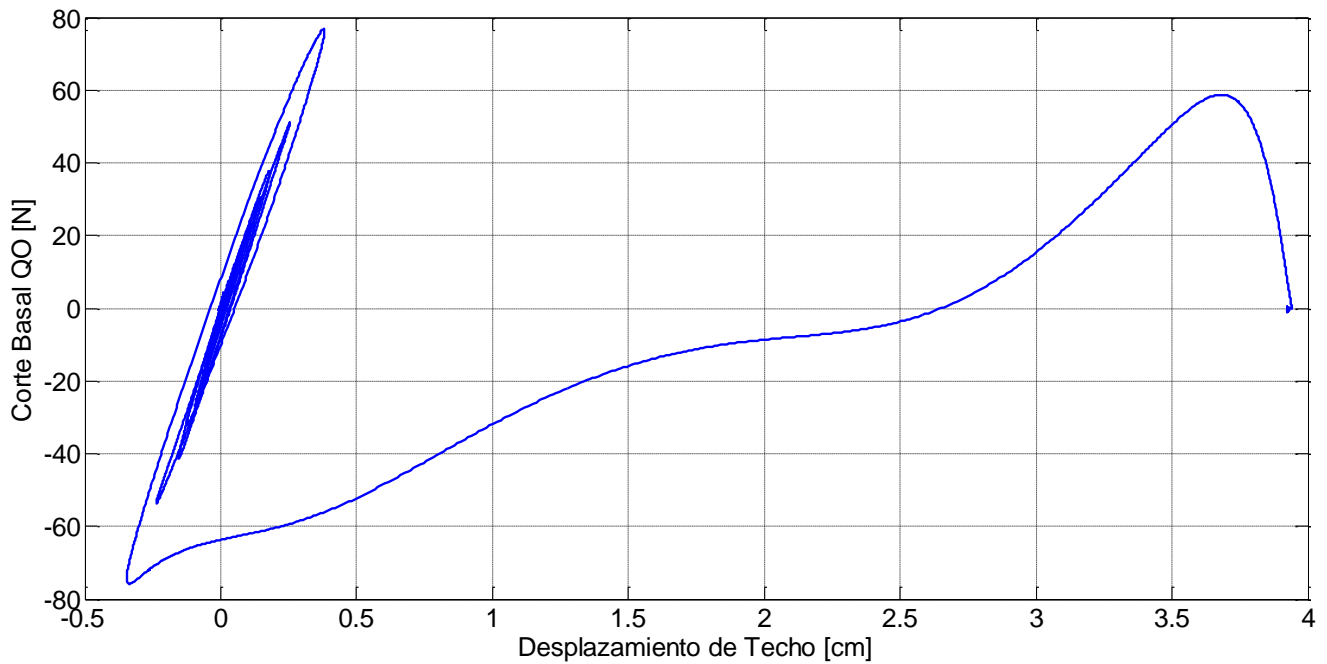


FIGURA 11: PROCESAMIENTO DE DATOS DE REGISTROS DE CORTE BASAL, VERSUS DESPLAZAMIENTO DE TECHO, DE UN ENSAYO CON DESPLAZAMIENTO INICIAL DE 4CM.

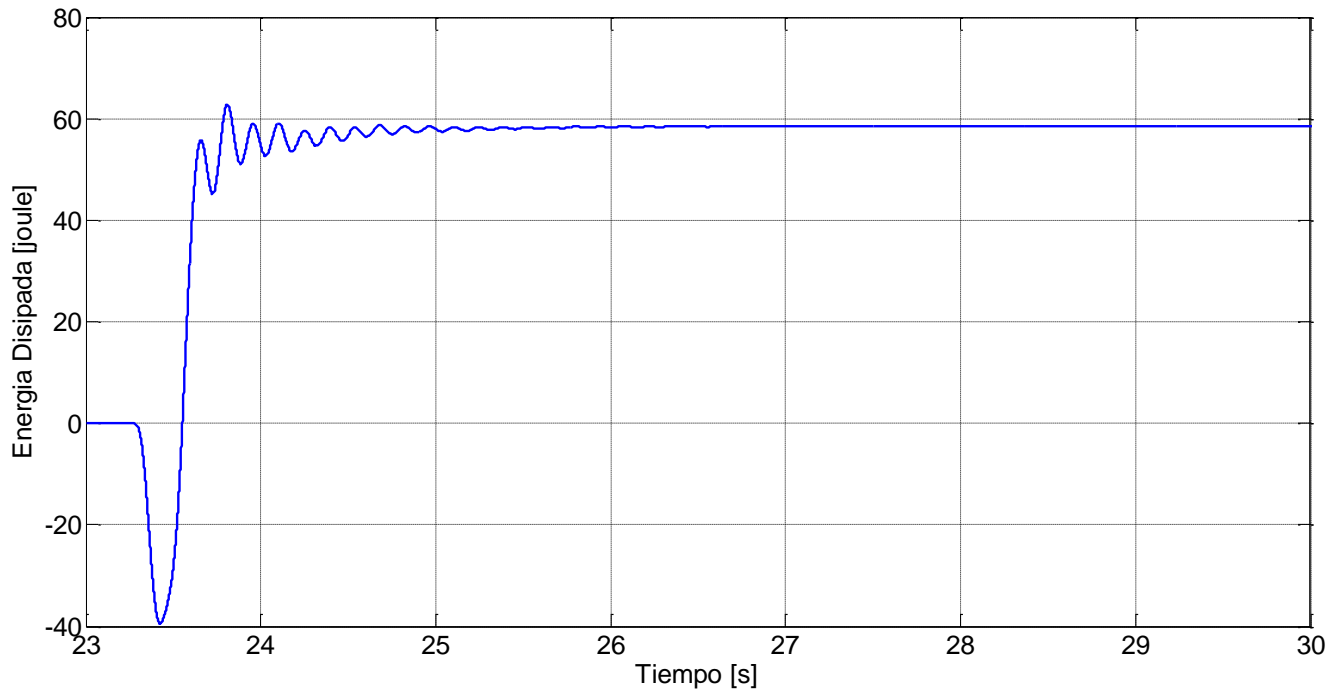


FIGURA 12: PROCESAMIENTO DE DATOS DE REGISTROS DE ENERGÍA DISIPADA, VERSUS TIEMPO, DE UN ENSAYO CON DESPLAZAMIENTO INICIAL DE 4CM.

