

Análisis Experimental de un Dispositivo de Unión para Estructura de Madera, con Capacidad de Disipación de Energía

J. San Martín Canales¹, N. Maureira Carsalade², J. Padilla Reyes³

RESUMEN

Chile está ubicado en el cinturón de fuego del pacífico, donde se libera más del 90% de la energía sísmica promedio anual a nivel mundial. Esto genera pérdidas materiales y en algunos casos pérdidas humanas. Es por esto que toda estructura en Chile debe ser diseñada cumpliendo estándares sismo-resistentes.

Chile es uno de los 10 mayores productores de madera. Sin embargo este material no es masivamente usado en estructuras en comparación con hormigón y acero. Esto debido principalmente al concepto que se tiene de la madera como material poco resistente, y al desconocimiento de su desempeño sísmico en estructuras de gran envergadura. Hasta 2017 en Chile se usa madera en la construcción de pequeñas estructuras o en elementos de estructura secundaria en edificaciones de mayor envergadura. Las uniones usadas suelen materializarse mediante clavos o conexiones metálicas apernadas. Estas últimas generan uniones rotuladas o rígidas, generalmente sin capacidad de disipación de energía.

Se presenta en esta investigación la validación experimental de un modelo de conexión de momento semi-rígida con capacidad de disipación de energía para su uso en estructura de madera con el fin de mejorar su desempeño sísmico. El modelo se caracteriza por contar con una componente friccional de disipación de energía y una componente elástica que permite restituir la configuración no deformada de la conexión.

Se realizaron tres tipos de ensayos cíclicos cuasi estáticos, los dos primeros para aislar las componentes de roce y elástica, y la tercera para caracterizar el comportamiento completo de la unión. Se obtuvieron curvas de momento-giro de la conexión con diferentes amplitudes de deformación impuesta, las que permitieron calibrar los parámetros de la ecuación teórica de la conexión. Se logró un buen ajuste de los resultados teóricos con los experimentales, con diferencias de tan solo unas pocas unidades porcentuales por ensayo, validando así el modelo.

PALABRAS CLAVES: Rotula plástica, unión autocentrante, reducción de demanda sísmica

ABSTRACT

Chile is located in the Pacific's fire belt, where more than 90% of the annual average seismic energy is released worldwide. This generates material losses and in some cases human losses. That is why every structure in Chile must be designed to meet resistant earthquake standards.

Chile is one of the 10 largest producers of wood. However this material is not massively used in structures compared to concrete and steel. This is mainly due to the concept of wood as a poor material, and to the lack of knowledge of its seismic performance in large structures. Until 2017 in Chile, wood has been used in the construction of small structures or elements of secondary structure in larger buildings. The joints used are usually materialized by nails or bolted metal connections. The latter generate rigid or bonded joints, generally without dissipation of energy.

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

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

³ Profesor Informante, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, jpadilla@magister.ucsc.cl

We present in this research the experimental validation of a semi-rigid moment connection model with energy dissipation capacity for use in wood structure in order to improve its seismic performance. The model is characterized by a frictional component of energy dissipation and an elastic component that allows to restore the non-deformed configuration of the connection.

Three types of quasi-static cyclic tests were performed, the first two for isolating the friction and elastic components, and the third to characterize the complete behavior of the joint. Moment-rotation curves of the connection with different amplitudes of imposed deformation were obtained, which allowed to calibrate the parameters of the theoretical equation of the connection. A good adjustment of the theoretical and experimental results was obtained, with differences of only a few percentage units per test, thus validating the model.

KEYWORDS: Plastic hinge, self-centering joint, seismic demand reduction

1. INTRODUCCIÓN

Los sismos son vibraciones de la corteza terrestre, generada por distintos fenómenos como actividad volcánica, caída de techos de cavernas subterráneas y hasta explosiones. Sin embargo, los sismos más severos y los más importantes desde el punto de vista de la ingeniería, son los de origen tectónicos (Bazán, E. et al, 2004). Chile forma parte del cinturón de fuego del pacífico, al igual que otros países como Japón y la costa oeste de Estados Unidos. Esta es una de las zonas de mayor actividad sísmica, concentrando más del 90% de la energía sísmica promedio anual a nivel mundial. Nuestro país se ubica específicamente en el encuentro de la placa de nazca y la sudamericana, por lo que se ve afectado constantemente por eventos sísmicos principalmente de subducción (Figura 1). Por lo anterior, Chile cuenta con 3 terremotos dentro de los 10 más grandes de la historia registrada: 1960, Valdivia ($M_w=9.5$); 1868, Arica ($M_w=9.0$) y 2010, Maule ($M_w=8.8$). Estos corresponden al primero, sexto y octavo de mayor magnitud en la historia registrada del planeta.

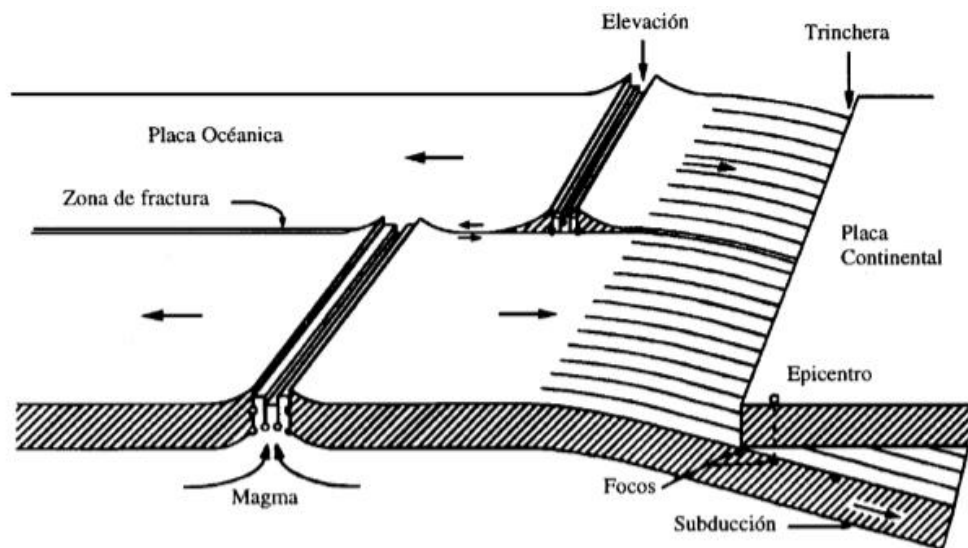


Figura 1: Mecánica de subducción. Fuente: Bazán, E. et al, 2004.

La NCh 433 Of96 entrega las disposiciones generales de diseño sismo-resistente de estructuras, cuyo enfoque es la preservación de la vida durante un evento sísmico. La disipación de energía en un evento sísmico, de acuerdo a la citada norma, se basa principalmente en la ductilidad inherente de los elementos estructurales y el sistema constructivo con el que cuenta el edificio. Sin embargo, el concepto de protección sísmica de estructuras mediante la adición de mecanismos de disipación de energía localizados es incipiente y se limita en la práctica a las últimas décadas en Chile (DE LA LLERA JC, 2004).

