

Análisis experimental de conexiones de momento viga-columna de racks de almacenamiento industrial

Experimental analysis of beam-column moment connections of industrial storage racks

Fecha de entrega: 15 de noviembre 2023

Fecha de aceptación: 21 de marzo 2024

Marcelo Sanhueza¹, Nelson Maureira² y Rodrigo Valdez³

Universidad Católica de la Santísima Concepción, Departamento de Ingeniería Civil, Concepción, Chile, msanhuezac@magister.ucsc.cl, nmaureira@ucsc.cl (Orcid: 0000-0003-2016-1154), rvaldez@ing.ucsc.cl

Se presentan resultados de ensayos de conexiones de momento viga-columna de racks de almacenamiento. Se realizaron ensayos cuasi-estáticos usando un actuador electromecánico controlado por desplazamiento a conexiones con dos diferentes torques de apriete de pernos. El montaje experimental contempla una columna 1.48 m de largo, rotulada en sus dos extremos, y una viga de largo 1.72 m. El actuador cuenta con una celda de carga de 900 kg de capacidad en su extremo de conexión con la viga y registra la deformación aplicada mediante un sensor de desplazamiento de recorrido de 300 mm. La viga fue instrumentada con sensores de giro, disponiendo uno justo antes del apoyo, y dos en el perfil L que la conecta con la columna. El forzante corresponde a secuencias de desplazamiento cíclico tipo serrucho con amplitudes crecientes, adaptada del AISC341 (2022) sección K. Los resultados mostraron que, al incrementar el torque de 54.2 Nm a 108.5 Nm, la rigidez elástica se incrementó en un 45%. Un mayor torque de apriete generó reducción en el pinching y aumento en la energía disipada de la conexión, en comparación al caso con menor torque. En general, las conexiones fueron capaces de resistir rotaciones de hasta 0.07 rad.

Palabras clave: energía disipada, pinching, rigidez elástica, rigidez post-fluencia

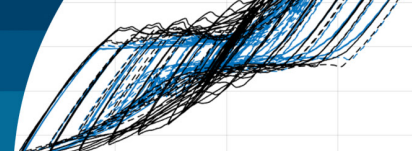
Test results of beam-column moment connections of storage racks are presented. Quasi-static tests were performed using a displacement-controlled electromechanical actuator on connections with two different bolting torques. The experimental setup contemplates a 1.48 m long column, labeled at both ends, and a 1.72 m long beam. The actuator has a 900 kg capacity load cell at its connection end with the beam and registers the applied deformation through a 300 mm travel displacement sensor. The beam was instrumented with rotation sensors, having one just before the support, and two in the L profile that connects it with the column. The loading corresponds to saw-like cyclic displacement sequences with increasing amplitudes, adapted from the AISC341 (2022) section K. The results showed that, by increasing the torque from 54.2 Nm to 108.5 Nm, the elastic stiffness increased by 45%. A higher tightening torque generated a reduction in pinching and an increase in the energy dissipated from the connection, compared to the case with lower torque. In general, the connections were capable of resisting rotations of up to 0.07 rad.

Keywords: dissipated energy, pinching, elastic stiffness, post-yield stiffness

Introducción

En la industria chilena y a nivel internacional, las estanterías o racks de almacenamiento industrial son altamente utilizados en diferentes niveles de la cadena productiva (Chen *et al.*, 1980). Permiten una adecuada organización y son capaces de resistir cargas unitarias muy grandes, independiente de sus dimensiones estructurales

y de su bajo peso propio. Generalmente, los racks están diseñados con perfiles de acero conformados en frío, usando conexiones que permiten un rápido y fácil montaje (Tagliaferro *et al.*, 2021). La configuración estructural más utilizada en los racks de almacenamiento industrial es en base a marcos tridimensionales que se unen ortogonalmente con plataformas planas en cada nivel de elevación (Teh *et al.*, 2004). En su cara corta, o

