

# MODELAMIENTO DE UN ENSAYO MOMENTO-ROTACIÓN DE UNA DE CONEXIÓN PARA ESTANTERÍA INDUSTRIAL, BASADO EN UN MODELO NO LINEAL FÍSICO

*D. Salamanca Albornoz<sup>1</sup>, N. Maureira Carsalade<sup>2</sup>, M. Sanhueza Cartes<sup>3</sup>*

## RESUMEN

En esta investigación se formuló un modelo analítico capaz de reproducir la relación Momento-Rotación para la propuesta de una novedosa conexión viga-columna para racks de almacenamiento industrial. Se elaboró un modelo conceptual y de análisis de la conexión basado en el equilibrio e interacción de sus principales componentes, representados por sus parámetros de diseño. Se realizó un análisis no-lineal de la formulación analítica en torno a los parámetros de diseño más relevantes. Esto permitió seleccionar un set de parámetros adecuados que permitieron posteriormente reproducir numéricamente el comportamiento de un ensayo experimental típicamente utilizado para la caracterización de conexiones viga-columna. Para lo anterior, se implementó una rutina en el software Matlab para determinar y graficar la curva de histéresis del sistema y el aporte de deformación en cada instante de viga-conexión y columna. La simulación se realizó con control de desplazamiento, siendo este de tipo serrucho con amplitudes crecientes, adaptado del AISC-341 Sección K. Se observó consistencia entre los resultados obtenidos a partir del modelo numérico y los resultados esperados. Esto permitió evidenciar que el modelo analítico es capaz de capturar el comportamiento de la conexión, además de su interacción con los elementos conectados. El modelo analítico permitiría determinar los parámetros de ejecución de futuros ensayos experimentales, con los que se podría validar la fidelidad de su formulación.

**Palabras clave:** Parámetros de diseño, interacción viga-conexión-columna, curva de histéresis.

## ABSTRACT

In this research, an analytical model was developed capable of reproducing the Moment-Rotation relationship for a novel beam-column connection proposed for industrial storage racks. A conceptual and analytical model of the connection was created based on the equilibrium and interaction of its main components, represented by their design parameters. A nonlinear analysis of the analytical formulation was conducted focusing on the most relevant design parameters. This allowed for the selection of an appropriate set of parameters that subsequently enabled the numerical reproduction of the behavior observed in a typical experimental test used for characterizing beam-column connections. To achieve this, a routine was implemented in Matlab to determine and graph the hysteresis curve of the system and the contribution of deformation at each instant of the beam-connection and column. The simulation was performed with displacement control, using a sawtooth pattern with increasing amplitudes, adapted from AISC-341 Section K. Consistency was observed between the results obtained from the numerical model and the expected results. This demonstrated that the analytical model is capable of capturing the behavior of the connection, as well as its interaction with the connected elements. The analytical model could also determine the execution parameters for future experimental tests, which could validate the accuracy of its formulation.

**Keywords:** Design parameters, beam-connection-column interaction, hysteretic curve.

---

<sup>1</sup> Estudiante, Carrera de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, [dsalamancaa@ing.ucsc.cl](mailto:dsalamancaa@ing.ucsc.cl)

<sup>2</sup> Profesor Guía, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, [nmaureira@ucsc.cl](mailto:nmaureira@ucsc.cl)

<sup>3</sup> Profesor Informante, Facultad de Ingeniería, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, [sanhueza@doctorado.ucsc.cl](mailto:sanhueza@doctorado.ucsc.cl)

## 1. INTRODUCCIÓN

La actividad sísmica en Chile representa un peligro constante debido a su ubicación geográfica en el borde sureste del cinturón de fuego del Pacífico, una zona donde se libera más del 90% de la energía sísmica mundial cada año [1]. A lo largo de su historia, el país ha experimentado numerosos terremotos de gran magnitud, siendo el de Valdivia en 1960 el más fuerte registrado a nivel mundial. Por esta razón, un diseño estructural óptimo es fundamental para garantizar un desempeño seguro de las estructuras frente a las demandas sísmicas.

En los últimos años, el almacenamiento de mercancías se ha incrementado debido a los efectos de la globalización y las nuevas tendencias del mercado. En este sentido, diferentes proveedores han introducido en el mercado chileno sistemas de almacenamiento que son muy utilizados en Europa y Estados Unidos. Sin embargo, la amenaza sísmica en Chile tiene características de mayor recurrencia y magnitud que en muchos de los países donde se implementaron los nuevos sistemas de almacenamiento. Por otra parte, la evidencia sobre el comportamiento sísmico de los racks en los sismos de subducción chilenos es limitada [2]. Debido a la alta competitividad de la industria logística, los racks están diseñados lo más liviano posible para ahorrar en costos de material de acero. A pesar de la ligereza de sus sistemas estructurales, los racks soportan cargas muy superiores a su peso propio, lo que la diferencia de las estructuras civiles más comunes. Se componen principalmente de montantes (miembros verticales), hechos de elementos de pared delgada perforada y vigas de plataforma (miembros horizontales), hechas de secciones cerradas que unen marcos adyacentes y que se encuentran en la dirección horizontal paralela al pasillo de operación. Los elementos diagonales (arriostramientos) conectan los montantes entre sí en la dirección transversal al pasillo. Las conexiones entre los montantes y la viga (uniones viga-columna) en la dirección del pasillo (longitudinal), por lo general, están hechos de conectores de enganche que van soldados a los extremos de la viga y encajados (o apernados) en orificios perforados en los montantes [3].

El avance tecnológico ha permitido mejorar significativamente el diseño y la fabricación de racks de almacenamiento. Nuevos materiales, como el acero de alta resistencia y los recubrimientos especiales, incrementan la durabilidad y resistencia sísmica de estas estructuras. Asimismo, el uso de simulaciones computacionales avanzadas y pruebas de laboratorio permiten un diseño más preciso y seguro, optimizando el comportamiento de los racks bajo cargas sísmicas extremas. El uso de racks de acero se ha generalizado durante décadas, lo que ha atraído una notable atención de investigación en los últimos años. Las investigaciones buscan definir el comportamiento de estas estructuras bajo diferentes cargas, con el fin de hacer que sus diseños sean más seguros y confiables.

Los racks son fabricados por empresas especializadas, y sus variaciones de diseño dependen de las herramientas de cada fabricante y de sus patentes internas [4]. El diseño de racks plantea desafíos significativos debido a sus peculiares formas estructurales y a las dificultades para predecir su comportamiento, tanto a nivel global como local. Estos desafíos se agravan en zonas de alta sismicidad, donde los racks están expuestos a fuerzas horizontales. El colapso de racks durante un evento sísmico pone en riesgo la vida de empleados y consumidores, además de ocasionar pérdidas económicas que superan ampliamente el costo de la estructura [3]. Además, el colapso interrumpe la cadena de suministro, afectando la economía local.

La deformación plástica de las conexiones viga-columna puede generar deformaciones residuales difíciles de reparar tras un terremoto [5]. Para abordar este problema, las conexiones auto-centrantes con disipación de energía han sido intensamente investigadas en la última década, tanto en estudios analíticos como experimentales [6]. La principal ventaja de estos sistemas es que permiten que la estructura regrese a su configuración original después de un evento sísmico. En las últimas cuatro décadas, el desarrollo de sistemas estructurales auto-centrantes ha dado lugar a una serie de diseños innovadores y resistentes a terremotos, que se presentan como alternativas económicamente viables

a los sistemas convencionales. Estas tecnologías ya han sido implementadas con éxito en diversas regiones sísmicas.