3.2. Resultados con $u_0=5\text{cm}$:

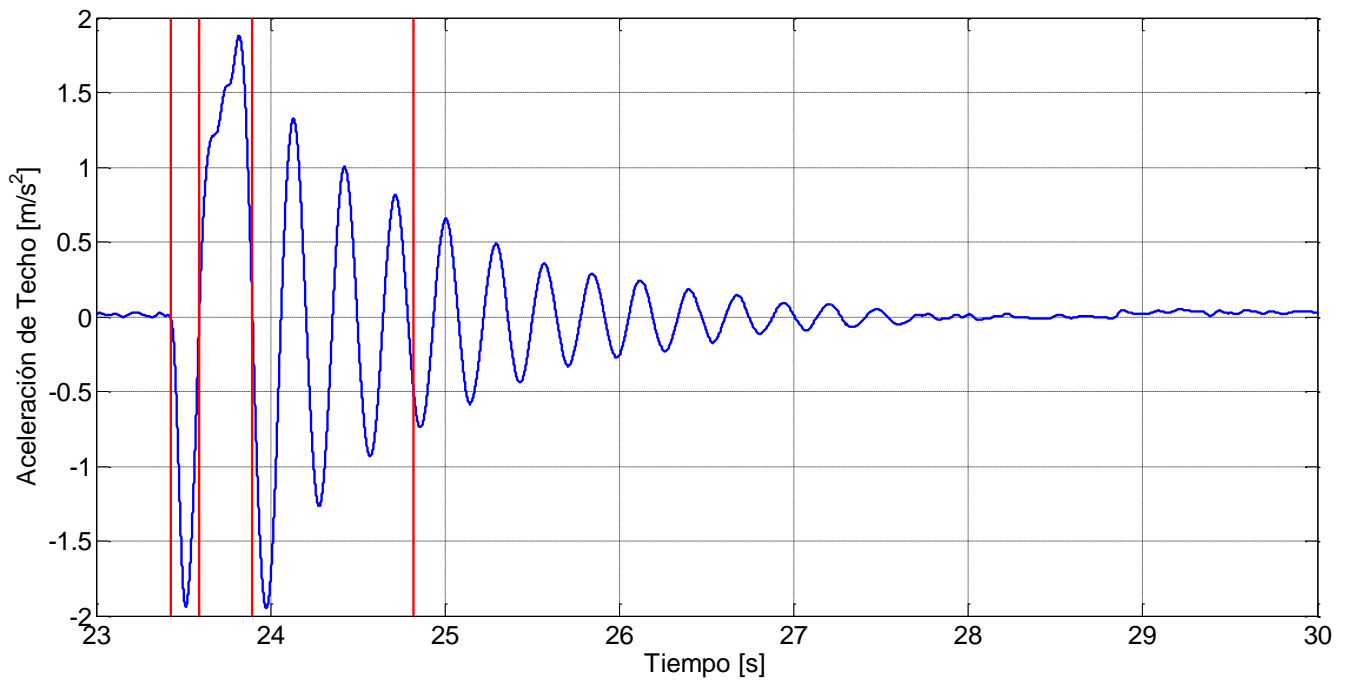


FIGURA 13: PROCESAMIENTO DE DATOS DE REGISTROS DE ACELERACIÓN DE TECHO, VERSUS TIEMPO, DE UN ENSAYO CON DESPLAZAMIENTO INICIAL DE 5CM.

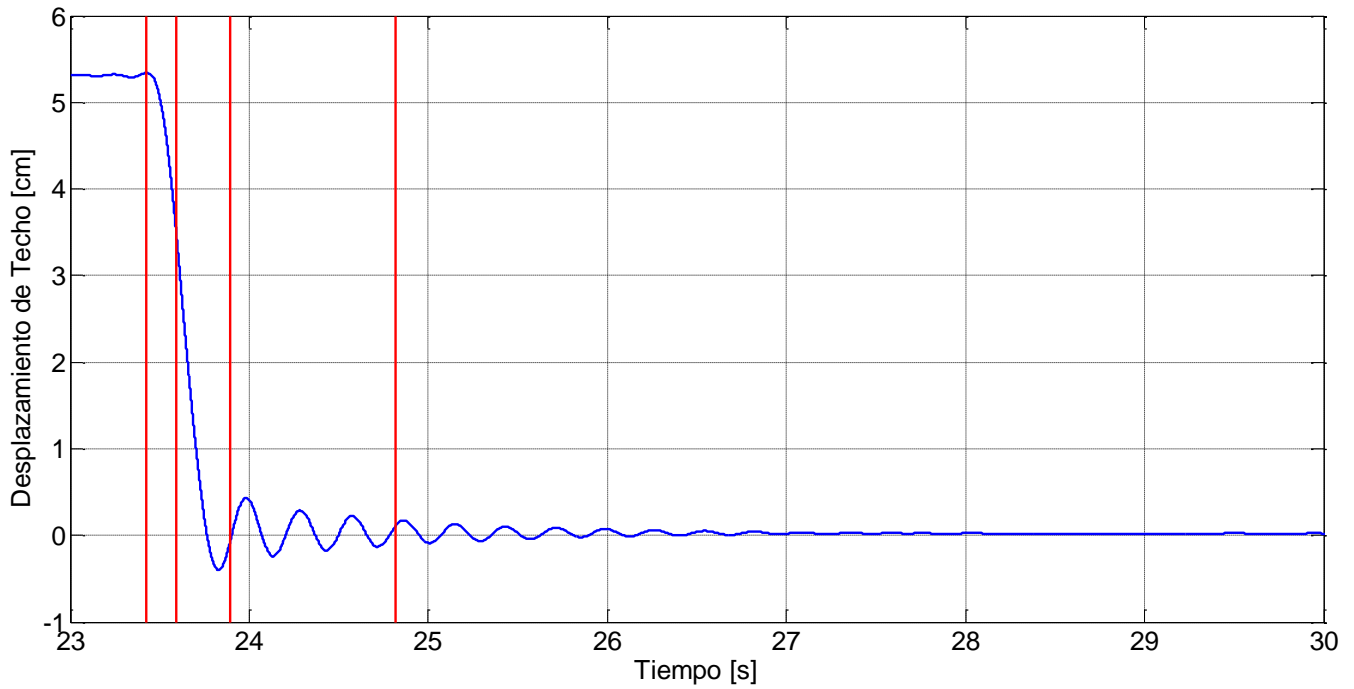


FIGURA 14: PROCESAMIENTO DE DATOS DE REGISTROS DE DESPLAZAMIENTO DE TECHO, VERSUS TIEMPO, DE UN ENSAYO CON DESPLAZAMIENTO INICIAL DE 5CM.