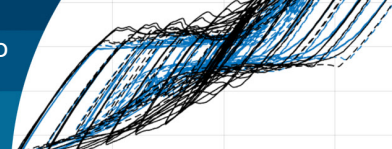


dirección transversal, se diseñan con un reticulado (plano arriostrado) de ancho entre 1 a 2 m. Por el contrario, en la dirección longitudinal u horizontal, solo se utilizan marcos a momento permitiendo el fácil acceso al contenido, con largos que dependen de las disposiciones operacionales (ver por ejemplo mecalux.cl/catalogos). Estos marcos a momento, a diferencia de los utilizados en edificios, se diseñan para provocar deformaciones inelásticas en las conexiones (Filiatrault *et al.*, 2006). Dependiendo del lugar de ubicación y del contenido a almacenar, la estantería industrial puede poseer alturas superiores a los 10 m, con diferentes divisiones en su elevación (mecalux.cl). Esto último, genera varias ventajas en términos de espacio, pero provoca que la estructura se vuelva muy esbelta y flexible en una de sus direcciones horizontales. Lo anterior, genera un problema dentro de los territorios con alta actividad sísmica, ya que son estructuras muy vulnerables a este tipo de solicitaciones.

Durante terremotos recientes, han ocurrido algunos colapsos de estructuras de estanterías de acero, lo que ha generado inquietudes sobre la capacidad de las estructuras de almacenamiento industrial para resistir de manera segura los efectos sísmicos. Un ejemplo de esto es la inspección realizada por un grupo de investigadores de EEUU y Nueva Zelanda, los cuales analizaron una gran variedad de edificios industriales para constatar los efectos del terremoto de Darfield de septiembre de 2010 en la ciudad de Christchurch (Crosier *et al.*, 2010). Pese a que se observaron daños menores en las estructuras, los efectos en racks de almacenamiento variaron desde daño moderado a colapso total. Dichos resultados son consistentes con lo señalado por Urma y Beattie (2011) y Clifton *et al.* (2011), que declaran haber observado daño extensivo en racks de almacenamiento industriales. Perrone *et al.* (2019), también realizaron una inspección después del terremoto de Italia Central de 2016, en la cual evidenciaron el colapso de algunas estructuras tipo rack. Núñez *et al.* (2023), mencionan que durante el terremoto ocurrido el 27 de febrero de 2010 en Chile, se registraron grandes pérdidas en estructuras industriales, pero muchas de estas no pudieron ser registradas, ya que las empresas no lo permitieron debido a conflictos de interés. Esto pudo ser corroborado gracias a que el Instituto Nacional de Estadísticas INE logró identificar que después de este evento sísmico hubo una notoria disminución en la producción industrial.

Una de las componentes de los racks de almacenamiento industrial más solicitadas durante un evento sísmico son las conexiones viga–columna, lo cual se debe principalmente a la gran flexibilidad que presentan los estantes de almacenamiento en la dirección longitudinal al pasillo, lo cual genera grandes niveles de rotación en dichas conexiones en comparación con estructuras tradicionales. Con respecto a esto, se han realizado diversos estudios con la finalidad de describir su comportamiento. Bernuzzi y Castiglioni (2001) y Zhao *et al.* (2018) estudiaron experimentalmente, a través de ensayos monotónicos y cíclicos, diferentes arquetipos de juntas viga–columna con el sistema speed-lock. En ambos estudios se estudiaron diferentes configuraciones de conexiones, variando el tipo de perfil de la columna, espesor de columna, largo de viga y número de pestaña. Ellos lograron identificar que el modo de falla de la conexión depende del componente más débil que esté presente en la unión. Además, obtuvieron todos los ciclos de histéresis de cada arquetipo, donde identificaron que en todas las curvas presentan pinching. Otra conclusión importante que se obtuvo en estos estudios es que, en la mayoría de las pruebas cíclicas los especímenes colapsaron debido a la extracción de las lengüetas o ganchos.

Por otro lado, en zonas con alta vulnerabilidad sísmica, como por ejemplo el caso de Chile, las conexiones sin pernos pueden ser deficiente para soportar un evento sísmico con las características que se dan en este país. Debido a esto, es que se han realizado investigaciones donde se estudia la conexión viga–columna, pero con pernos adicionales. Uno de estos estudios es el realizado por Dai *et al.* (2018), donde estudiaron 7 grupos de conexiones de forma experimental bajo cargas cíclicas. Dentro de estos siete grupos se variaron el espesor de los montantes, la altura de la columna, el número de lengüetas y el número de pernos en el conector del extremo de la viga. Como resultado obtuvieron las curvas de histéresis momento–rotación y backbone, así como también sus respectivos factores de comportamiento correspondiente a la degradación de rigidez, ductilidad y la capacidad de disipación de energía. Ellos lograron observar que, al agregar solo un perno, la curva momento–rotación se vuelve asimétrica, mientras que con dos pernos la curva es prácticamente simétrica. La incorporación de los pernos mejora considerablemente la resistencia al momento y la ductilidad, pero la capacidad de