Investigaciones previas, como las de Padilla-Reyes et al. (2020) [6], realizaron un estudio conceptual y experimental de una conexión columna-base con un mecanismo auto-centrante y disipación de energía para marcos de madera. Wolski et al. (2009) [7], por su parte, analizaron experimentalmente una conexión viga-columna auto-centrante con dispositivo de fricción. Ambos estudios representan avances importantes en la capacidad auto-centrante y la disipación de energía de conexiones en estructuras de madera y acero, respectivamente, y pueden tener un impacto significativo en la seguridad y eficiencia estructural. El comportamiento histerético de las conexiones viga-columna en racks de almacenamiento industrial es crucial para predecir el comportamiento sísmico de la estructura. Estas conexiones no solo proporcionan fijación y estabilidad, sino que también desempeñan un papel clave en la capacidad de disipación de energía de la estructura [8].

En el contexto de la presente investigación, el estudio de Padillas-Reyes et al. (2020) [6] es de especial relevancia. En él se comprobó que incorporar conexiones auto-centrantes con disipación de energía mediante fricción puede mejorar significativamente el comportamiento de las estructuras sometidas a forzantes externos. Además, se concluyó que el comportamiento de la conexión semirrígida estaba determinado por la carga de postensado y la carga normal sobre el elemento de fricción. Sus hallazgos se utilizarán para formular una nueva conexión viga-columna.

Se propone en esta investigación la formulación de un modelo analítico capaz de reproducir la relación momento-rotación de una propuesta de conexión semirrígida auto-centrante con disipación de energía por fricción. La conexión se diseñó para ser utilizada en racks de almacenamiento industrial de tipo selectivo. La obtención de los parámetros que describen el comportamiento de la conexión se hace tomando como referencia los resultados del estudio de Sanhueza-Cartes et al. (2023) [9] en el Laboratorio de Ingeniería de la UCSC. Ellos realizaron un análisis experimental de conexiones de momento viga-columna de racks de almacenamiento industrial caracterizando las curvas de momento-rotación de conexiones típicamente utilizadas en Chile. Finalmente, se evalúa la efectividad del modelo analítico momento-rotación formulado para predecir el comportamiento de la propuesta de conexión, realizando una simulación del ensayo experimental mediante un control de desplazamiento cíclico específico.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

**2.1 Componentes de la conexión:** Se describen los componentes de la conexión viga-columna, como el sistema pivote, elementos pretensados y de fricción, para mejorar la disipación y autocentrado.

**2.2. Modelo analítico de la conexión:** El modelo analítico se construye mediante el equilibrio de fuerzas entre los componentes elásticos y de fricción, definiendo una relación momento-rotación que caracteriza el comportamiento de la conexión

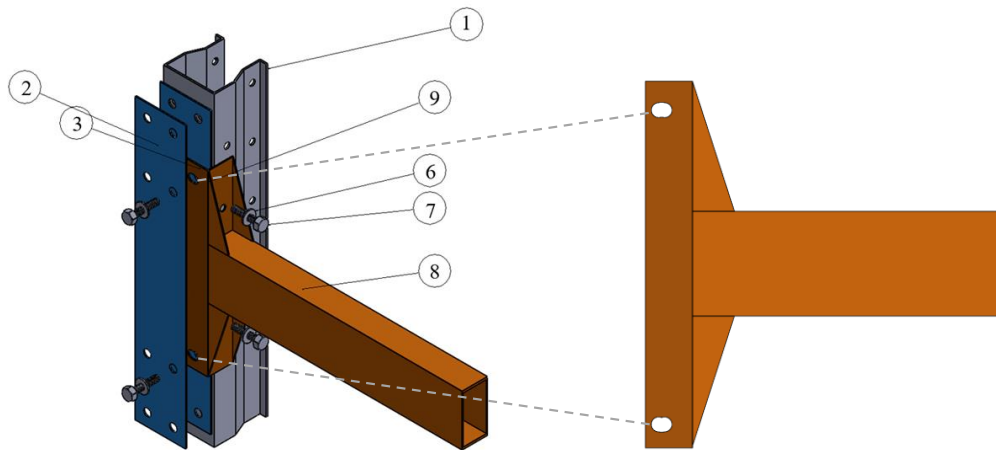
**2.3. Modelo numérico:** Se desarrolla un modelo numérico en Matlab que simula la respuesta de momento en función del giro y parámetros de diseño de la conexión.

**2.4. Simulación experimental y protocolo de carga:** Se describe el montaje experimental y protocolo de carga cíclica para ensayar la conexión bajo condiciones controladas

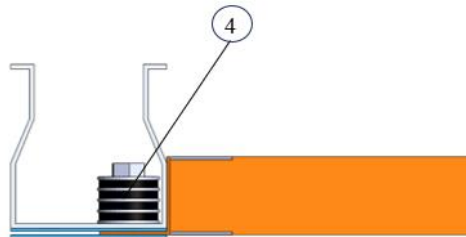
## 2.1 Componentes de la conexión

La conexión propuesta en esta investigación permite unir vigas con columnas de acero utilizadas en racks de almacenamiento industrial de tipo selectivo. Su propósito es restringir el momento flector transmitido a los elementos unidos, dando a la estructura la capacidad de girar en torno a un pivote con un sistema de auto-centrado y disipación de energía, protegiendo los elementos estructurales de daños. La conexión consta de diferentes componentes: el sistema de pivote, el sistema elástico pretensado y el sistema de disipación de fricción. A continuación, se definen los elementos que constituyen la conexión enumerados en la Figura 1. La viga (8) y la columna (1) están conformadas por los mismos elementos de una conexión convencional. La conexión está compuesta por un perfil L (3) con perforaciones alargadas en la zona de transferencia de carga; esto permite el giro en la conexión entorno a un pivote para evitar fallas locales debido a flexión excesiva; además, se incluyen rigidizadores (9) entre el perfil L y la viga para reforzar la conexión.

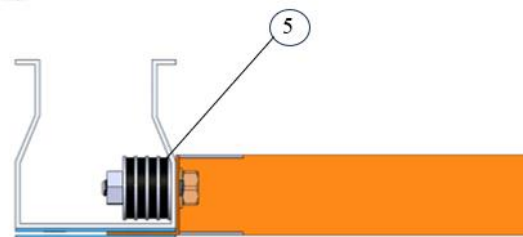
a)



b)

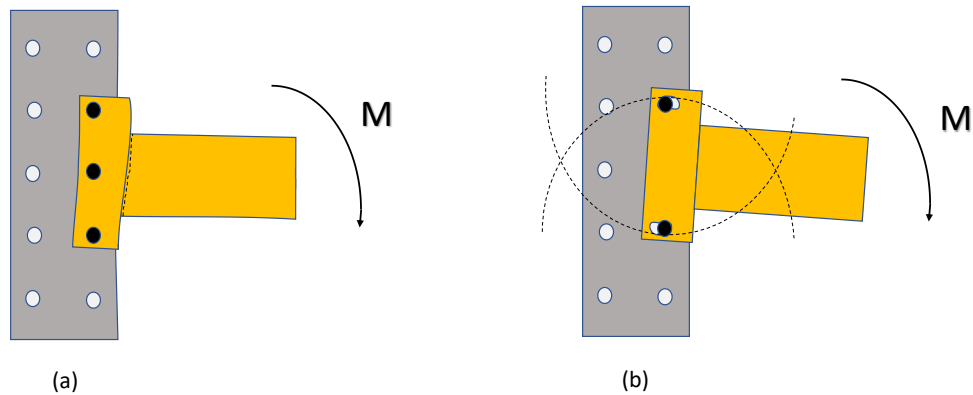


c)



**Figura 1:** (a) Vista 3D y detalle de perforaciones alargadas, (b) Corte sección transversal a nivel del perno de auto-centrado, (c) corte sección transversal a nivel del perno de disipación por roce.