Chile se encuentra entre los diez países con mayor producción de madera en el mundo. Sin embargo, es uno de los que menos utiliza a la madera como material estructural predominante (MINVU, 2016). Esto a diferencia de otros países en los que la construcción de viviendas tiene fuerte participación de este material (Figura 2). Países que lideran el uso de la madera como material estructural en viviendas son: Canadá con 95%; Estados Unidos con 90% y Nueva Zelanda con 70% (CORMA, 2016). Sólo un 13.9% de las viviendas en Chile está construida en base a madera (Figura 3); esto debido a que el mercado consumidor desvaloriza las construcciones en este material en desmedro del hormigón y albañilería. En gran medida este escenario se configura debido al limitado conocimiento de las bondades de la madera, falta de especialistas y uniones verificadas para diseños sismo resistente con este material.

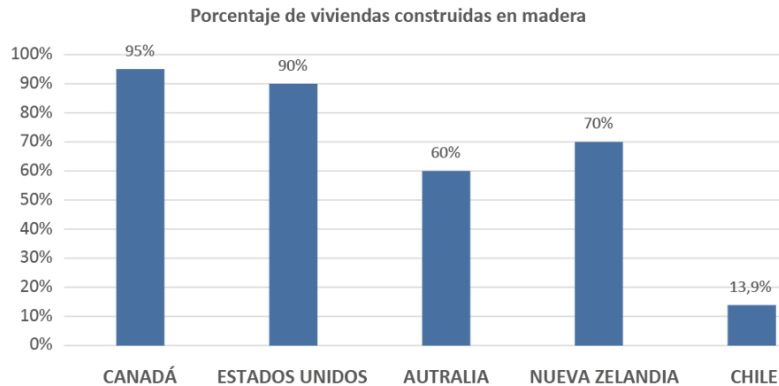


Figura 2: Participación de la madera como material predominante en viviendas.

Fuente: Ministerio de Vivienda y urbanismo, 2016.

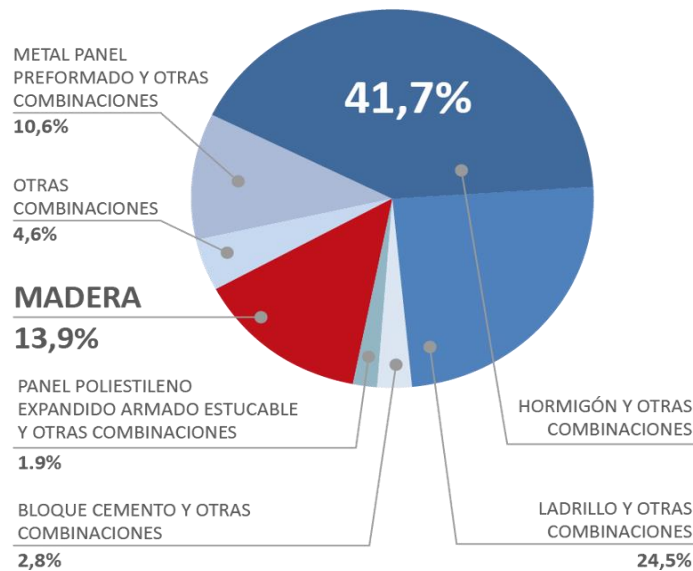


Figura 3: Participación de los principales materiales estructurales como predominantes en estructural en Chile.

Fuente: Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 2016.

El uso de la madera como material estructural el Chile ha estado limitado a edificaciones de pocos pisos de altura (Corma, 2016). Esto último debido a la menor resistencia de este material en comparación al hormigón armado y acero, sumado al hecho de que existe poco conocimiento técnico respecto al comportamiento de las uniones en estructuras de madera sometidas a solicitaciones elevadas (Padilla-Reyes, J. et al, 2017). Dichas uniones trabajan principalmente por trabazón y transferencia de esfuerzos de corte, siendo rotuladas o rígidas (Figura 4). Su forma

de disipar energía viene dada por la deformación permanente de las uniones, desgarramientos y en algunos casos por destrucción de las mismas. La ocurrencia de lo anterior es indeseable en diseños estructurales, lo cual limita la disipación de energía a márgenes bajos.



Figura 4: Unión Viga a Riostra V. Fuente. (*arquitectura, s.f.*)

Las estructuras de madera al ser más livianas que las construidas en hormigón armado absorben una menor sollicitación sísmica, con relación a la ecuación del movimiento en sistemas inelásticos. (Chopra, 2001).

$$M \cdot \ddot{u} + C \cdot \dot{u} + F_s(u) = -M \cdot \ddot{u}_g(t) \quad (1.1)$$

Donde:

$\ddot{u}_g(t)$: Aceleración del terreno.

M : Matriz de masas.

C : Matriz amortiguamiento viscoso.

$F_s(u)$: Fuerza resistente.

u : Desplazamiento.

\dot{u} : Velocidad.

\ddot{u} : Aceleración.

El uso de uniones para estructura de madera, diseñadas específicamente para disipar gran cantidad de energía, permitiría reducir la demanda sísmica. Esto a su vez contribuiría a extender el uso de la madera como material estructural, al reducir las sollicitaciones en los elementos constituyentes, lo cual además redundaría en economía de materiales.

En esta investigación se busca validar experimentalmente un modelo numérico de rótula plástica desarrollado previamente (Orellana, F, et al, 2016). La rótula plástica propuesta corresponde a un mecanismo de unión para estructuras de madera, el cual puede ser utilizado para materializar uniones viga-columna y columna-base. Este dispositivo de unión en teoría puede comportarse como una unión rígida mientras el momento flector transmitido no supere su capacidad máxima. Una vez superada dicha capacidad la unión permite el giro relativo entre sus extremos manteniendo el momento flector constante, disipando energía en el proceso. Esto último permite que las sollicitaciones internas en los elementos de madera no superen su capacidad admisible, protegiéndolos de daño por sismo. La disipación de energía en las uniones conduce a menores sollicitaciones sísmicas en los elementos, con el consiguiente ahorro de materiales. Adicionalmente, resultaría en una reducción de los niveles de deformación y aceleración lateral de los pisos de la estructura. Esto proporcionaría estándares de seguridad ante sismos y confort

más elevados para los ocupantes de las estructuras de madera que utilizan este tipo de uniones (Padilla-Reyes, J. et al, 2017).

Se diseñó un modelo concreto de rótula plástica que busca reproducir los elementos básicos de unión propuesta previamente. La unión consta de dos elementos fundamentales: una componente elástica representada por un resorte pre-esforzado que permite que la unión recupere su configuración no deformada una vez retiradas las cargas y un elemento que provee la disipación por medio de fricción. Esta unión plástica semi-rígida fue analizada experimentalmente para calibrar las ecuaciones teóricas que predicen su comportamiento y validar así el modelo.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Validar experimentalmente las ecuaciones constitutivas que rigen el comportamiento de un modelo de rótula plástica para uniones de madera, mediante el análisis experimental de un modelo concreto de dicho dispositivo de unión, mediante calibración de sus parámetros característicos.