disipación de energía no aumenta significativamente. Yin *et al.* (2016) también estudiaron la respuesta monotónica y cíclica experimental de nueve conexiones speed-lock con y sin pernos adicionales. Estos autores lograron identificar que tanto para las pruebas monótonas y cíclicas, los pernos adicionales mejoran significativamente la capacidad de carga, de deformación de las conexiones y la capacidad de disipación de energía. Todos los arquetipos estudiados en esta investigación mostraron que las curvas de histéresis presentan pinching y degradación de rigidez, pero agregando pernos y soldadura se puede disminuir dicha degradación. Gusella *et al.* (2018) estudiaron cuatro tipos diferentes de juntas de bastidores industriales sometidas a ensayos monotónicos y cíclicos. Los arquetipos ensayados en este estudio variaron el número de lengüetas, el grosor relativo del montante y el conector del extremo de la viga. Dentro de los resultados más relevantes de este estudio se obtuvo que: 1) los conectores con conexiones soldadas de doble cara la soldadura es el elemento más débil, mientras que, para conexiones con soldadura en todo el contorno, la falla se da por colapso de las pestañas; 2) todas las curvas de histéresis se caracterizan por presentar pinching, con reducción en la energía disipada; y 3) al agregar pernos adicionales a la conexión, la energía disipada y la ductilidad de la unión aumentan.

En este estudio se presentan ensayos de conexión viga-columna de racks de almacenamiento industrial de dos arquetipos diferentes. Los arquetipos se diferencian entre sí por la cantidad de torque inicial que se les da a los pernos. Mediante los resultados obtenidos en esta investigación se puede obtener la energía disipada, rigidez elástica y rigidez inelástica de las conexiones. Cuyos parámetros pueden ser incluidos en la calibración de modelos numéricos de racks de almacenamiento industrial.

Materiales y métodos

Tipos de conexión

En la Figura 1 se muestra el tipo de conexión estudiada en esta investigación, la cual corresponde a una conexión típica de racks de almacenamiento industrial de tipo selectivo usados en Chile. Como se puede apreciar en la Figura 1, la viga en su extremo que conecta con la columna tiene un trozo de perfil tipo L unido mediante soldadura en todo su contorno. El trozo de perfil tipo L contiene cuatro perforaciones en la cara que es perpendicular a la

dirección más larga de la viga y dos en la cara interior que está paralela a la dirección corta. Estas perforaciones se adecúan de acuerdo con el distanciamiento de los orificios de la columna. En el caso de este estudio solo se estudió la conexión con pernos como lo mostrado en la Figura 1, es decir, con pernos en la cara exterior. La conexión ensayada está compuesta por una viga de sección transversal rectangular hueca, mostrada en la Figura 2(a), la cual está compuesta por dos perfiles tipo C unidos mediante puntos de soldadura a lo largo de su longitud. Por otro lado, la columna corresponde a un perfil de sección abierta tipo pilar con las dimensiones detalladas en la Figura 2(b). Todas las vigas ensayadas tienen un largo igual a 1.72 m, mientras que la columna posee un largo de 1.48 m.



Figura 1: Tipo de conexión estudiada.

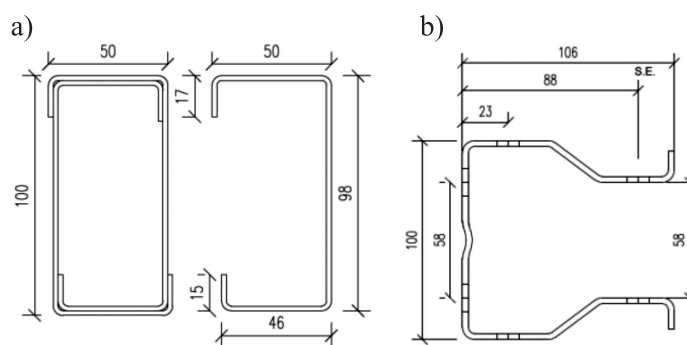


Figura 2: Detalle de la sección transversal de los perfiles: (a) viga 100 x 50 x 2 mm y (b) perfil tipo pilar 100 x 106 x 3 mm

Los tipos de conexión estudiadas se presentan en la Tabla 1, las cuales tienen en común la sección transversal de la viga (Figura 2(a)) y columna (Figura 2(b)), se diferencian entre sí en la cantidad de pretensión que se le da a los cuatro

pernos que unen la viga con la columna. La conexión tipo A se asocia a una pretensión inicial de 61 Nm (45 lb-ft), mientras que la tipo B tiene una pretensión de 108.5 Nm (80 lb-ft). Cada arquetipo, es decir, las conexiones tipo A y B, se ensayaron dos veces cada una, reemplazando la viga por una indemne después de cada ensayo. Por otro lado, la columna se mantuvo para dos ensayos consecutivos, reemplazándola al momento de pasar de la conexión tipo A a la B.