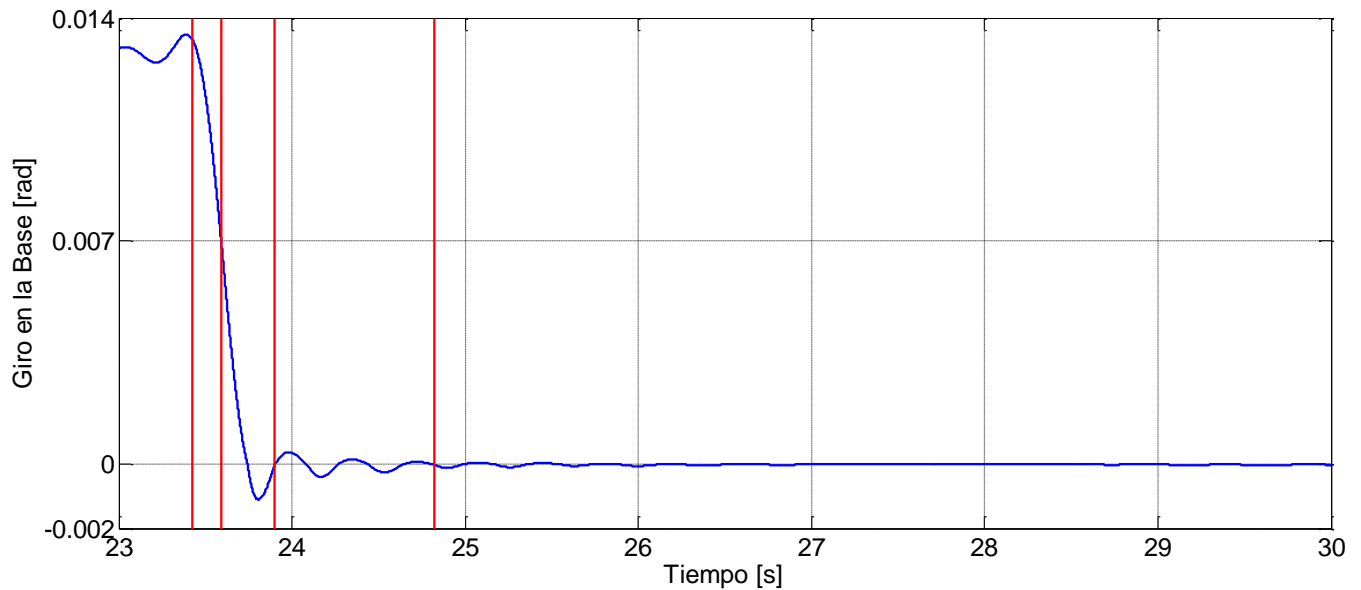


FIGURA 15: PROCESAMIENTO DE DATOS DE REGISTROS DE GIRO EN LA BASE, VERSUS TIEMPO, DE UN ENSAYO CON DESPLAZAMIENTO INICIAL DE 5CM.

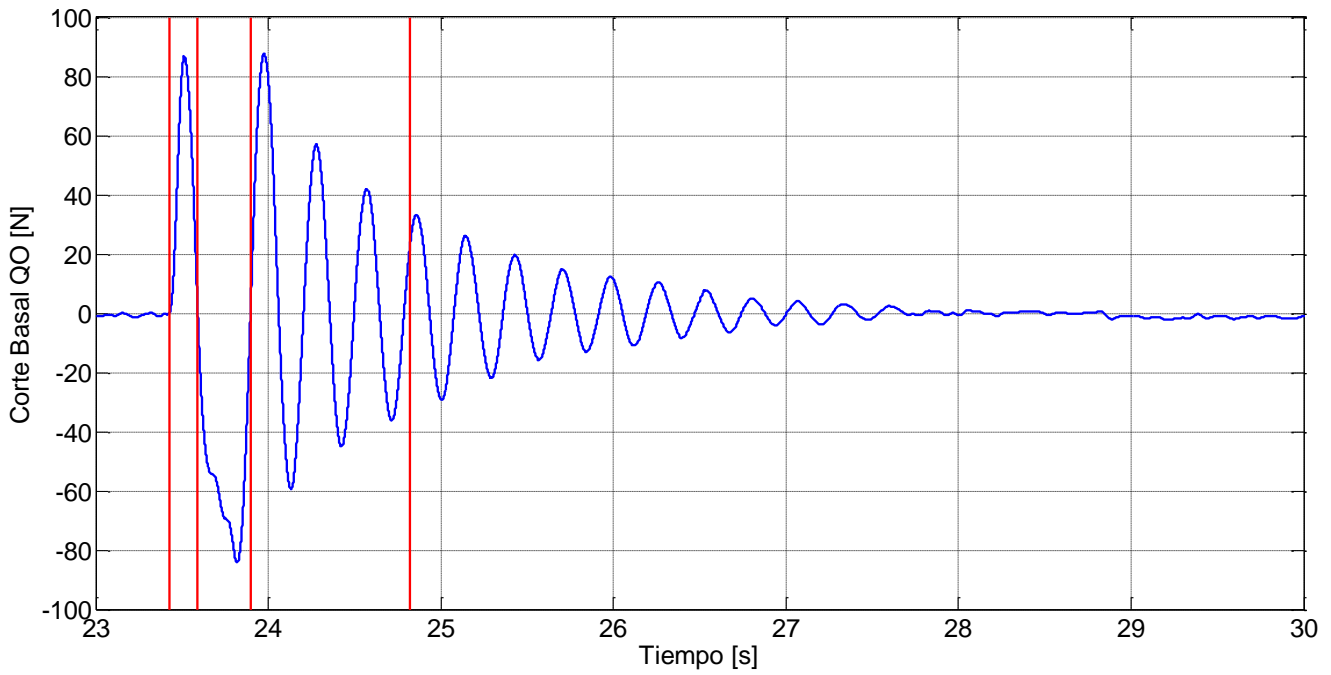


FIGURA 19: PROCESAMIENTO DE DATOS DE REGISTROS DE CORTE BASAL, VERSUS TIEMPO, DE UN ENSAYO CON DESPLAZAMIENTO INICIAL DE 5CM.