2.2 Objetivos específicos

- 1) Realizar un diseño conceptual de un dispositivo concreto que pueda reproducir el comportamiento teórico esperado del modelo de rótula plástica propuesto.
- 2) Realizar ajustes al modelo analítico de rótula plástica, incorporando parámetros específicos del diseño concreto de rótula plástica adoptado.
- 3) Calibrar los elementos constituyentes del dispositivo de rótula plástica concreta para que reproduzcan parámetros específicos de diseño, esto es: carga de pretensado, rigidez elástica y fuerza de roce.
- 4) Construir el modelo conceptual de rótula plástica, de acuerdo a las especificaciones de diseño de los parámetros que conducen a la obtención de las características deseadas.
- 5) Diseñar y construir un marco de carga que permita realizar ensayos cuasi-estáticos a la rótula plástica.
- 6) Diseñar y ejecutar un protocolo de ensayos experimentales de carga cuasi-estática a una columna con la unión diseñada en su base, determinando con esto la relación Momento versus Giro en la rótula.
- 7) Calibrarlos parámetros de la ecuación teórica con los resultados experimentales y determinar el error entre ambos, verificando la validez del modelo numérico.

3. ANÁLISIS EXPERIMENTAL

Se definió una metodología con una serie de actividades cuyo fin es dar cumplimiento al objetivo general de esta investigación. Cada actividad se relaciona con uno o más de los objetivos específicos antes descritos, como se describe a continuación.

3.1 Modelo concreto de la conexión

Se implementó un modelo concreto de la conexión en la base de una columna tubular de madera de sección rectangular. Para caracterizar la componente elástica de la conexión se dispuso de cables de acero en el interior de la columna, ubicados al costado de las caras más alejadas del eje de giro de la misma. Los cables se dispusieron en serie con resortes para incrementar la flexibilidad, permitiendo imponer una carga de pos-tensado con un alargamiento inicial de mucha menor magnitud que el alargamiento impuesto por la rotación en la conexión. 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 sendas 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 proporcionada 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. Los elementos que conforman la conexión se describen esquemáticamente y en fotografía en Figuras 5 y 6

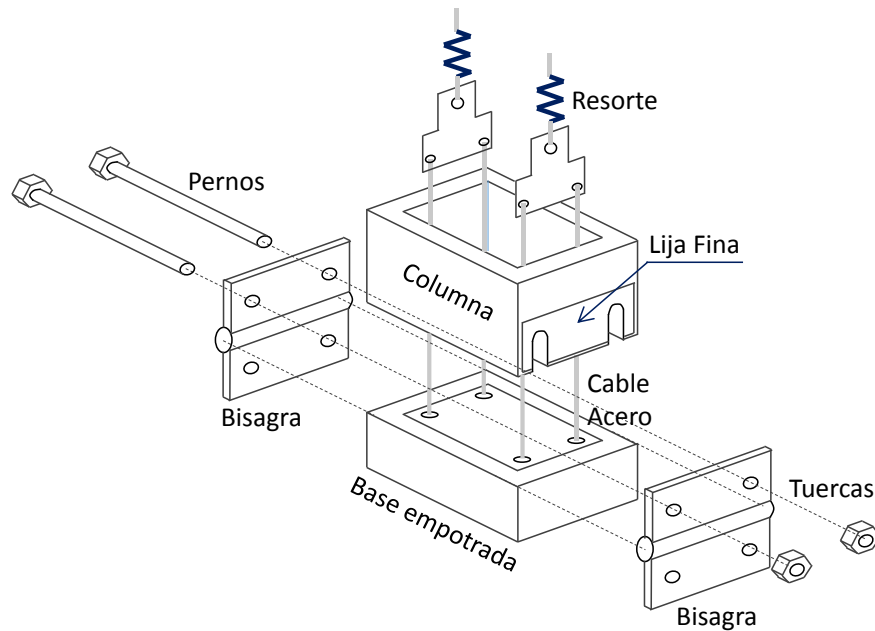


Figura 5: Diseño conceptual de la rótula plástica



Figura 6: Materialización de la rótula plástica.

3.2 Mientras el momento interno en la conexión no supera al momento proporcionado por la carga de pos-tensado inicial de los elementos elásticos y el roce estático, en teoría la conexión permanecerá cerrada. Cuando el momento anterior es excedido, el roce es vencido y la rotación tiene lugar. La columna puede rotar en la base 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. Marco de carga

Se diseñó una extensión a la mesa vibradora disponible en el laboratorio de estructuras de la UCSC que permite la instalación de la columna ensayada cuya longitud es de 2.25m. Este mecanismo consiste en dos bases soportadas por 6 rieles vinculados fijamente al suelo y sujetos a las bases por rodamientos lineales. Ambas bases tipo patín fueron unidas entre sí por un par de vigas de madera de 2"x8" para obtener un sistema deslizante capaz de resistir momento y así poder empotrar a la columna (Figura 7). La plataforma completa es de más de 3 metros de longitud en dirección del movimiento, esto para poder ser utilizada en un posterior ensayo dinámico de un marco de madera con este tipo de uniones (Figura 8).

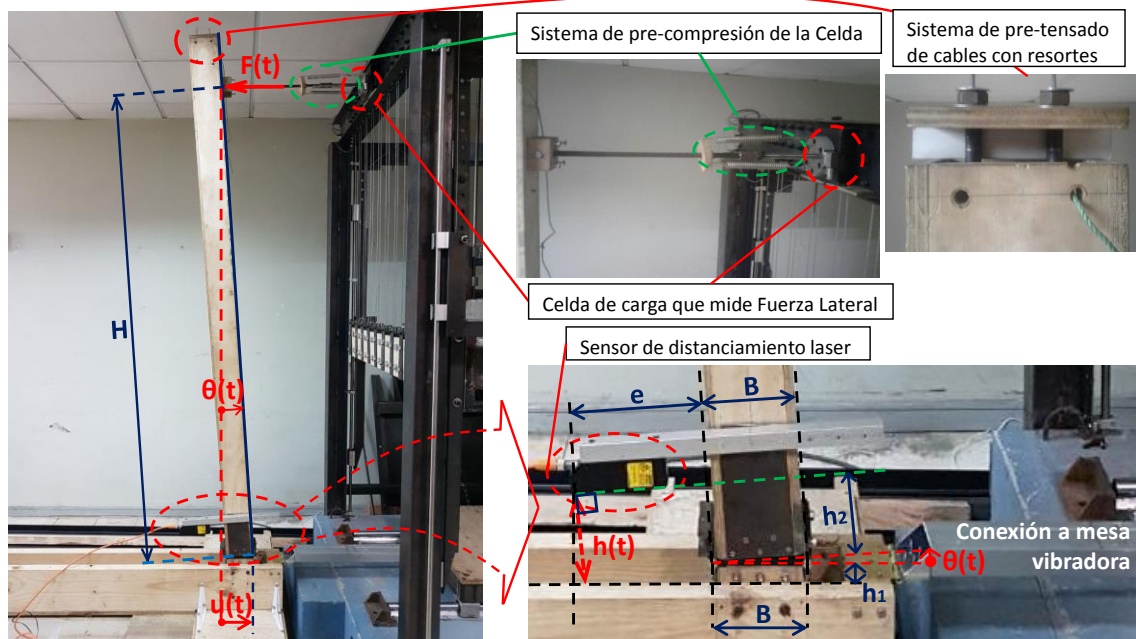


Figura 7: Columna ensayada con rótula plástica en la base y definición de parámetros geométricos