Tabla 1: Tipos de conexiones estudiadas.

Test	Tipo conexión	Torque, Nm (lb-ft)
1	A	61.0 (45)
2	A	61.0 (45)
3	B	108.5 (80)
4	B	105.5 (80)

Para el caso de la conexión tipo A, el torque de pretensión fue suministrado por la llave de impacto inalámbrica mostrada en la Figura 3(a), lo cual corresponde a la práctica común a la hora de realizar el montaje de rack de almacenamiento industrial. Por otro lado, la pretensión de la conexión tipo B se realizó primeramente con la llave de impacto antes mencionada y, luego se procedió a la utilización de la llave de torque manual presentada en la Figura 3(b), la cual tiene la capacidad de regular el torque que se requiera.



Figura 3: Tipos de llaves utilizadas para la pretensión de los pernos: (a) llave de impacto inalámbrica y (b) llave de torque manual.

Diseño experimental y protocolo de carga

Se diseñó el montaje experimental para la realización de estos ensayos, dicho montaje se muestra de forma esquemática en la Figura 4(a) y en forma fotográfica en la Figura 4(b). Para este diseño experimental se utilizaron tres piezas rígidas tipo 1 (2 azules y 1 naranja), las cuales se adosan al muro de reacción del Laboratorio de

Estructuras UCSC. En cada una de las piezas tipo 1 de color azul se apernó una pieza tipo 2, las cuales permiten conectar la columna de forma articulada. En el extremo de la viga se instaló un actuador electromecánico controlado por computadora y accionado por un motor stepper de la marca Longs Motor modelo Nema34 HST9805-37b2 con capacidad de empuje de hasta 3 ton y recorrido de 300 mm. Este se ancló mediante pernos a la pieza tipo 1 de color naranja, la cual a su vez se fijó al muro de reacción de hormigón armado considerado indeformable. Junto al extremo del actuador se fijó una celda de carga y sobre esta una pieza tipo 3, la cual se conecta con la pieza tipo 4 que se fija al extremo de la viga. Entre las piezas tipo 3 y 4 se forma una conexión articulada, lo cual permite que la transferencia de la carga generada por el actuador sobre la viga sea solo de fuerza de corte. Para restringir el desplazamiento fuera del plano del actuador, se instaló una pieza de restricción, la cual se fabricó y se fijó al muro de reacción mediante pernos.

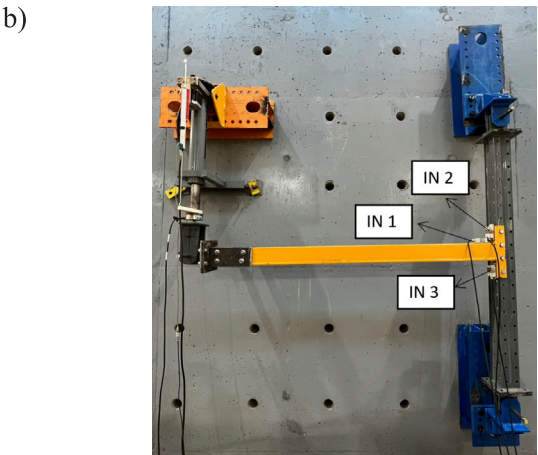
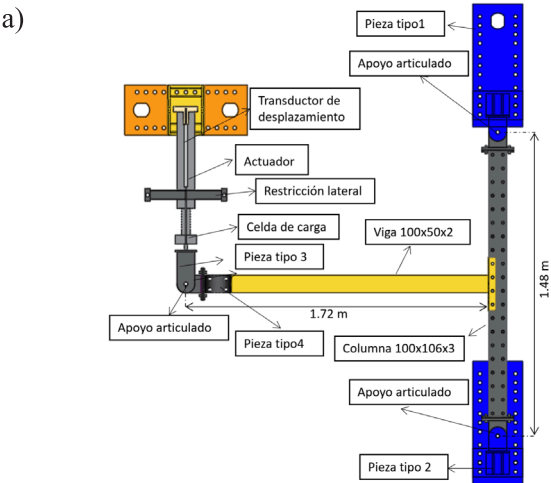
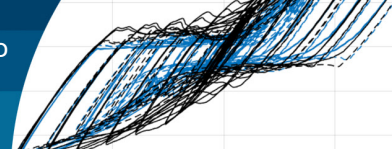