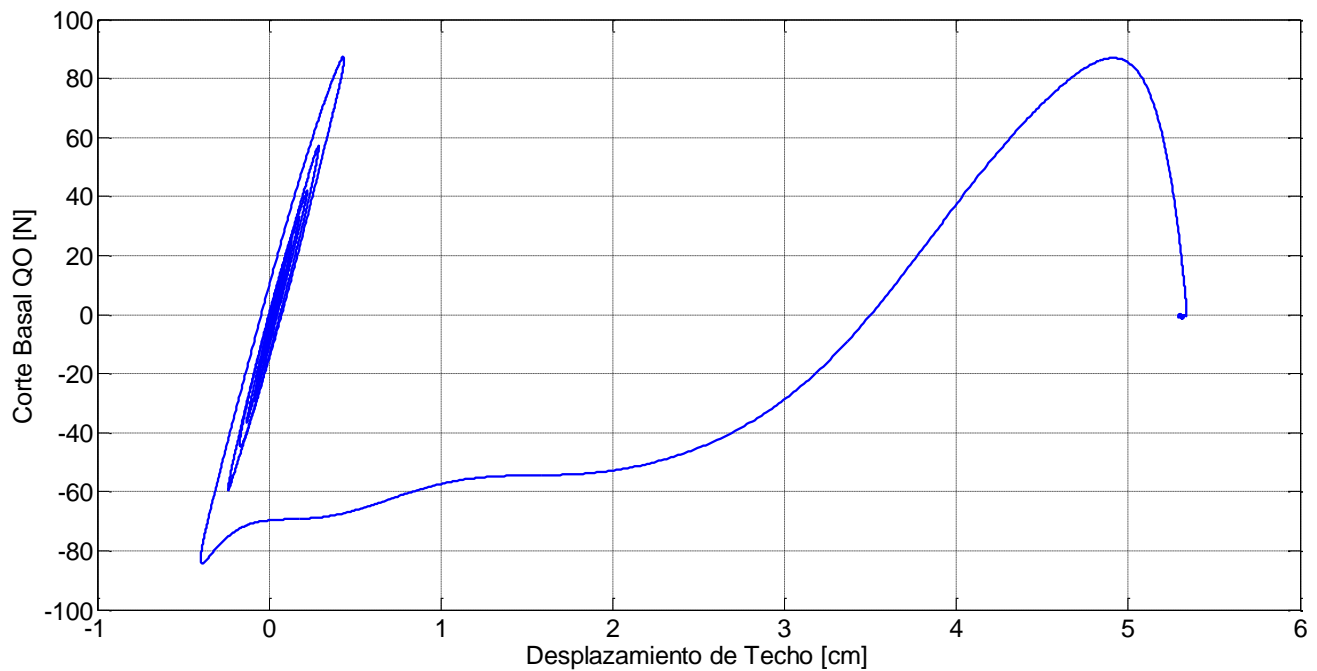


FIGURA 16: PROCESAMIENTO DE DATOS DE REGISTROS DE CORTE BASAL, VERSUS DESPLAZAMIENTO DE TECHO DE UN ENSAYO CON DESPLAZAMIENTO INICIAL DE 5CM.

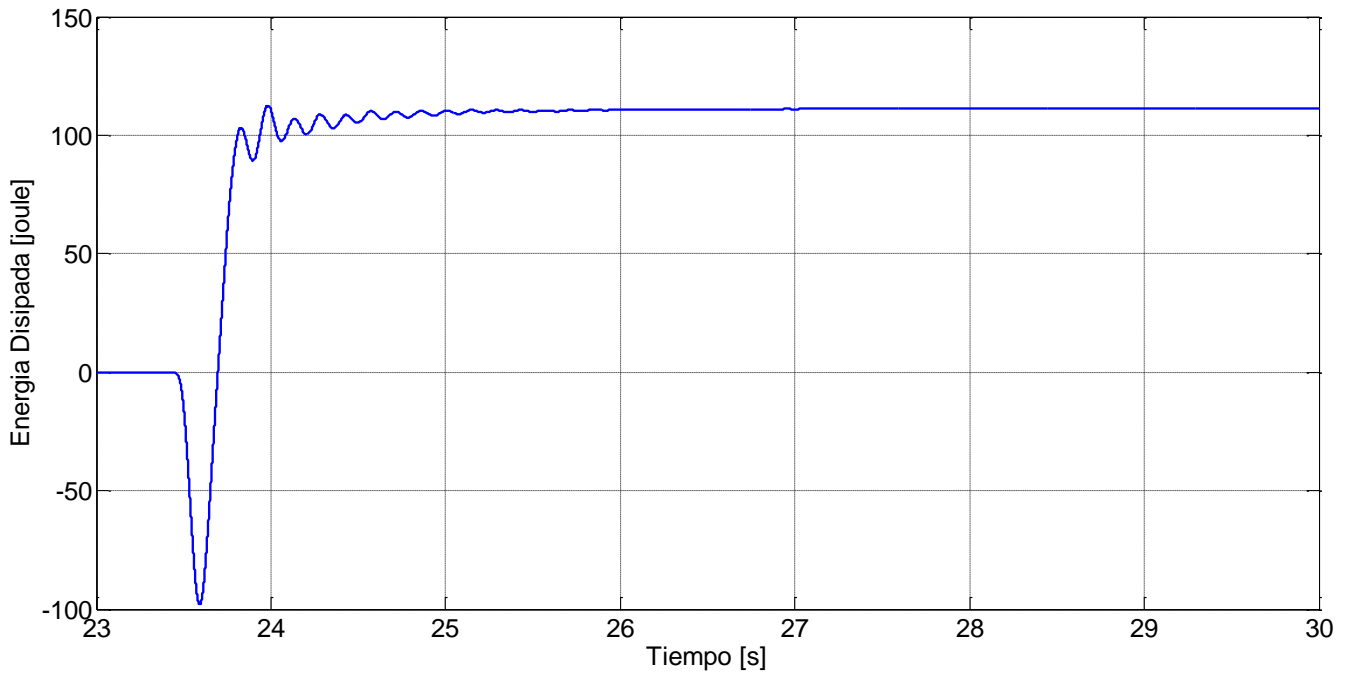


FIGURA 17: PROCESAMIENTO DE DATOS DE REGISTROS DE ENERGÍA DISIPADA, VERSUS TIEMPO, DE UN ENSAYO CON DESPLAZAMIENTO INICIAL DE 5CM.