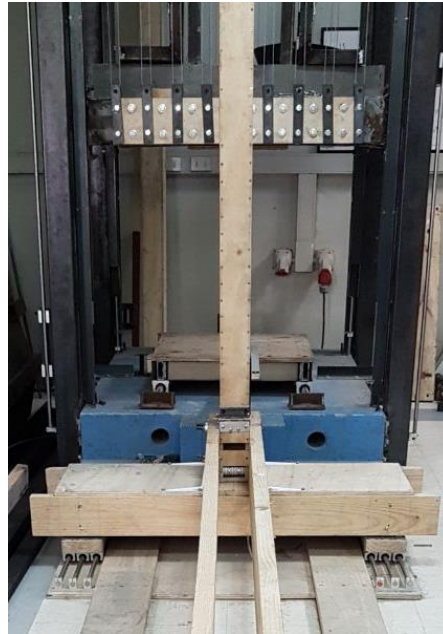


Figura 8: Base del marco de carga sobre rieles con rodamientos lineales. Se une a base idéntica para estabilidad.

La mesa vibradora (Figura 8, segundo plano) se ensambló al marco de carga a través de una barra rotulada en sus extremos para solo transmitir desplazamiento horizontal (Figura 7, abajo a la derecha). El input usado en los ensayos fue una serie de ciclos de movimiento horizontal periódico de amplitud creciente y baja frecuencia.

En la parte superior de la columna se conectó una celda de carga por medio de un perno de acero largo para medir la fuerza lateral con la que reacciona el sistema estructural (Figura 7). El punto de conexión a la celda de carga corresponde a un apoyo que restringe el desplazamiento lateral de la columna. Esta carga es igual pero de sentido contrario al corte basal y permite determinar el momento aplicado en la base de la columna dada la altura entre la base el punto de sujeción a la celda de carga. Esta última se montó sobre un marco rígido de acero que pertenece a la estructura de la mesa vibradora. Esta celda fue pre comprimida con una fuerza de 35 kgf para asegurar que todas las mediciones fuesen superiores a 12 kgf en compresión (Figura 7, arriba, al centro). Esto debido a que en el proceso de calibración del instrumento se determinó que las mediciones son poco confiables cuando las cargas son bajas, estableciéndose en 12 kgf el límite de confiabilidad del instrumento.

Para medir el giro en la rótula basal en cada instante, se incorporó una barra lateral empotrada a la columna. En su extremo se instaló un sensor de posicionamiento laser con el que se midió la distancia entre éste y un plano horizontal de referencia, con lo que se obtuvo en forma indirecta el giro (Figura 7, abajo a la derecha).

La pre-tensión de los cables con resortes dispuestos en el interior de la columna se aplicó mediante un sistema de pernos que fueron tensados por medio del apriete de tuercas, los cuales se instalaron en la cúspide de la columna (Figura 7). La tensión en los elementos elásticos antes mencionados no fue medida directamente, solo se midió indirectamente por medio del estiramiento inicial del sistema cable-resorte, el cual varió entre 20 y 30mm. Sin embargo, dicha medición no fue necesaria debido a que lo requerido era el momento elástico, el cual se midió por medio de la fuerza registrada en la celda de carga ubicada en la cúspide de la columna.

La fuerza normal entre las superficies donde se desarrolla el roce en la conexión se relaciona con el apriete proporcionado por un par de pernos que une las bisagras sujetas a la base con la columna. Dichos pernos son apretados con una llave en cuyo extremo se midió la fuerza de apriete perpendicularmente a la llave. Esto permitió determinar el torque de apriete de los pernos, el cual se asume proporcional a la tensión de los mismos (Figura 9).



Figura 9: Forma de entregar carga normal a la componente de roce.

3.3 Parámetros de diseño y modelo analítico de la rótula

El objetivo de la unión plástica propuesta es 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 rótula para que comience a abrirse para un determinado momento en la unión, luego de lo cual las solicitaciones transmitidas a los elementos sufren incrementos marginales en comparación.

Debido a lo anterior, antes de definir los parámetros de diseño de la rótula, primero es necesario conocer la resistencia a flexión de la columna unida mediante la unión propuesta a la base. Esto requiere del conocimiento de la sección transversal del elemento estructural unido y de la tensión admisible de la madera que la conforma. La madera de terciado fue ensayada y tiene una tensión máxima admisible, $\sigma_{adm} = 29.51 \frac{kg}{cm^2}$, con la cual es posible definir el momento admisible del elemento estructural como se indica en Ec. (1).

$$\sigma_{adm} \leq \frac{P_t}{A} + \frac{M_{adm} \cdot y_{m\acute{a}x}}{I} \quad (1)$$

Donde.

σ_{adm} : Tensión admisible de la madera.

P_t : Cargar axial debido a la pre-tensión de los cables.

A : Área de la sección transversal de la columna.

M_{adm} : Momento flector admisible de la columna.

$y_{m\acute{a}x}$: Distancia del borde más alejado de la columna a su eje neutro.

I : Inercia flexural principal de la columna.

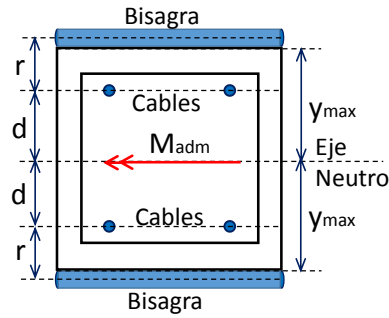


Figura 10: Sección transversal columna Ya que la tensión elástica es entregada por n=2 pares de cables, ubicados en las caras interiores opuestas de la columna, la expresión para determinar la carga axial es

$$P_t = 2 \cdot n \cdot T_0 \quad (2)$$

Donde.

n : Número de cables que cruzan la columna por cada lado.

T_0 : Tensión en cada cable.

La sección transversal de la columna es de 100 mm en la dirección de su eje de giro y 124 mm en la dirección opuesta, correspondiente a la dirección del desplazamiento impuesto. Con lo anterior, el área e inercia de la columna son $A=48\text{cm}^2$ e $I=955.5\text{cm}^4$, respectivamente.

El momento de apertura o de plastificación de la unión plástica debe ser menor que el momento admisible de la columna determinado anteriormente, considerando la carga de compresión impuesta por los cables pre-tensados. Esto impone una restricción al momento plástico de la unión, el cual corresponde a la suma del momento elástico o restitutivo proporcionado inicialmente por los cables, más el momento de roce proporcionado por la trabazón por fricción entre las bisagras y la columna (Figura 12, Ecs. (3) y (4)).