La diferencia de comportamiento entre una conexión típica y la que se propone en la presente investigación se muestra esquemáticamente en la Figura 2. Implementar este sistema pivote se debe a que una de las fallas más comunes en las conexiones típicas de racks es por rotura en la soldadura entre el perfil L y la viga. Al proporcionar el sistema de la figura 2(b), la conexión aumenta su capacidad de deformación disminuyendo así los esfuerzos internos de los elementos afectados. La rotación de la conexión se produce entorno al pivote inferior cuando el momento transmitido es en el sentido horario. Cuando el momento transmitido está en la dirección opuesta, el punto de pivote de la conexión se cambia al perno superior.

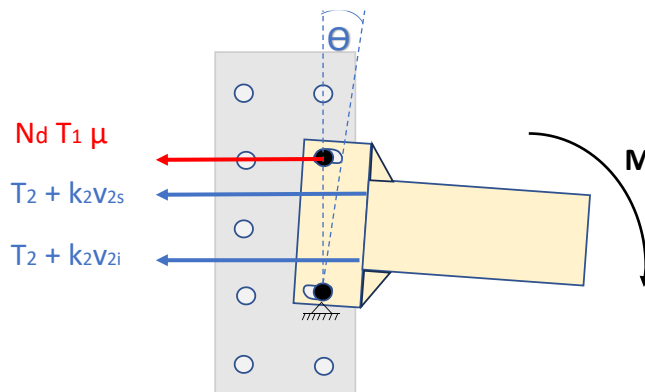


**Figura 2:** Comportamiento de conexión ante forzante de momento externo. (a) Conexión convencional (b) Conexión propuesta.

A lo anterior se agrega un sistema elástico pretensado en dirección paralela al pasillo, compuesto por dos resortes elastoméricos por capas (superior e inferior) ⑤, pretensados con una tensión  $T_2$  y ubicados por dentro de la columna del rack. El sistema elástico pretensado permite mantener la conexión cerrada hasta que se supere un determinado momento de flexión. Una vez superado este valor, este sistema presenta una reducción en su rigidez, lo que favorece la concentración de deformación en la conexión debido a la acción de un forzante externo. Este sistema le permite a la conexión volver a su posición auto-centrada una vez retiradas las cargas externas. La concentración de deformación permite limitar el aumento de las tensiones internas de los elementos conectados. El sistema elástico pretensado está fijado mediante pernos de 9 mm con tuerca de cabeza hexagonal de 20 mm y paso de 1.5 mm/vuelta ⑦ que permiten el ajuste de la carga de pretensado sobre los resortes. La pretensión de los resortes ⑤ comprime el perfil L contra la columna. El número de vueltas de tuerca necesarias para aplicar la carga de pretensión deseada se puede determinar a través de la relación entre la fuerza y el alargamiento de los resortes. Al girar las tuercas, se comprimen uniformemente mediante golillas de acero plana ⑥ a una velocidad de 1.5 mm/vuelta. Finalmente, se propone incorporar un sistema de disipación por fricción que reduce los efectos adversos de las cargas dinámicas en los racks, transformando parte de la energía impuesta en calor. Este sistema consiste en dos placas adicionales reemplazables ②, ubicadas sobre y bajo el perfil L. La conexión queda apernada por fuera y por dentro de la columna empleando un sistema que incluye dos resortes elastoméricos por capas (superior e inferior) ④, situados en la parte interior de la columna y comprimidos con una pretensión  $T_1$ , lo que genera una fuerza normal entre el alma de la columna y el sistema de placas. La fuerza de roce resultante es opuesta a la velocidad de giro del perfil L sobre las placas. En el diseño de los resortes elastoméricos por capas, se utilizó como fundamento teórico la investigación de Kelly, J. M. (1997) [10].

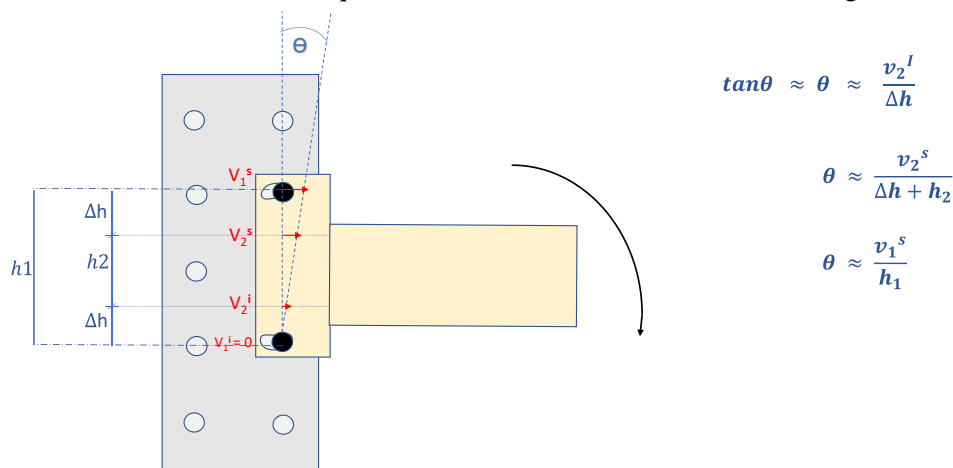
## 2.2. Modelo analítico de la conexión

El modelo analítico de la conexión propuesta se define en función del comportamiento de sus componentes individuales. Dichos elementos son el momento elástico (ME) proporcionado por los componentes elásticos postensados, y el momento de roce (MR) debido al elemento de fricción. Estos elementos, en conjunto, caracterizan el funcionamiento de la conexión en términos de momento flector (MRP).



**Figura 3:** Diagrama de cuerpo libre de la conexión sometida a un forzante de Momento

Se realizó un diagrama de cuerpo libre de la conexión que permite realizar la formulación del modelo matemático analítico. Dicha formulación se hizo mediante el equilibrio de todas las fuerzas que interactúan en la conexión y que determinan su comportamiento. Estas fuerzas se muestran esquemáticamente en la Figura 3. Dichas fuerzas son la fuerza de roce ( $F_r$ ) obtenida mediante el producto de la pretensión ( $T_1$ ), el coeficiente de roce ( $\mu$ ) y el número de planos de deslizamiento ( $N_d$ ). Las fuerzas de los resortes superior e inferior pretensados con una tensión ( $T_2$ ), las cuales pueden aumentar eventualmente al existir un giro. Este aumento tiene un valor igual a la rigidez de los resortes ( $k_2$ ) multiplicadas por los desplazamientos relativos viga-columna en los puntos de pivotes superior ( $v_{2s}$ ) e inferior ( $v_{2i}$ ). En la formulación del equilibrio se consideró un apoyo fijo en el punto de pivote, el cual puede estar en los pernos superior e inferior, dependiendo del sentido del giro impuesto a la conexión. Además, se realizó una descripción detallada de las relaciones cinemática de los grados de libertad locales presentes en la conexión. En dichas relaciones, el grado de libertad considerado como global o maestro fue el giro relativo de la conexión. Esto implica relacionar los desplazamientos de los elementos que la conforman, como se muestra en la Figura 4.



**Figura 4:** Cinemática de la conexión en función del giro de esta.

Para el modelo de análisis se consideran sets correspondientes a los principales parámetros de diseño de la conexión. Estos son: la fuerza de roce ( $F_r$ ), la rigidez de los resortes de auto-centrado ( $k_2$ ) y la tensión de pretensado de éstos ( $T_2$ ). Los sets de parámetros seleccionados se muestran en la Tabla 1 y serán los que se utilizarán en el análisis paramétrico.