3.3. Resultados con $u_0=7\text{cm}$:

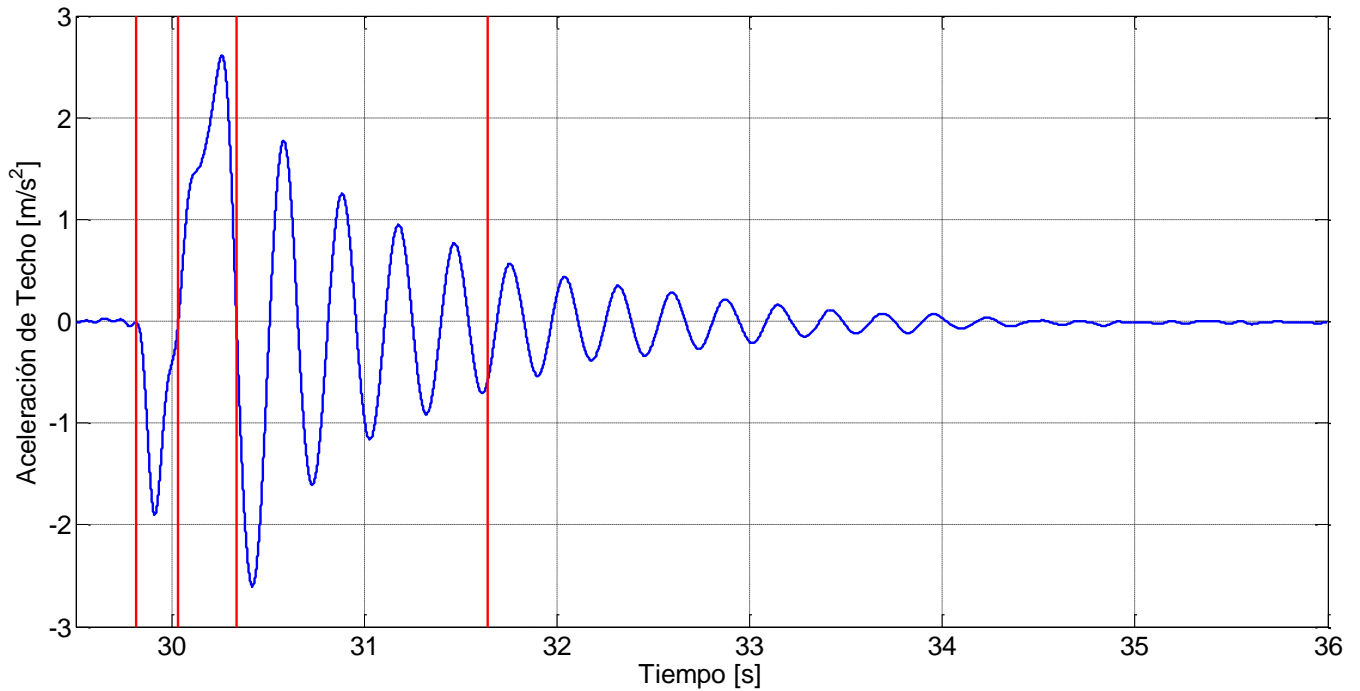


FIGURA 18: PROCESAMIENTO DE DATOS DE REGISTROS DE ACELERACIÓN DE TECHO, VERSUS TIEMPO, DE UN ENSAYO CON DESPLAZAMIENTO INICIAL DE 7CM.