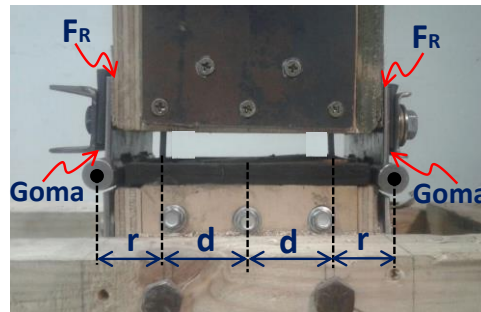


Figura 11: Configuración tensión elástica y de roce.

$$M_E = n \cdot T_0 \cdot (2 \cdot d + r) + n \cdot T_0 \cdot r \quad (3)$$

$$M_R = F_R \cdot (2 \cdot d + 2 \cdot r) \quad (4)$$

Donde:

d : Distancia del cable al eje central de la columna.

r : Distancia del eje de giro al cable más cercano.

M_E : Momento elástico.

M_R : Momento de roce.

Para que la unión pueda cerrarse por sí sola una vez retiradas las cargas, se debe cumplir la condición de que el momento de roce, M_R , sea menor o igual que el momento elástico, M_E . Esto implica que el momento plástico debe ser menor que el doble del momento elástico.

$$M_p = M_E + M_R \leq 2M_E \quad (5)$$

Además, para asegurar la integridad de la columna unida, el momento plástico no puede superar el momento admisible de la madera. En el diseño de la conexión se debe considerar un factor de seguridad a la falla por flexión, $F.S.$, que relaciona el momento de plastificación inicial de la unión, con el momento admisible del elemento de madera unido.

$$M_{adm} = \frac{1}{F.S.} \cdot \left(M_p - \frac{2 \cdot n \cdot T_0 \cdot l}{A \cdot y_{máx}} \right) \quad (6)$$

Si de la asignación de parámetros de diseño resultase $F.S. \leq 1$, estos deben ser ajustados para cumplir con la restricción $F.S. > 1$. Al confirmarse la inequación del factor de seguridad se prosigue a ajustar el modelo numérico.

Tabla 1: Parámetros geométricos.

Elemento	parámetros geométricos					
	altura (cm)	largo (cm)	ancho (cm)	espesor (cm)	altura pestaña (cm)	ancho pestaña (cm)
rotula plástica	22	12,4	10	1,2	4	2
columna	222	12,4	10	1,2	0	0

Tabla 2: Parámetros de diseño de la conexión.

Elemento	parámetros de diseño			F.S.
	Momento adm Kg*cm	Momento de roce Kg*cm	Momento elástico Kg*cm	
rotula plástica	< Madm columna	560	800	3,046
columna	4142,54	0	0	

El comportamiento de la rótula plástica se caracteriza por medio de la determinación de su respuesta elástica más su respuesta friccional. La primera en teoría es función únicamente del giro relativo en la conexión, en tanto que la segunda componente depende tanto del giro como del sentido del mismo, el cual queda definido por la velocidad de giro. Teniendo en cuenta que el momento de roce se opone al sentido de giro, su signo es igual al correspondiente al producto entre giro y velocidad de giro. De esta manera, el momento de roce se suma al momento elástico en carga y se resta en descarga, sea que esto ocurra con giro positivo o giro negativo (Ec. 7) y Figura 12).

$$M(\theta, \dot{\theta}) = M_E(\theta, \dot{\theta}) + M_R(\theta, \dot{\theta}) = M_E^0 \cdot \text{sign}(\theta) + M_E(\theta) + M_R(\theta) \cdot \text{sign}(\theta \cdot \dot{\theta}) \quad (7)$$

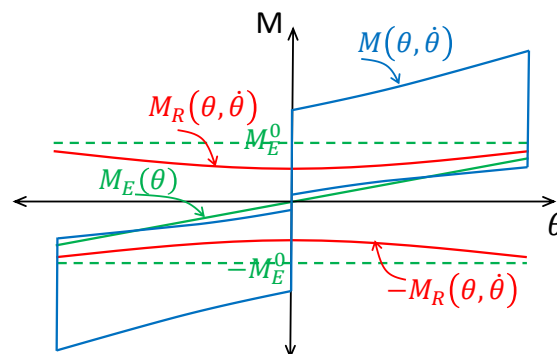


Figura 12: Componentes teóricas de la ecuación teórica de la rótula plástica

3.4 Protocolo de ensayos experimentales

Dos son las componentes básicas que describen teóricamente el comportamiento mecánico de la rótula plástica propuesta: momento elástico y momento de roce. Para determinarlos y así ajustar posteriormente el modelo teórico, es necesario realizar dos ensayos (Fase 1 y Fase 2) que aislen cada uno de los parámetros antes mencionados. Luego de esto, es posible realizar un tercer ensayo (Fase 3) en el cual tanto el momento elástico como el momento de roce estén presentes, describiendo así el comportamiento mecánico integral de la unión. Este último ensayo, contrastado con la respuesta teórica de la rótula plástica, permite definir el error relativo entre ambas, validando o sugiriendo ajustes al modelo matemático.

3.4.1 Fase 1

Este ensayo consiste en imponer un movimiento periódico al marco de carga que sostiene la columna, estando ésta vinculada a la base únicamente por los cables pre-tensados, sin presencia de roce entre las bisagras y la columna. Esto permite aislar el momento elástico, el cual pasa a ser igual al momento total actuando en la base. Este último corresponde al producto entre la fuerza medida en la celda de carga que restringe el movimiento en la cúspide de la columna, $F(t)$, multiplicado por la altura de la misma. Se midió la tensión resultante del conjunto de cables en el tiempo real, $T(t)$, con la cual es posible determinar el momento elástico como.

$$M_E = 2 \cdot T(t) \cdot (r + d) \quad (8)$$

Éste último es igual al momento total actuando en la base, el cual se determina como:

$$M_T = F(t) \cdot (H_c \cdot \cos \theta(t) + b \cdot \sin \theta(t)) - W \cdot S(t) \quad (9)$$

Donde:

W : Peso propio de la columna.

$S(t)$: Función que define la distancia del centro de masa de la columna a al eje de giro.

b : Distancia entre ejes de rotación en la base ubicado en las bisagras.

El valor $W \cdot S(t)$ interpreta la no linealidad geométrica presente durante el giro de la columna (Figura 13).

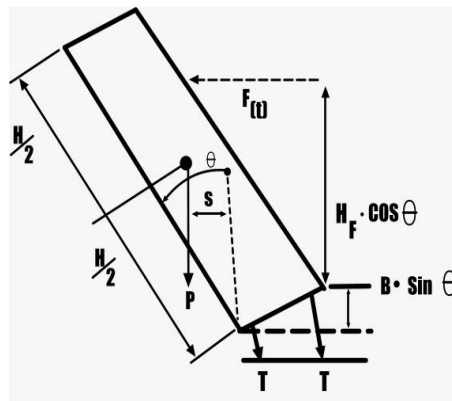


Figura 13: No linealidad geométrica.