Figura 4: Montaje experimental: (a) descripción del montaje experimental y (b) vista frontal del montaje experimental realizado.



El protocolo de carga utilizado en este estudio se basa en el protocolo de carga para ensayos cíclicos de conexiones viga-columna del código AISC341 (2022), cap. K. Este se muestra de forma gráfica en las Figuras 5(a) y 5(b), y consiste en ciclos de tipo serrucho con distintos niveles de rotación impuesta. Dado que el actuador utilizado es de desplazamiento controlado, a partir de la rotación deseada θ y la longitud de la viga L , mediante la ecuación (1) se obtiene el desplazamiento u necesario para cumplir con dichos niveles de rotación logrando el protocolo de carga presentado en la Figura 5(b). Los niveles de rotación, desplazamiento y el número de ciclos con los cuales está constituido el protocolo de carga se establecen en la Tabla 2. Cabe destacar que este tipo de ensayos se deben realizar de forma cuasi-estática, es decir, a baja velocidad. Debido a esto, es que la secuencia de movimiento se aplicó a una velocidad de 1 mm/s.

$$u = \theta L \quad (1)$$

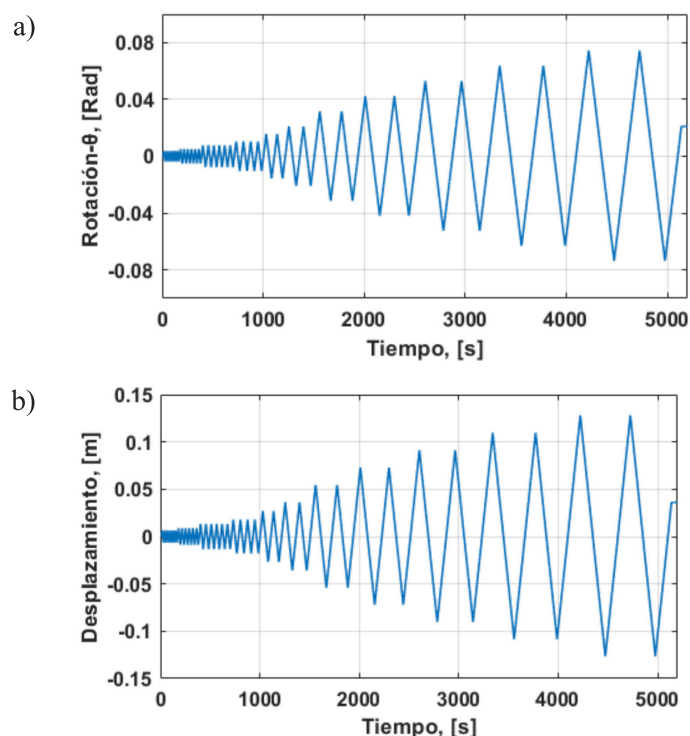


Figura 5: Protocolo de carga, (a) rotación y (b) desplazamiento

Instrumentación y procesamiento de datos

Para la instrumentación de estos ensayos se utilizaron los sensores y distribución presentadas en el montaje experimental de la Figura 4(a) y 4(b). Como se pudo apreciar

Tabla 2: Datos del protocolo de carga

Rotación, rad	Amplitud, mm	Nº de ciclos
0.00375	6.45	6
0.0050	8.6	6
0.0075	12.9	6
0.01	17.2	4
0.015	25.8	2
0.02	34.4	2
0.03	51.6	2
0.04	68.8	2
0.05	103.2	2
0.06	120.4	2
0.07	137.6	2

en estas figuras, en el extremo del eje móvil del actuador se instaló una celda de carga de la marca Honeywell, modelo IEEE P145.1, con capacidad de medición de hasta 900 kg (2000 lb). Esta celda permite medir la carga efectiva aplicada por el actuador al extremo de la viga. Entre el extremo del eje móvil del actuador y el cuerpo de éste se instaló un transductor de desplazamiento de la marca Accuracy, modelo KTR-300, con recorrido de 300 mm, el cual permite medir el desplazamiento efectivamente impuesto a la viga. Adicionalmente, se instalaron tres inclinómetros de marca BWSENSING, modelo BWK218, de los cuales dos se instalaron en el perfil tipo L y el tercero en la viga.