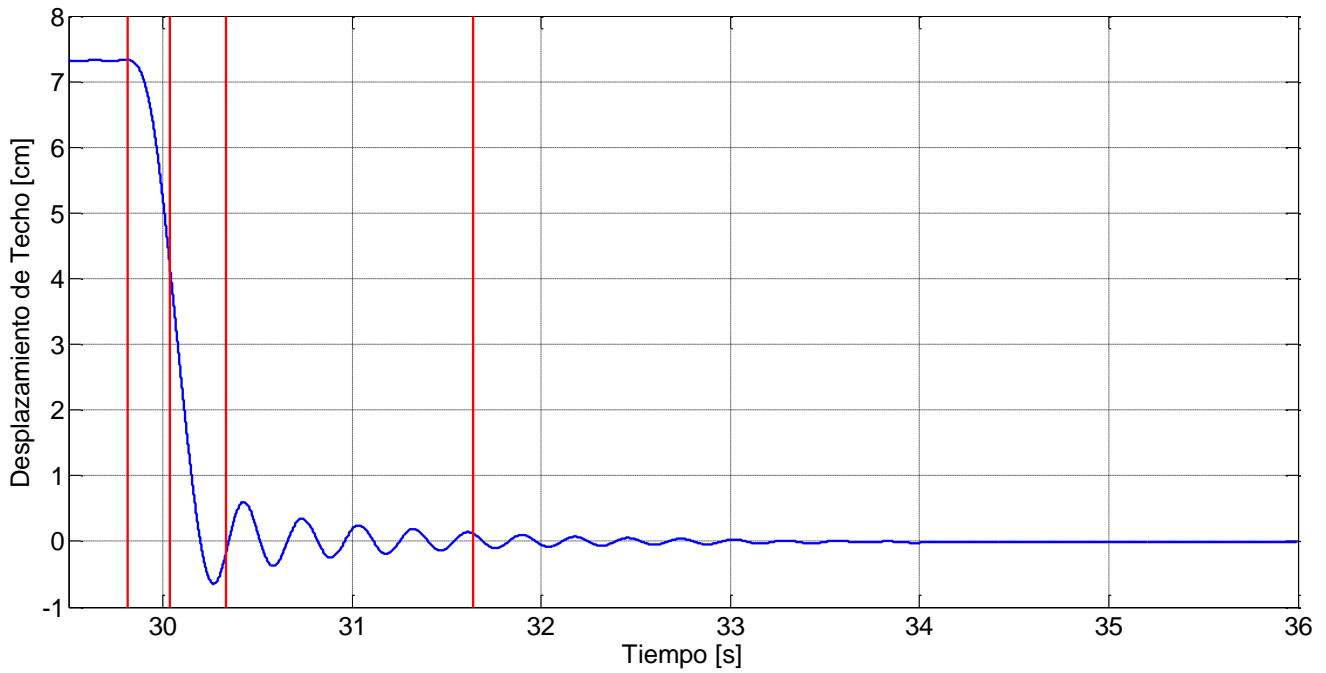


FIGURA 19: PROCESAMIENTO DE DATOS DE REGISTROS DE DESPLAZAMIENTO DE TECHO, VERSUS TIEMPO, DE UN ENSAYO CON DESPLAZAMIENTO INICIAL DE 7CM.

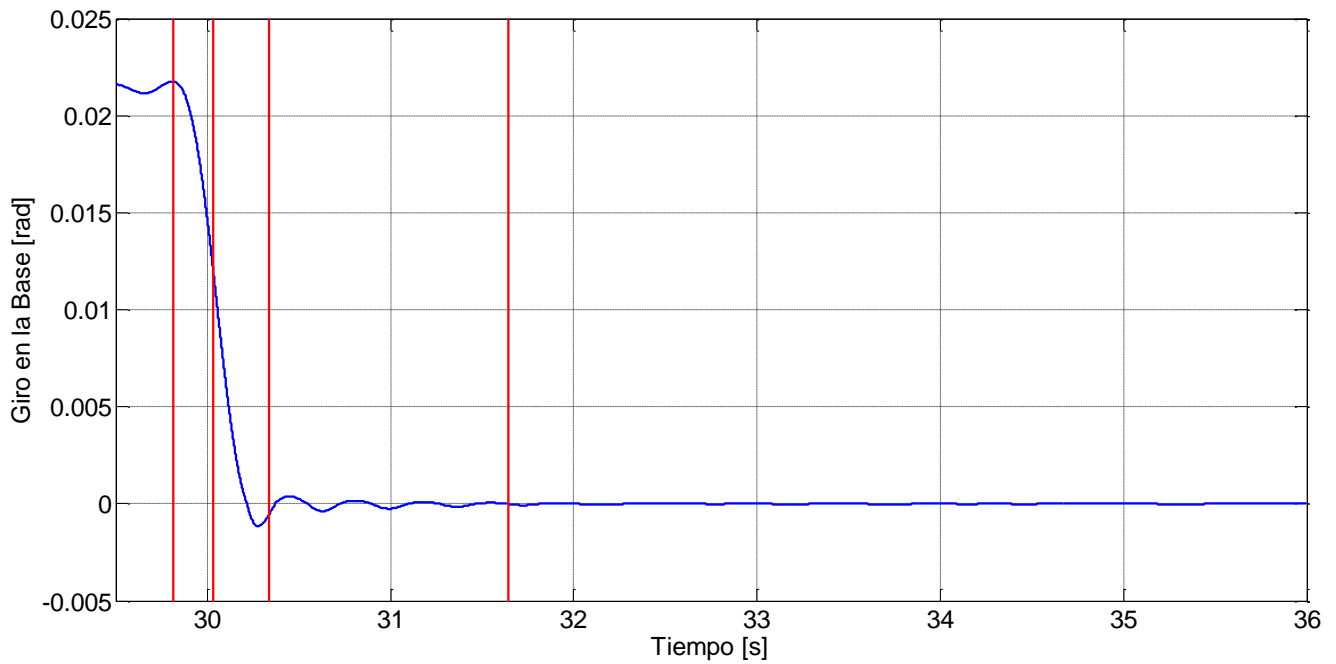


FIGURA 20: PROCESAMIENTO DE DATOS DE REGISTROS DE GIRO EN LA BASE, VERSUS TIEMPO, DE UN ENSAYO CON DESPLAZAMIENTO INICIAL DE 7CM.