Tabla 1: Parámetros a utilizar en el análisis paramétrico

Parámetro	Valor	Valor	Valor	Valor
$\mu$	1	1	1	1
$Fr$ (kN)	3	4	5	6
$k_2$ (kN/m)	1248	1664	1830	1996
$T_2$ (kN)	5	6	7	8

### 2.3. Modelo numérico

Se propone un modelo de momento en función del giro que caracteriza el aporte de todos los componentes que interactúan en la conexión.

$$M_{RP}(\theta, \dot{\theta}) = (\Delta h^2 + (\Delta h + h_2)^2)k_2\theta + T_2(2\Delta h + h_2)\text{sign}(\theta) + n_d T_1 \mu h_1 \text{sign}(\dot{\theta}) \quad (1)$$

Esta ecuación de equilibrio permite implementar en el software MATLAB un modelo numérico que reproduce la respuesta de momento de la conexión ante la aplicación de un determinado forzante de rotación cíclica específico. Como se puede apreciar, la ecuación (1) tiene una parte lineal (primer término) y otra no lineal debido a que tiene incorporada la función "sign" del giro ( $\theta$ ) y de la velocidad de giro ( $\dot{\theta}$ ). Una de las ventajas de esta formulación es que hay una ecuación explícita que describe la no linealidad de la conexión. A partir del modelo numérico y las diferentes respuestas de momento para los sets de parámetros, se escoge el set de parámetros óptimo para ser utilizado en la simulación del ensayo experimental; vale decir, el set de parámetros que ofrezca al menos la resistencia a momento y cantidad de energía disipada que una conexión tradicional. Como referencia se tendrán los resultados del estudio realizado por Sanhueza et al. (2023) [9].

### 2.4. Simulación experimental y protocolo de carga

El montaje mostrado en la Figura 5 corresponde a un ensayo de conexión viga-columna controlado por desplazamiento mediante un actuador hidráulico. La configuración incluye una columna vertical de perfil metálico de sección abierta mostrada en la Figura 6(a), conectada a una viga de sección transversal rectangular hueca mostrada en la Figura 6(b), con un dispositivo de restricción lateral que asegura deformaciones fuera del plano de análisis. Esta viga está formada por dos perfiles tipo C, los cuales están unidos mediante puntos de soldadura a lo largo de toda su longitud.

La conexión viga-columna se ensaya utilizando una celda de carga para medir la fuerza aplicada y un transductor de desplazamiento para registrar el movimiento inducido por el actuador. Para la simulación se utilizó una viga de longitud 1.3 metros medidos desde la columna hasta el punto de aplicación de la fuerza. Está apoyada en extremos articulados que permiten el movimiento controlado, mientras que diferentes piezas adicionales aseguran la estabilidad y correcta transferencia de cargas en la estructura. Este montaje se modela numéricamente en Matlab como un ensayo cuasi-estático. Se utilizó un sistema conformado por 3 elementos: la columna, la conexión, la viga. Un algoritmo reproduce la respuesta del sistema columna-conexión-viga ante un desplazamiento inducido. Como se puede observar en la ecuación (2), se establece una relación entre deformación impuesta  $u(t)$  y las deformaciones de los elementos constituyentes del sistema ensayado. Estas deformaciones son proporcionales a la flexibilidad (inverso de la rigidez) de cada componente. De este modo, mientras la conexión esté "frenada" por roce, la deformación incremental impuesta en ella es nula. En este esquema, la columna proporciona la flexibilidad que relaciona el momento generado en la rótula con

la deformación absorbida por la columna. Del mismo modo, la viga aporta una flexibilidad que asocia el momento en la rótula con la deformación vertical resultante absorbida por la viga. Se impone esta condición, pero el aporte de desplazamiento de la columna, rotula plástica y viga varía en cada  $\Delta u$ .

$$u(t) = u_c + u_{RP} + u_V \quad (2)$$

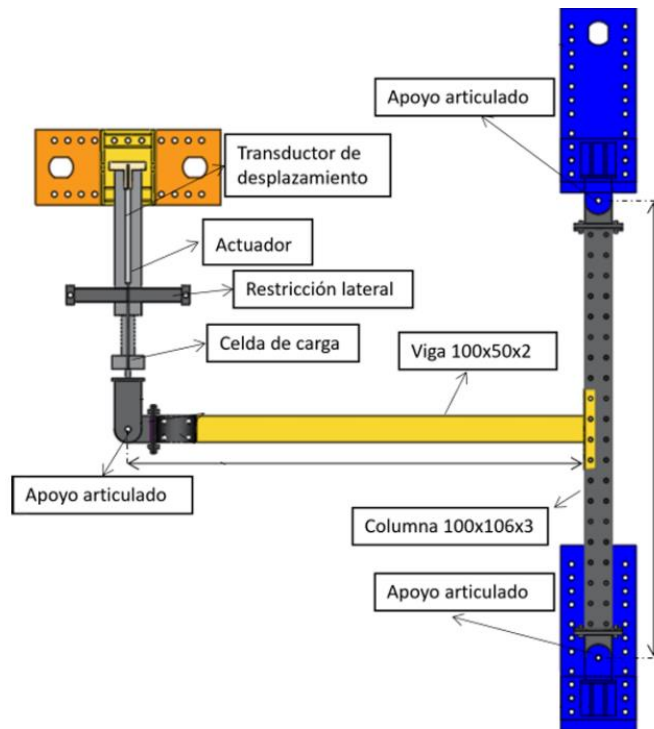


Figura 5: Modelo esquemático del montaje experimental

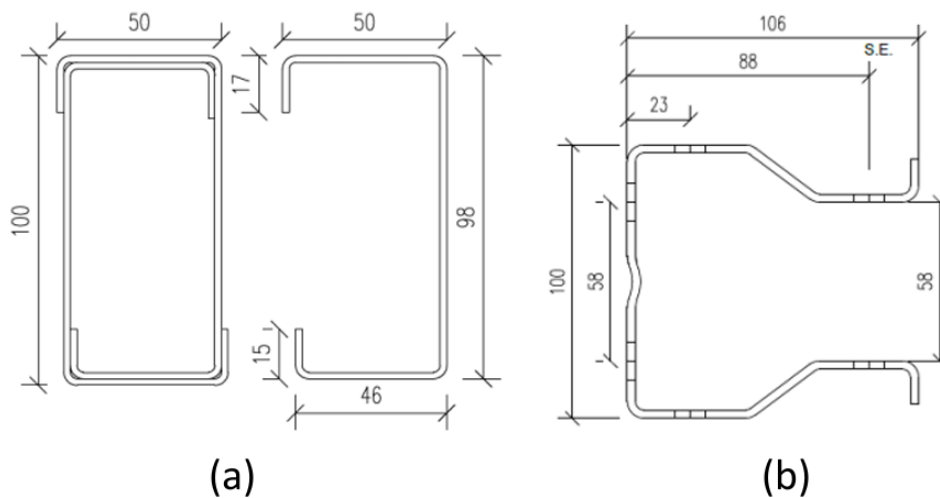
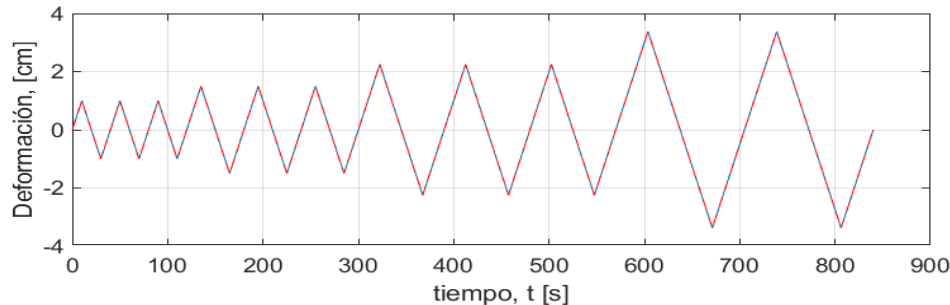


Figura 6: Detalle de sección transversal de perfiles. (a) Viga 100x50x2mm. (b) Pilar 100x106x3mm.