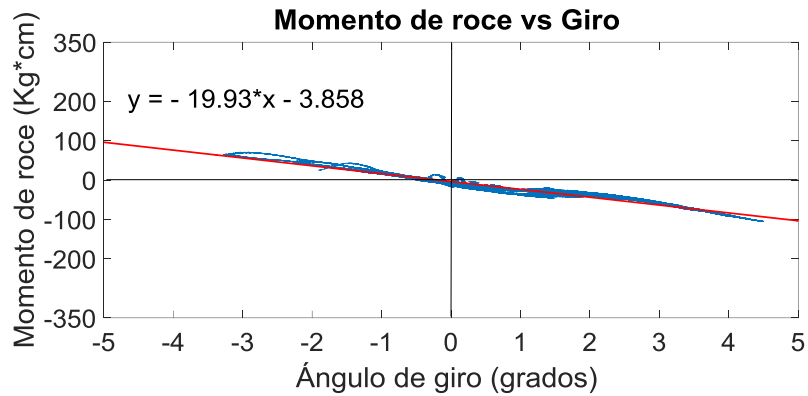


Figura 14: Momento interno en la base debido a peso propio.

Se observa que el momento generado por el peso propio de la columna no es una constante por lo que se ensayó para poder tener una aproximación a esta con el fin de restar su efecto y poder determinar el momento con que reacciona la conexión.

$$M_{pp} = W \cdot S = -19.93 \cdot \theta - 3.858 \text{ (kgf} \cdot \text{cm)} \quad (10)$$

La pendiente de la curva momento total versus giro en la base, K_θ , se relaciona con la variación en la tensión resultante de los cables pre-esforzados por medio de la relación

$$K_\theta = 2 \cdot \frac{\Delta T}{\Delta \theta} \cdot (r + d) = \frac{\Delta M}{\Delta \theta} \quad (11)$$

$$\Delta M = \Delta F_{(t)} \cdot H_c \quad (12)$$

Donde H es la altura de la celda de carga en la columna medida respecto de la base.

Para obtener los valores de $\Delta F_{(t)}$ y $\Delta \theta$ se utilizaron una celda de carga y un sensor de posicionamiento laser respectivamente. Con la celda se midió la fuerza impuesta en el extremo superior de columna, $F_{(t)}$, que es igual al corte basal $Q_{O(t)}$ pero con sentido opuesto. El sensor laser, ubicado en la zona de unión entre la rótula y la columna permitió registrar la altura entre éste y un plano de referencia, $h(t)$, permitiendo calcular indirectamente el giro en la misma durante el ensayo, de la siguiente forma.

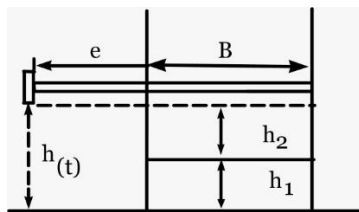


Figura 15: Parámetros para medir el ángulo.

De acuerdo a Figura 15, el giro en la conexión, definido positivo en sentido anti horario, se determina de acuerdo a la siguiente expresión.

$$\sin \theta_{(t)} = \frac{h_1 + (h_2 - h_{(t)}) \cdot \cos \theta_{(t)}}{e + \frac{1}{2} [1 + \text{sign}(\Delta h_{(t)})] \cdot B} \quad (13)$$

Donde:

B : Ancho de la base medido entre ejes de las bisagras.

$h_{(t)}$: Altura medida en el tiempo por sensor durante el giro.

h_1 : Altura de base respecto de plano de referencia de medición del sensor laser.

h_2 : Altura del punto de unión entre la base y la línea horizontal que pasa por el sensor laser.

e : Distancia entre sensor y la rótula de la bisagra más cercana.

$\theta(t)$: Giro en el tiempo

$\Delta h(t)$: Variación de altura.

Los resultados de esta fase del ensayo, considerando únicamente la componente elástica de la unión, conducen a las gráficas de Figura (16).

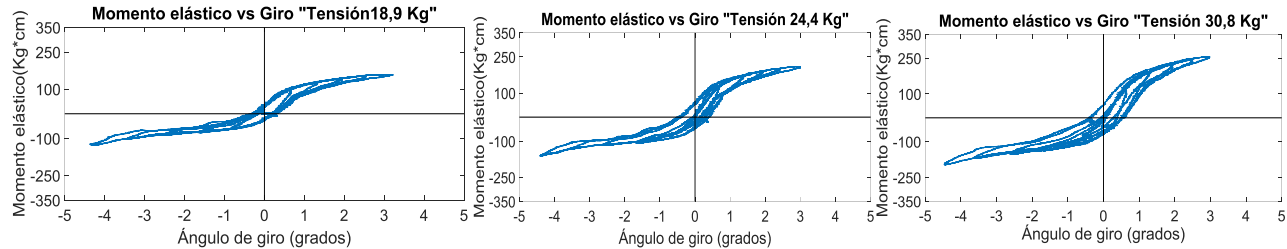


Figura 16: Gráfico momento elástico vs giro, experimental.

3.4.2 Fase 2

Al igual que el ensayo anterior, se impone con la mesa vibradora un movimiento periódico al marco de carga que sostiene la columna. Esta vez los cables están completamente sueltos y los pernos apretados para proporcionar la carga normal entre el elemento abrasivo y la columna, generando el momento de roce. El torque de apriete de los pernos se correlacionó con la presión de estos contra las bisagras. Este torque se aplicó de forma controlada al apretar las tuercas con llave unida a una pesa de mano. En este ensayo, la celda de carga midió la fuerza que permite obtener el momento total, el cual en este caso es igual al momento de roce, el cual se determina como

$$M_R = 2 \cdot F_R \cdot (r + d) = \bar{F}(t) \cdot H_c - W \cdot S \quad (14)$$

Donde:

$\bar{F}(t)$: Fuerza promedio medida en la celda de carga

H_c : Altura a la celda de carga de la columna

Así de la ecuación 14 se despeja la fuerza de roce para el modelo, obteniéndose:

$$F_R = \frac{\bar{F}(t) \cdot H_c - P \cdot S}{2 \cdot (r + d)} \quad (15)$$

Mientras que el giro se mantiene calculado indirectamente con el sensor de altura ubicado en la base, como se detalló en la Ecuación (13).

Los resultados de esta fase del ensayo, considerando únicamente la componente de roce de la unión, conducen a las gráficas de Figura (17).

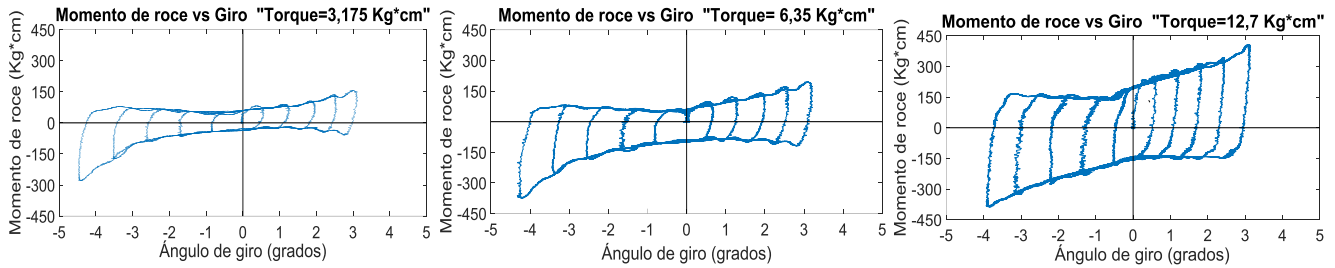


Figura 17: Gráfico momento de roce vs giro, experimental.