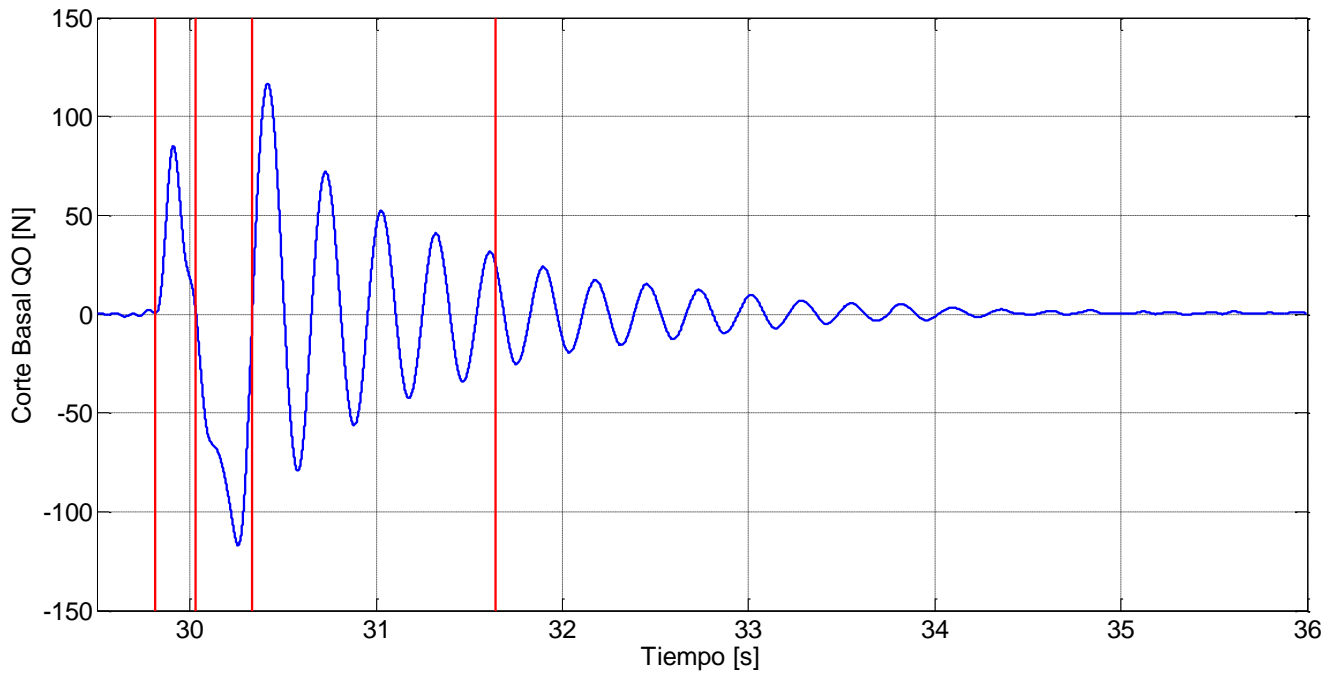


FIGURA 21: PROCESAMIENTO DE DATOS DE CORTE BASAL, VERSUS TIEMPO, DE UN ENSAYO CON DESPLAZAMIENTO INICIAL DE 7CM.

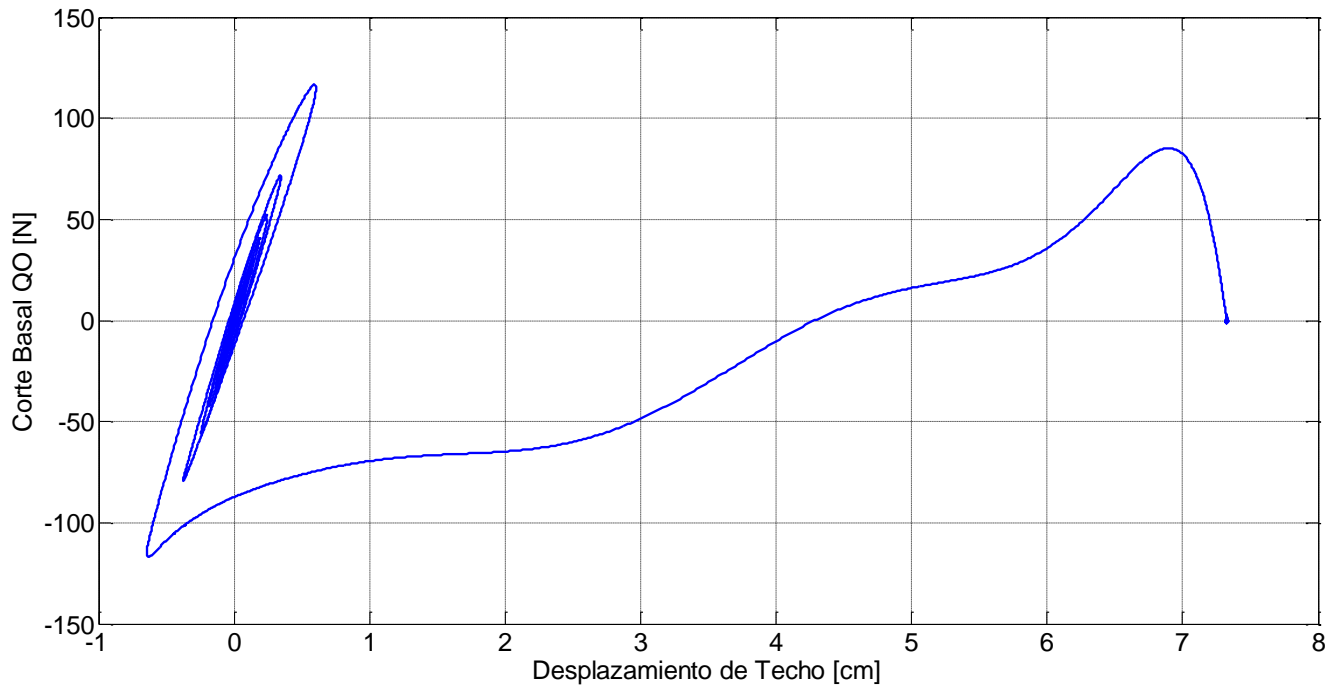


FIGURA 22: PROCESAMIENTO DE DATOS DE REGISTROS DE CORTE BASAL, VERSUS DESPLAZAMIENTO DE TECHO, DE UN ENSAYO CON DESPLAZAMIENTO INICIAL DE 7CM.