El desplazamiento inducido en el ensayo experimental que se busca simular numéricamente es una adaptación del protocolo de carga para ensayos de conexiones viga-columna del código americano AISC 341, cap. K. Este se muestra de forma gráfica en la Figura 7 y consiste en ciclos de tipo serrucho con distintos niveles de desplazamiento impuesto.



**Figura 7:** Protocolo de carga o desplazamiento vs tiempo impuesto en el ensayo experimental de la conexión viga-columna que se busca simular.

El modelo analítico de la conexión propuesta (ecuación (1)) fue alimentado con parámetros seleccionados ad-hoc, los cuales incluyeron la rigidez elástica, coeficientes de fricción, propiedades geométricas y las características materiales de los componentes estructurales. La implementación numérica elaborada se comporta como un modelo por diferencias finitas. Es decir, el comportamiento del sistema en el instante inicial se propaga hacia los instantes sucesivos en incrementos de tiempos discretos, de acuerdo a una ley matemática. Esta regla matemática distribuye el incremento de deformación  $\Delta u$  impuesto entre instantes discretos entre la columna, conexión y viga.

A través de este enfoque, se desarrolló una curva de momento-rotación para la simulación del ensayo, permitiendo simular tanto el comportamiento elástico inicial, como las deformaciones que ocurren durante las fases de carga y descarga.

Tabla 2 – Datos del protocolo de carga.

Desplazamiento (cm)	Nº de ciclos
1	3
1.5	3
1.5 <sup>2</sup>	3
1.5 <sup>3</sup>	2

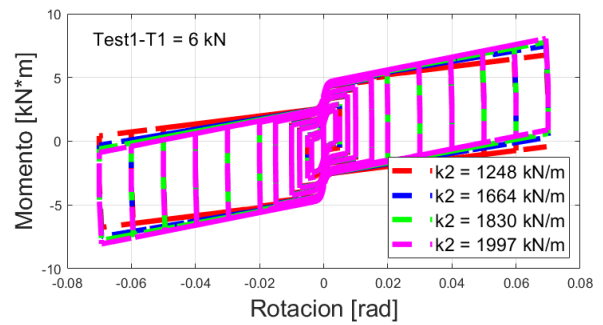
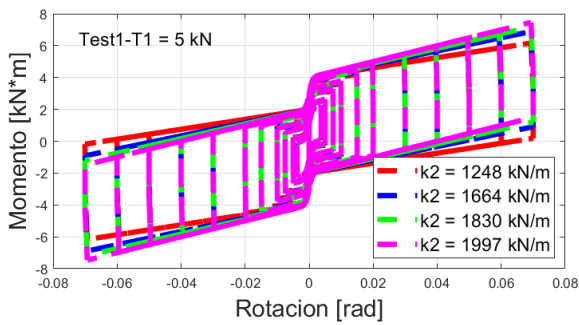
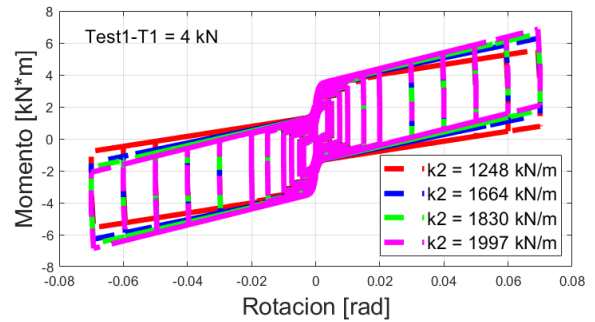
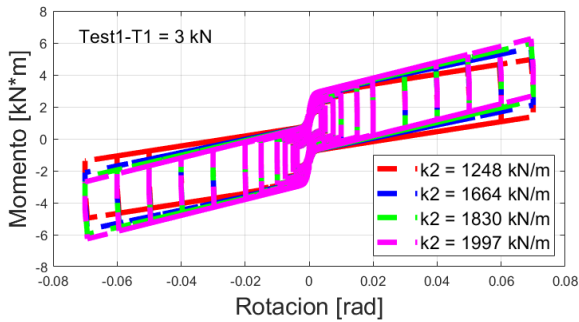
### 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

#### 3.1. Análisis no lineal paramétrico

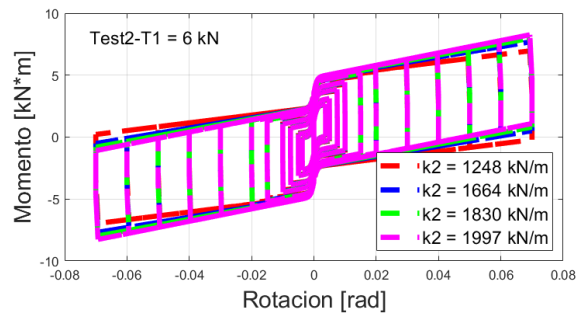
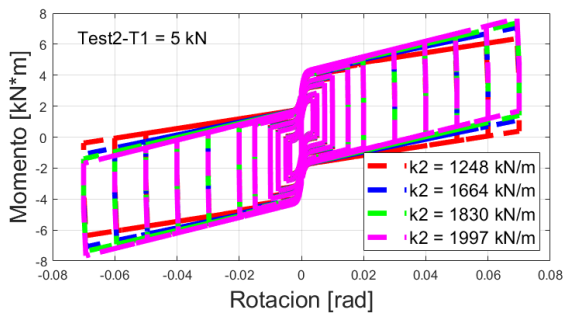
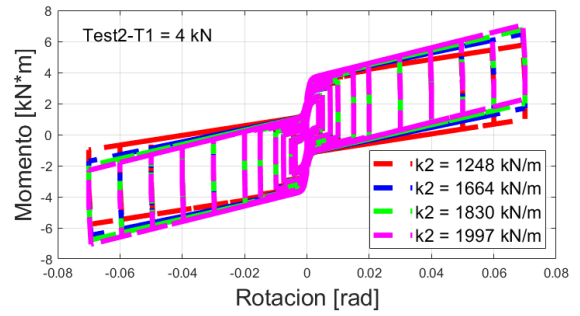
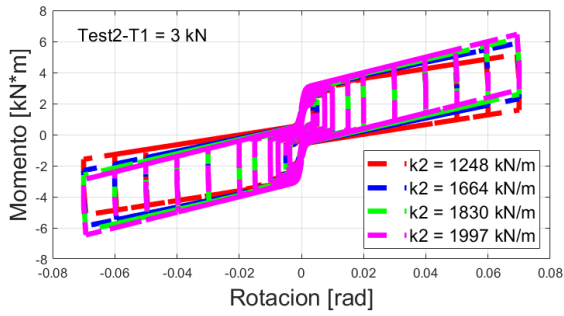
En la Figura 8 (a-d) se muestran los resultados de las curvas momento-rotación del análisis no lineal paramétrico. El análisis se hace basado en el modelo analítico formulado (ecuación (1)) y siguiendo la metodología descrita en esta investigación. Cada una de las gráficas muestra los resultados para cada set de parámetros. El color de línea en las gráficas hace referencia a las distintas rigideces ( $k_2$ ) de los resortes elastoméricos pretensados utilizados en el mecanismo de auto-centrado de la conexión.

En la Tabla 3 se presentan los resultados de la energía disipada para los diferentes conjuntos de parámetros. En la Figura 9 se muestra la energía disipada por ciclo para distintas fuerzas de roce. Con respecto a estos resultados, se puede afirmar que el conjunto de parámetros N° 13 resultó ser el más adecuado. Es decir, el conjunto que generó un momento máximo y una energía disipada al menos equivalentes a los obtenidos en ensayos experimentales de conexiones convencionales. Además, se puede observar que es la gráfica que presenta el mejor comportamiento de auto-centrado, lo cual se debe a la relación entre la fuerza de roce ( $F_r$ ) y la pretensión inicial  $T_2$  de los resortes.