3.4.3 Fase 3

Esta etapa final consiste en ensayar la columna, con el mismo desplazamiento periódico de los ensayos anteriores. En este caso tanto el momento elástico como el momento de roce se encuentran presentes, describiendo el trabajo conjunto de ambas componentes de manera de obtener un análisis mecánico integral de la unión. El momento total actuando en la base se calcula al igual que en los otros casos con la fuerza obtenida de la celda de carga conectada a la cúspide de la columna multiplicado por la altura de la misma.

$$M_{\theta} = \bar{F}_{(t)} \cdot H \quad (16)$$

Mientras que el giro se mantiene calculado indirectamente con el sensor de altura ubicado en la base, como se detalló en la Ecuación (13).

Los resultados de esta fase del ensayo, considerando la componente elástica y de roce de la unión, conducen a la gráfica de Figura (18).

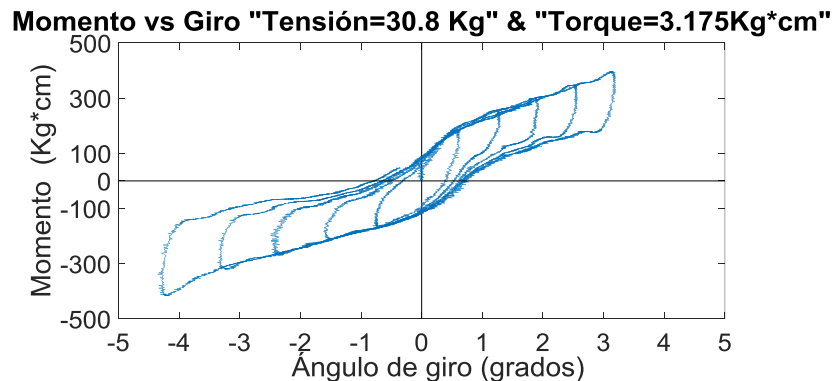


Figura 18: Gráfico Momento vs giro, experimental.

3.5 Ajuste del modelo numérico

Ya obtenidos los parámetros geométricos de la rótula, la tensión de los cables y fuerza de roce, se realiza una superposición de curvas teóricas y experimentales, con la finalidad de observar cómo se ajustan estas entre sí y posteriormente poder cuantificar el error existente entre lo teórico y lo experimental.

3.5.1 Modelo ajustado de momento elástico y giro M_E vs θ

La siguiente figura 19 muestra los parámetros obtenidos a partir de los ensayos realizados y la curva teórica a partir de las ecuaciones (17) y (13) de M_E y θ respectivamente.

$$M_E = 2 \cdot T \cdot (r + d) + K_\theta \cdot \theta_{(t)} \quad (17)$$

Mientras que el giro se mantiene calculado indirectamente con el sensor de altura ubicado en la base, como se detalló en la Ecuación (13).

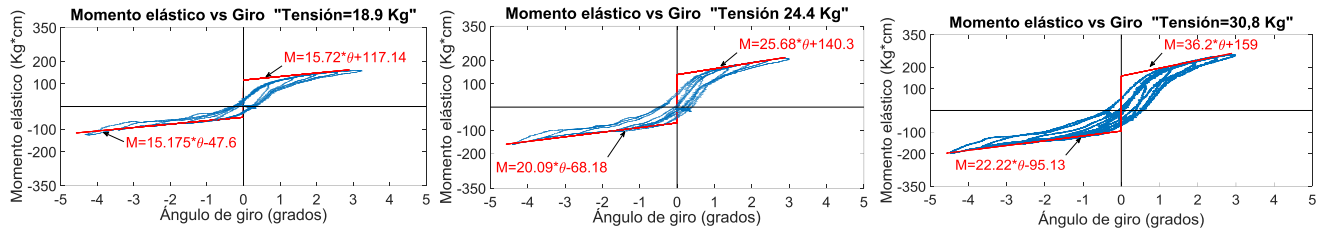


Figura 19: Superposición gráfica teórica y experimental, Momento elástico vs giro.

3.5.2 Modelo ajustado del momento de roce y giro M_R vs θ

La siguiente figura 20 muestra los parámetros obtenidos a partir de los ensayos realizados y la curva teórica a partir de las ecuaciones (18) y (13) de M_R y θ respectivamente.

$$M_R = F_R \cdot 2 \cdot y \quad (18)$$

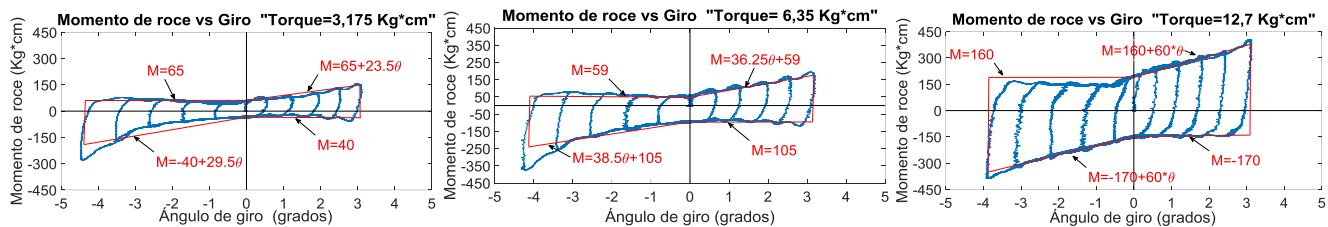


Figura 20: Superposición gráfica teórica y experimental, Momento de roce vs giro.

3.5.3 Modelo ajustado del momento total y giro M_θ vs θ

La siguiente figura 21 muestra los parámetros obtenidos a partir de los ensayos realizados y la curva teórica a partir de las ecuaciones (19) y (13) de M_θ y θ respectivamente.

$$M_{(\theta)} = M_E + K_\theta \cdot \theta_{(t)} + M_R \cdot \text{sign}(\dot{\theta}_{(t)}) \quad (19)$$

Donde:

$\dot{\theta}_{(t)}$: Velocidad del giro

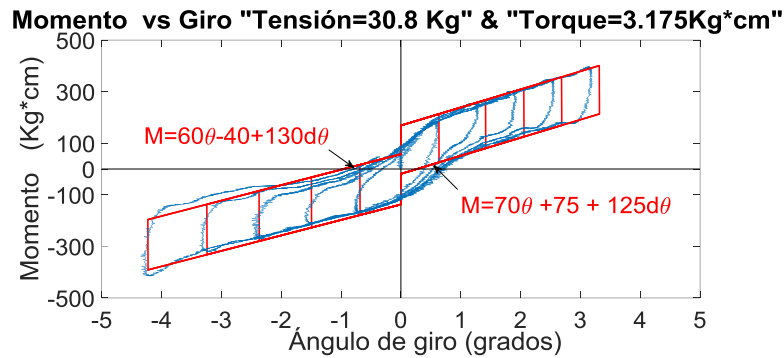


Figura 21: Superposición gráfica teórica y experimental, Momento vs giro.