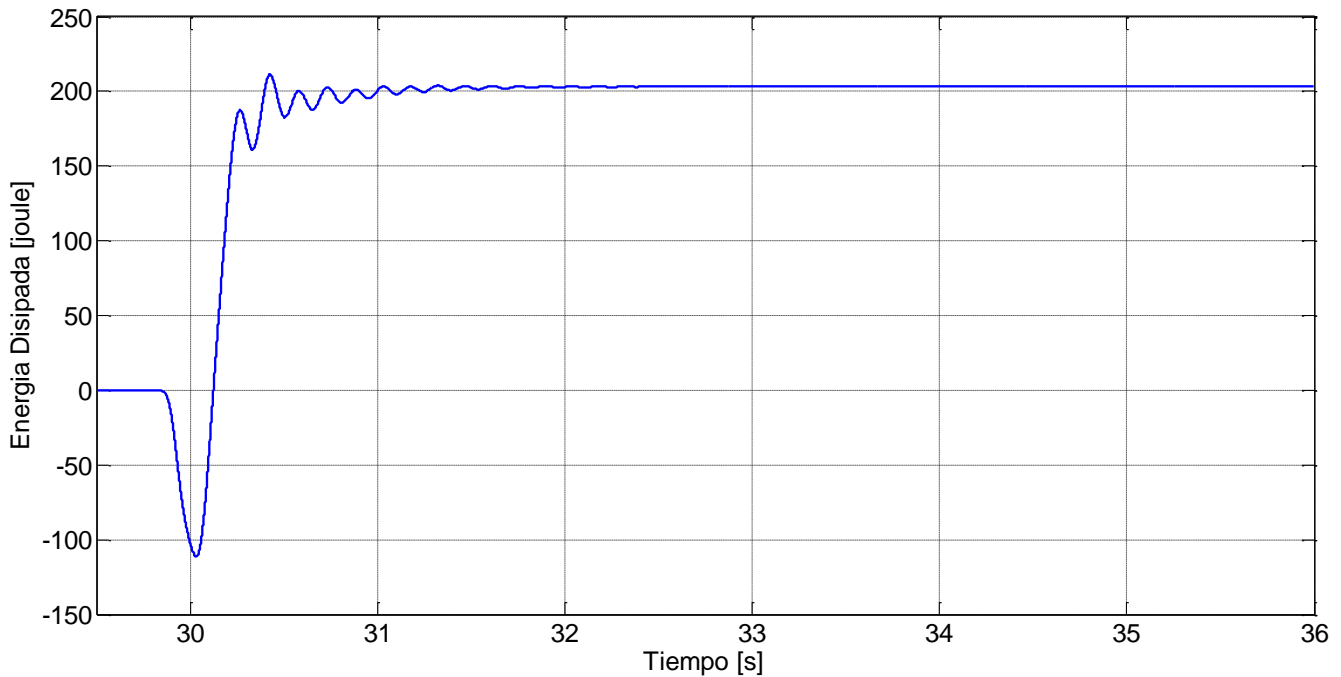


FIGURA 23: PROCESAMIENTO DE DATOS DE REGISTROS DE ENERGÍA DISIPADA, VERSUS TIEMPO, DE UN ENSAYO CON DESPLAZAMIENTO INICIAL DE 7CM.

Se indica que el análisis dinámico comienza en la segunda línea vertical, y a esto se atribuye en que el desplazamiento inicial no se asocia al indiciado, ya que desde ahí hacia atrás no fueron considerados debido a que en el inicio hay una carga estática, y la fuerza inercial no está siendo caracterizado correctamente. Una vez que la aceleración entra en régimen y el comportamiento extraño desaparece, el resultado de corte basal se puede predecir desde ahí en adelante como fue mostrado en la ecuación de corte basal.

Al observar el grafico de corte basal versus desplazamiento de techo, se puede verificar como disminuye el corte basal, por lo que disipa una gran cantidad de energía debido a que crecen los valores negativos de corte a medida que ocurre el primer desplazamiento de techo. Esta gran disipación ocurre apenas en una mitad de ciclo, y corresponde a la zona donde más energía está disipando el sistema de rotulas.

Mediante la técnica de decremento logarítmico, se pudieron obtener resultados y diferenciar las razones de amortiguamiento producidas por las rotulas ($\xi_{Mrp,u}$), del amortiguamiento interno de la estructura ($\xi_{int,u}$).

Tabla 1: Razón de Amortiguamiento Interno.

$\xi_{int,u=4}$	3.98%
$\xi_{int,u=5}$	4.07%
$\xi_{uint=7}$	4.07%



Tabla 2: Razón de Amortiguamiento Marco con Rotulas Plásticas.

$\xi_{Mrp,u=4}$	37.62%
$\xi_{Mrp,u=5}$	31.33%
$\xi_{Mrp,u=7}$	31.56%

Una vez que la unión semirrígida se cierra la estructura tiene un periodo natural de oscilación de la estructura es constante, por lo que la técnica de decremento logarítmico es válido.

La tabla 2 es el amortiguamiento adicionado por las conexiones semirrígidas y corresponde al total de la estructura calculado con la ecuación de amortiguamiento equivalente menos la razón de amortiguamiento interno.

Se puede desprender de las tablas mostradas que a mayor desplazamiento inicial, la estructura obtiene un menor amortiguamiento, obteniendo lo opuesto a los resultados esperados, lo que se puede atribuir a múltiples factores, los que pueden ser debidos al truncamiento impuesto y/o errores en el ensayo.

4. CONCLUSIONES

Se diseñó y construyó un marco de madera compuesto de dos columnas y una viga, usando para estos elementos secciones de madera de 10 y 12.5 cm de ancho.

Se implementaron en las uniones de los elementos estructurales conexiones semirrígidas materializados por medio de resortes y disipadores friccionales.

Se diseñó un protocolo experimental para someter el marco de madera a vibración libre, esto con el fin de verificar el comportamiento semirrígido de las conexiones y su capacidad para adicionar amortiguamiento a la estructura.

La ejecución de los ensayos permitió verificar el comportamiento semirrígido de la conexión, ya que esta se abrió al imponer un desplazamiento inicial, disipando gran cantidad de energía. La conexión se cierra rápidamente, observándose vibración por deformación de elementos estructurales.

De los resultados se pudo determinar que cuando la conexión está cerrada, el amortiguamiento interno fue de aproximadamente 4%, sin embargo, al activarse las conexiones, la disipación de energía proporcionada por ellos, permitió aumentar a aproximadamente un 33% como valor promedio el amortiguamiento. Lo anterior permite concluir que la conexión semirrígida propuesta aumenta significativamente el amortiguamiento del sistema. Esto tiene potenciales beneficios en el diseño de estructuras de pórticos de madera ya que reduce la demanda sísmica.

Finalmente se verificó que la conexión con conexiones semirrígidas puede auto-centrarse evitando que la estructura quede con deformación permanente.

5. AGRADECIMIENTOS

Agradecer el apoyo de CORFO, en el marco del programa “Apoyo a la Realización de Tesis o Trabajo Profesional de Educación Superior de Pregrado” Código del proyecto N°17CTEBI-83568.



6. REFERENCIAS

Chopra, A. K. (1995). *Dynamics of structures*. New Jersey: Prentice hall.

MINVU. (2016). Obtenido de <http://www.madera21.cl>: <http://www.madera21.cl/2757-2/#1480538092690-c18529eb-5e3c>

Padilla-Reyes, J. M. (13 de Enero de 2017). A new self-Centering dissipative connection for glued laminated timber structures. *16th World Conference on Earthquake Engineering*.

San Martín, J. (2017). Análisis experimental de un dispositivo de unión para estructuras de madera, con capacidad de disipación de energía. *Simposio de habilitación profesional del departamento de Ingeniería Civil*.