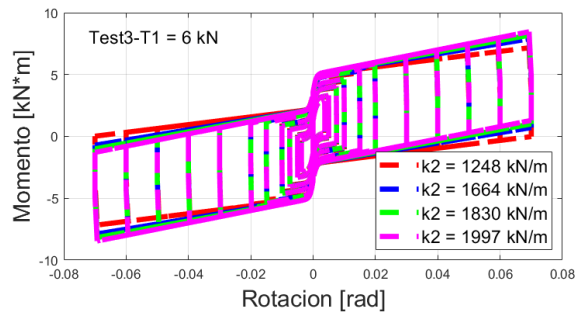
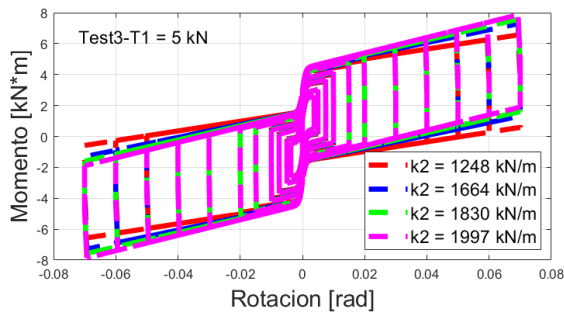
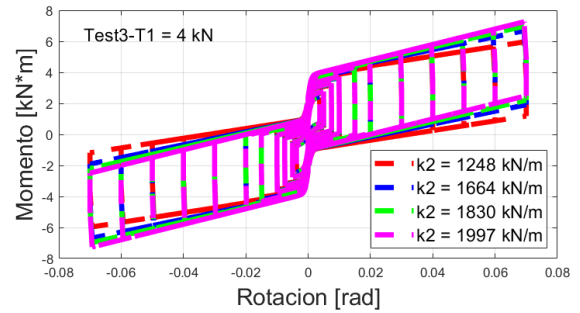
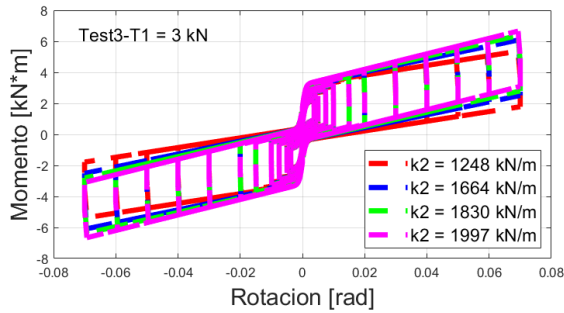
(a)



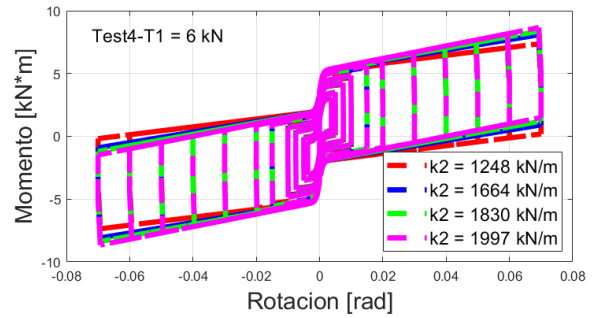
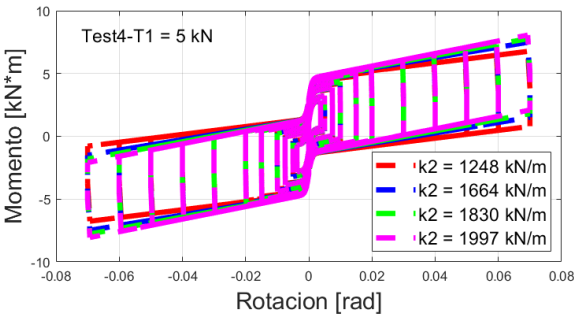
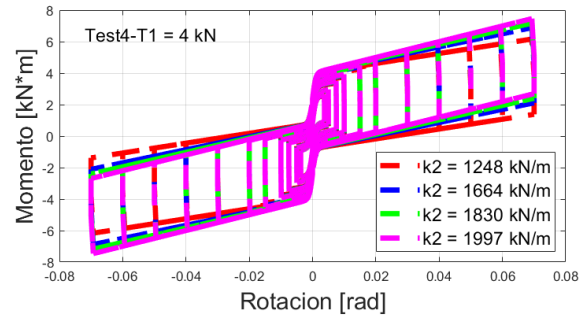
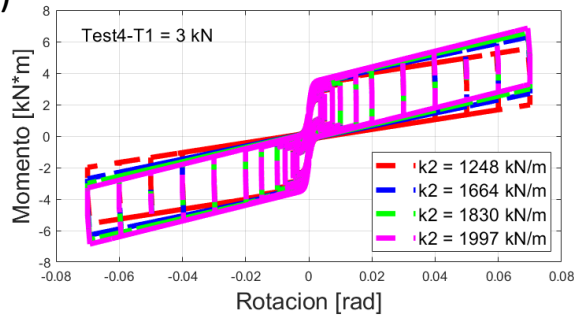
(b)



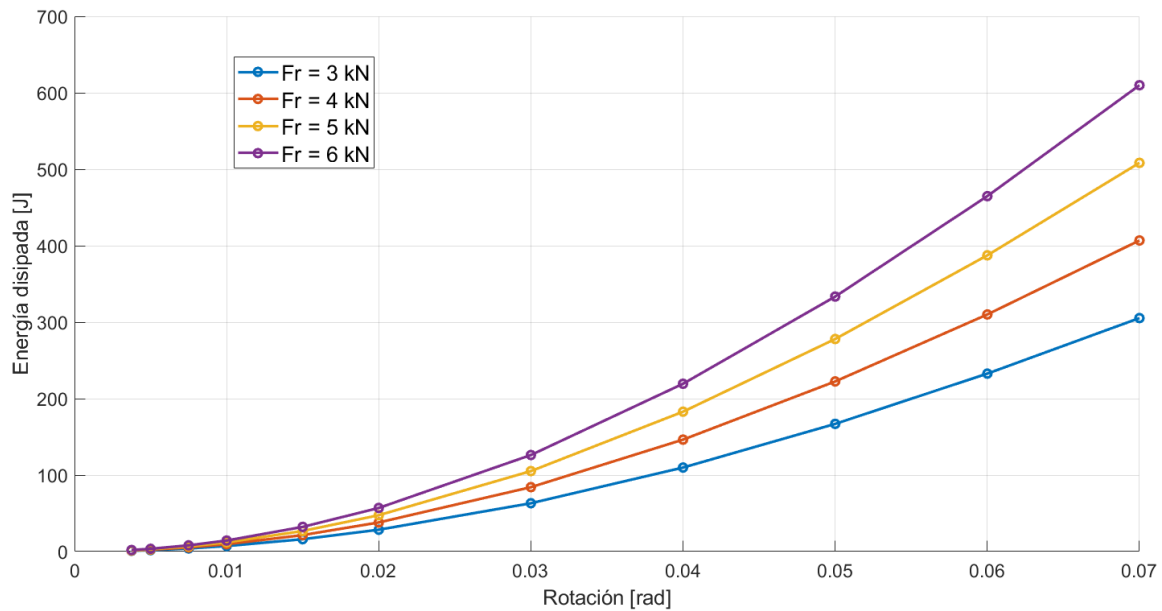
(c)



(d)



**Figura 8:** Efecto de la fuerza de roce ( $F_r$ ) para diferentes pretensiones de pernos laterales en el comportamiento histerético de la conexión, (a) Test 1 ( $T_2 = 5\text{kN}$ ), (b) Test 2 ( $T_2=6\text{kN}$ ), (c) Test 3 ( $T_2=7\text{kN}$ ), (d) Test 4 ( $T_2=8\text{kN}$ ).