La gráfica teórica se desarrolló con las ecuaciones que rigen los comportamientos de Momento de roce y Momento elástico.

3.6 Cálculo de error

Se estimó el error del modelo asumiendo este como parámetro de evaluación, expresando en la siguiente fórmula.

$$ERROR = \frac{\int_0^{ciclo} |M_{teorico} - M_{experimental}| \cdot dt}{\int_0^{ciclo} |M_{teorico}| \cdot dt} \quad (20)$$

El error obtenido de la superposición de la gráfica teórica con la experimental del Momento vs giro fue de un 1.68 %, lo que permite validar el modelo de esta prueba de conceptos.

4. DISCUSION Y CONCLUSIONES

Se diseñó y materializó un modelo del dispositivo conceptual que contaba con las componentes básicas del modelo numérico, tensión elástica y fuerza de roce. En relación a este modelo en concreto se ajustó el modelo analítico de la rótula en relación a la distribución de las fuerzas actuantes.

Para los ensayos realizados se necesitó diseñar y construir una extensión de la mesas vibradora presente en la UCSC que consiste en dos bases soportadas por 6 rieles vinculados fijamente al suelo y sujetos a las bases por rodamientos lineales. También se conectó una celda de carga por medio de un perno de acero largo para medir la fuerza lateral a la que es sometida y por último se instaló una barra lateral empotrada a la columna. En su extremo se instaló un sensor de posicionamiento laser con el que se midió la distancia entre éste y un plano horizontal de referencia, y así calcular el giro de forma indirecta.

El protocolo anteriormente señalado consta de 2 fases de aislamiento en la cual se medía cada componente de forma individual y finalizando con un ensayo en el que existía momento elástico y momento de roce de los cuales se observó.

Para el momento de roce, se observan que en un sentido del desplazamiento hay un mayor giro que para los desplazamientos en el otro sentido, esto se debe a la no simetría en la fuerza normal entregada a esta componente por la presencia de elementos de goma en sus costados. Lo que para desplazamientos pequeños se ve afectado por el amortiguamiento de ésta, pero en el caso de grandes desplazamientos es despreciable. También se puede observar cierta pendiente en la gráfica de esta componente y se puede deber a la presencia de los cables que a pesar de no encontrarse pretensados en su interior sí podrían presentar cierta tensión al momento de ocurrir el giro, a diferencia de lo que se observa que en fase de descarga la curva es prácticamente una constante

La grafica del momento elástico presenta concordancia con el análisis numérico, pero aun así presenta una curva no representativa a la teoría. Esto se debe a factores constructivos que estén disipando energía. Roce entre pernos y columna; la no correcta pretensión previa a los ensayos y por último el elemento de goma en la base de la columna que sufre aplastamiento.

En la gráfica no se observa la componente auto entrante debido a que en la mayor parte de los casos el momento de roce superaba la componente elástica y en algunos casos llegando a separar la columna de su base, entregando datos erróneos de desplazamiento vertical.

El error observado permite validar el modelo numérico ya que es cercano a un 2% el error admisible. Esto también debido a las razones anteriormente ya mencionadas.

Se recomienda para posteriores experiencias, aislar cada componente al 100%; que la tensión elástica en su medida no sea influenciada por otros factores; ensayar en mesa vibradora sin ningún tipo de elemento deformable que pueda cambiar el ciclo entregado y ajustar el modelo numérico en relación a los datos observados en este trabajo.

5. Bibliografía

- arquitectura, p. (s.f.). *www.plataformaarquitectura.cl*. Obtenido de <http://www.plataformaarquitectura.cl/cl/797621/15-herrajes-metalicos-para-conectar-estructuras-de-madera-laminada-arauco/58111063e58ece3701000001-15-herrajes-metalicos-para-conectar-estructuras-de-madera-laminada-arauco-union-viga-a-riost-ra-v>
- Bazán, E., Meli, R. (Ed.II) (2004). *Diseño sísmico de edificios*. México D.F.:LIMUSA.
- Chopra, A. K. (2001). *Dynamics of structures: theory and applications to earthquake engineering*. New York City, United States of America: Prentice-Hall.
- CORMA, M. (26 de Agosto de 2016). *www.madera21.cl*. Obtenido de <http://www.madera21.cl/?p=475>
- MINVU. (2016). *www.madera21.cl*. Obtenido de http://www.madera21.cl/?page_id=2757#1480538092690-c18529eb-5e3c
- Orellana, F. (2016). *ANÁLISIS PARAMÉTRICO DE PUSH-OVER DE MARCOS DE MADERA CON RÓTULAS PLÁSTICAS AUTOCENTRANTES*. Tesis para optar al título de ingeniero civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, Concepción, Chile.
- Padilla-Reyes, J., Maureira, N., Orellana, F. (2017). *A NEW SELF-CENTERING DISSIPATIVE CONECTION FOR GLUED LAMINATED TIMBER STRUCTURES*. 16th World Conference on Earthquake Engineering. 09-13 de Enero, Santiago, Chile.

6. Bibliografía

- arquitectura, p. (s.f.). *www.plataformaarquitectura.cl*. Obtenido de <http://www.plataformaarquitectura.cl/cl/797621/15-herrajes-metalicos-para-conectar-estructuras-de-madera-laminada-arauco/58111063e58ece3701000001-15-herrajes-metalicos-para-conectar-estructuras-de-madera-laminada-arauco-union-viga-a-riost-ra-v>
- Bazán, E. &. (2004). (ed. II). *Diseño sísmico de edificios*. LIMUSA.
- Chopra, A. K. (2001). *Dynamics of structures: theory and applications to earthquake engineering*. New York City, United State of America. Prentice-Hall.
- CORMA, M. (26 de Agosto de 2016). *www.madera21.cl*. Obtenido de <http://www.madera21.cl/?p=475>
- DE LA LLERA JC, L. C. (2004). Analysis, testing and implementation of seismic. *EarthqEngStructDyn*.

- MINVU. (2016). www.madera21.cl. Obtenido de http://www.madera21.cl/?page_id=2757#1480538092690-c18529eb-5e3c
- Orellana, F. (2016). *ANÁLISIS PARAMÉTRICO DE PUSH-OVER DE MARCOS DE MADERA CON RÓTULAS PLÁSTICAS AUTOCENTRANTES*. Tesis para optar al título de ingeniero civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción.
- Padilla, J. M. (2017). A NEW SELF-CENTERING DISSIPATIVE CONNECTION FOR GLUED LAMINATED TIMBER STRUCTURES. *16th world conference on earthquake engineering*. Santiago.