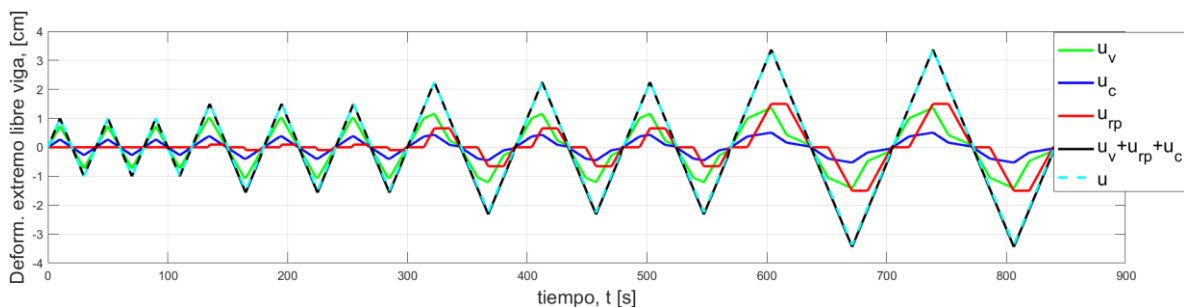
**Figura 9:** Curvas de energía disipada por niveles de rotación según fuerza de roce ( $F_r$ ).

Tabla 3: Energía disipada acumulada para distintos sets de parámetros.

Nº de set	Fuerza de Roce ( $F_r$ )	$T_2$ (kN)	Energía disipada acumulada, $E_{d-ac}$ [J]
1	3	5	955.96
2	4	5	1273.9
3	5	5	1591.8
4	6	5	1909.8
5	3	6	956.36
6	4	6	1274.3
7	5	6	1592.2
8	6	6	1910.2
9	3	7	956.76
10	4	7	1274.7
11	5	7	1592.6
12	6	7	1910.6
13	3	7	957.15
14	4	8	1275.1
15	5	8	1593
16	6	8	1911

### 3.2 Simulación experimental

El gráfico presentado en la Figura 10 muestra las curvas de deformación vertical de los componentes del sistema (viga, columna y rótula plástica) obtenidas a partir del algoritmo que simula el montaje experimental. Las curvas  $u_v$  (deformación de la viga),  $u_c$  (deformación de la columna), y  $u_{rp}$  (deformación de la rótula plástica) exhiben un comportamiento oscilatorio, indicativo de una respuesta dinámica bajo cargas cíclicas.

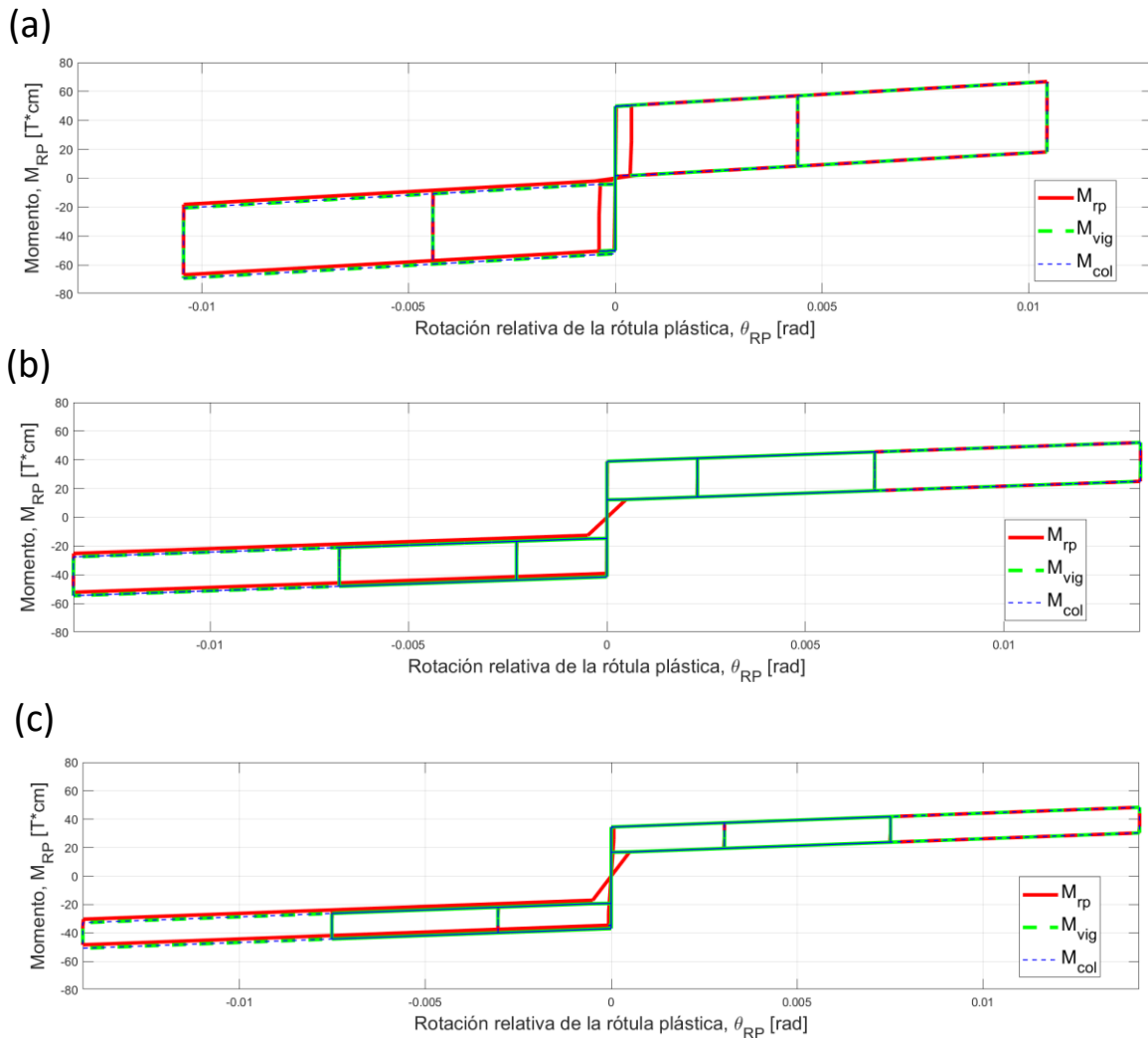


**Figura 10:** Curvas de desplazamiento de los elementos del sistema simulado numéricamente.

La curva  $u_v$  (verde) representa la deformación vertical de la viga, mostrando oscilaciones regulares con una amplitud moderada. La curva  $u_c$  (azul) describe la deformación en la columna, con un comportamiento similar, pero con una amplitud ligeramente menor, lo que refleja una contribución más limitada al comportamiento global debido a sus rigideces relativas. Por su parte, la curva  $u_{rp}$  (rojo) presenta la deformación de la rótula plástica en el sistema. Como se esperaba, su aporte a la deformación del sistema es cero (meseta plana en la gráfica) en las zonas donde la rótula se bloquea por roce. Esto ocurre en la transición de la zona de carga a descarga y descarga a carga. En los ciclos de carga de baja amplitud, la deformación en la rótula plástica es cero. Esto se explica porque la conexión está bloqueada por roce y no ha alcanzado la zona de carga donde la rótula comienza a

concentrar rotación. Una vez superado un determinado desplazamiento umbral necesario para vencer la fuerza de roce en la conexión, la rótula empieza a aportar deformación al sistema siendo el elemento que más deformación aporta en los ciclos de carga de mayor amplitud. Esto muestra que la conexión es capaz de proteger a los elementos conectados (viga y columna) del daño por transferencia de momento flector excesivo al concentrar deformación inelástica en ella.

La curva negra  $u_v+u_{rp}+u_c$ , que representa la suma de las deformaciones de los tres elementos, coincide exactamente con la curva discontinua  $u$ . Esto quiere decir que el algoritmo es capaz de distribuir la totalidad de la deformación impuesta entre los tres elementos constituyentes del sistema ensayado numéricamente (columna, conexión y viga).



**Figura 11:** Curvas de momento-rotación de los elementos del sistema simulado numéricamente. (a) Simulación 1 ( $T_1=2.7$  tonf), (b) simulación 2 ( $T_1=1.5$  tonf), (c) simulación 3 ( $T_1=1$  tonf).

En la Figura 11 se muestran las curvas de momento de la rótula plástica, viga y columna ( $M_{rp}$ ,  $M_{vig}$  y  $M_{col}$ ) obtenidas a partir del algoritmo que simula el ensayo experimental descrito anteriormente. Debido a que los tres elementos están conectados en serie, es evidente que el momento interno en cada uno de ellos en el punto de conexión o punto común entre los tres debe ser idéntico. En los ciclos con baja amplitud de rotación, la gráfica se mueve verticalmente. Las curvas muestran tres ramas verticales, una que pasa por el origen y otras dos en los extremos derecho e izquierdo de cada ciclo

histerético. La primera rama corresponde a la transición de reposo a carga, reposo a descarga o descarga negativa a carga positiva. La rama vertical de la izquierda sólo puede reproducir el paso de carga negativa a descarga negativa. De similar manera, la rama vertical de la derecha sólo puede reproducir la transición entre la rama de carga positiva y la de descarga positiva. En cualquiera de estas tres ramas verticales el incremento de rotación de la conexión es evidentemente cero como se observa en la Figura 11. Esto quiere decir que la conexión está bloqueada por roce, lo que se representa en la Figura 10 por mesetas planas en la curva roce de la deformación  $u_{rp}$  absorbida por la rótula plástica. Mientras la rótula plástica está bloqueada por roce, la viga y columna son los elementos que absorben la deformación impuesta por el protocolo de carga. Esto queda en evidencia en la Figura 10, donde las pendientes de las curvas  $u_v$  y  $u_c$  se tornan más acentuadas en cada lapso en que la curva de  $u_{rp}$  es plana. Por el contrario, en la Figura 10 en los intervalos en que la pendiente de la curva de  $u_{rp}$  se torna pronunciada, las pendientes de las curvas de  $u_v$  y  $u_c$  se tornan casi horizontales. Esto muestra que la conexión absorbe la mayor parte de la deformación, protegiendo a la viga y columna de daño por deformación acumulada excesiva.

#### 4. CONCLUSIONES

Se presentó un modelo conceptual de la conexión teóricamente capaz de proporcionar capacidad de auto-centrado, disipación de energía y resistencia similar a la correspondiente a la conexión tradicionalmente utilizada en racks chilenos. Se presenta un modelo constructivo consistente con dicho modelo conceptual que puede ser implementado en racks de almacenamiento industrial tipo selectivo construidos de acuerdo a la práctica actual en Chile.

Se desarrolló un modelo analítico para la caracterización de la relación momento-rotación de la conexión. Su formulación se basó en el equilibrio dinámico de las componentes constituyentes del modelo constructivo, incorporando los principales parámetros de diseño de ésta.

Se realizó un análisis no lineal paramétrico del modelo analítico de la conexión que permitió identificar el set de parámetros más adecuado para un potencial prototipo de construcción posterior. De los resultados del análisis se observó que, la capacidad de disipación de energía de la conexión está básicamente controlada por la pretensión de los pernos frontales (T1) en el mecanismo de fricción. Por otro lado, la capacidad de auto-centrado de la conexión depende de la relación entre la fuerza de roce ( $F_r$ ) y la pretensión de los pernos en el mecanismo de auto-centrado o pernos laterales (T2) dispuestos en la dirección paralela al pasillo. Una cantidad excesiva de pretensión de los pernos frontales (T1) en relación a la correspondiente a los pernos laterales (T2) puede conducir al bloqueo de la conexión y mermar su capacidad de auto-centrado. Una mayor resistencia a momento flector se alcanza en la conexión para mayores valores de ambas tensiones de pernos T1 y T2.

Se realizó una simulación de un ensayo experimental de carga cíclica cuasi estática adaptado del AISC 341 capítulo K, utilizado para evaluar la capacidad de conexiones de momento viga-columna. En la simulación se utilizó el modelo analítico desarrollado previamente para la conexión, considerando el set de parámetros de diseño de esta obtenido como los más adecuados a partir del análisis paramétrico. Esta simulación incorpora la interacción de los elementos columna, conexión y viga, el equilibrio de esfuerzos internos entre ellos y la forma en que la deformación impuesta se distribuye entre los tres, mediante un algoritmo numérico de diferencias finitas. La simulación numérica es capaz de predecir adecuadamente la deformación impuesta entre los tres elementos constituyentes (columna, conexión, viga). Se mantiene idéntico el momento interno en el punto de interacción entre estos tres elementos estructurales, condición necesaria por el trabajo en serie entre ellos. La simulación es capaz de predecir la condición de bloqueo por roce de la conexión por reversión de la carga.

El modelo numérico desarrollado para la simulación del comportamiento de la conexión viga-columna ha mostrado ser una herramienta certera para predecir fenomenológicamente el comportamiento. A través de un conjunto de parámetros seleccionados y la implementación de ecuaciones constitutivas que representan la relación momento-rotación, se logró replicar de buena manera tanto el comportamiento elástico como el no lineal de la conexión. Esta simulación mostró potencial como herramienta predictiva del ensayo de conexiones de momento viga-columna, pudiendo ser utilizada para definir a priori los parámetros de ejecución experimental. Esto permitiría ahorrar tiempo y dinero al reducir la cantidad de arquetipos a ensayar en una campaña experimental posterior. Adicionalmente, los resultados de una campaña experimental con arquetipos adecuadamente seleccionados permitirían validar el modelo analítico de la conexión presentado aquí, así como su implementación en estantería industrial.

## 5. REFERENCIAS

- [1] Centro Sismológico Nacional de la Universidad de Chile. (2019). Resumen Actividad Sísmica Anual en Chile 2018.
- [2] Núñez, E., Aguayo, C., & Mata, R. (2023). Incremental dynamic analysis of steel storage racks subjected to Chilean earthquakes.
- [3] Kanyilmaz, A., Brambilla, G., Chiarelli, G. P., & Castiglioni, C. A. (2016). Assessment of the seismic behaviour of braced steel storage racking systems by means of full scale push over tests
- [4] Jovanovic, D., Zarkovic, D., Vukobratovic, V., & Brujic, Z. (2019). Hysteresis model for beam-to-column connections of steel storage racks.
- [5] Xu, X., Zhang, Y., & Luo, Y. (2016). Self-centering modularized link beams with post-tensioned shape memory alloy rods. *Engineering Structures*.
- [6] Padilla-Reyes, J., Maureira-Carsalade, N., San-Martín-Canales, J., & Roco-Videla, Á. (2020). A conceptual study of a self-centering semi-rigid connection with energy dissipation for wooden frames.
- [7] Wolski, M., Ricles, J. M., & Sause, R. (2009),
- [8] Zhao, X., Dai L., & Rasmussen, K. J. R. (2018). Hysteretic behaviour of Steel storage rack beam-to-upright boltless connections. In *Journal of Constructional Steel Research*
- [9] Sanhueza, M., Maureira, N., & Valdez, R. (2023). Análisis experimental de conexiones de momento viga-columna de racks de almacenamiento industrial.
- [10] Kelly, J. M. (1997). Earthquake-Resistant Design with Rubber (pp. 131-148). DOI: 10.1007/978-1-4471-0971-6