Para la adquisición de datos, el transductor de desplazamiento y los inclinómetros se conectaron a un módulo NI 9205 y la celda de carga a un módulo NI 9237. Estos a su vez están conectados a un chasis cDAQ-9178, el que transmite la información digitalizada a un computador con una tasa de muestreo de 2048 Hz. El computador recibe dicha información mediante un programa de adquisición de datos desarrollado en LabVIEW, almacenándola como series de tiempo de datos en un archivo con extensión *.lvm. Luego de obtener las mediciones de cada uno de los ensayos, se realiza una rutina en el software MATLAB para procesar los datos. En dicho código se usará un filtro de frecuencias altas (para disminuir el ruido detectado por los instrumentos de medición).

Resultados y análisis

En las Figuras 6(a) y 6(b) se muestran los resultados de las curvas momento-rotación de los ensayos experimentales

realizados siguiendo la metodología descrita en el apartado 2. Las curvas de la Figura 6(a) de color azul muestran los resultados de la conexión tipo A y el tipo de línea denota si corresponde a la prueba 1 ó 2. Por otro lado, la Figura 6(b) de color negro muestra las curvas de los ensayos realizados a la conexión tipo B y de la misma forma que para la conexión tipo A, el tipo de línea muestra si es la prueba 3 ó 4. Con respecto a estos resultados se puede decir que, ambos tipos de conexiones entre las dos repeticiones, muestran una curva que es característica de acuerdo a las condiciones que se les impuso, es decir, la pretensión inicial. También se puede decir que la conexión tipo B presenta una mayor capacidad de disipación de energía y menor pinching, lo cual se puede ver de mejor manera mediante la Figura 7, en donde se superponen las curvas de los cuatro ensayos realizados. Las curvas de las conexiones tipo A y B muestran degradación de rigidez y resistencia sólo en el cuadrante positivo de la gráfica, para ciclos de amplitud mayor a 0.04 rad.

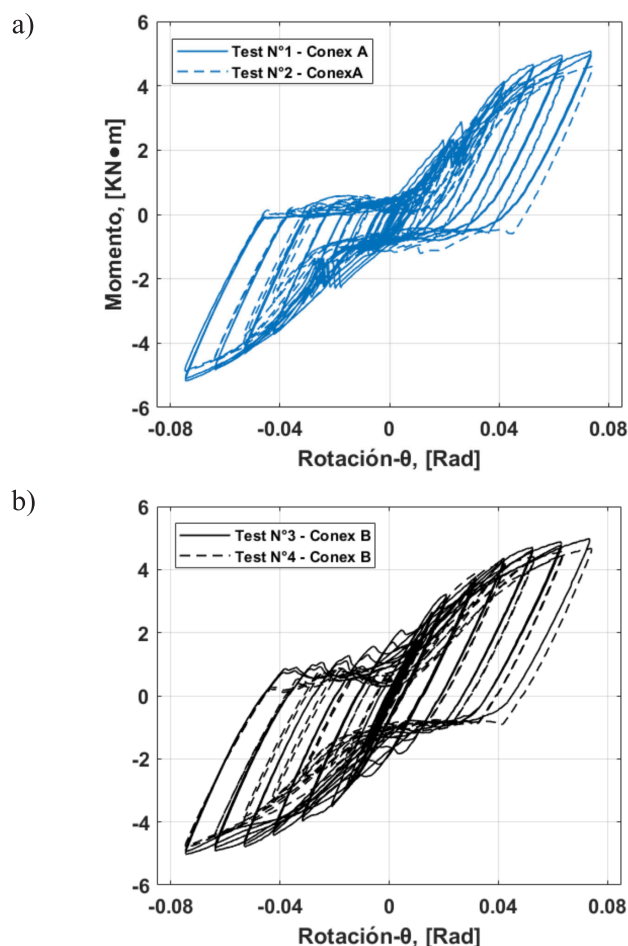


Figura 6: Curvas momento-rotación, (a) conexión tipo A y (b) conexión tipo B.

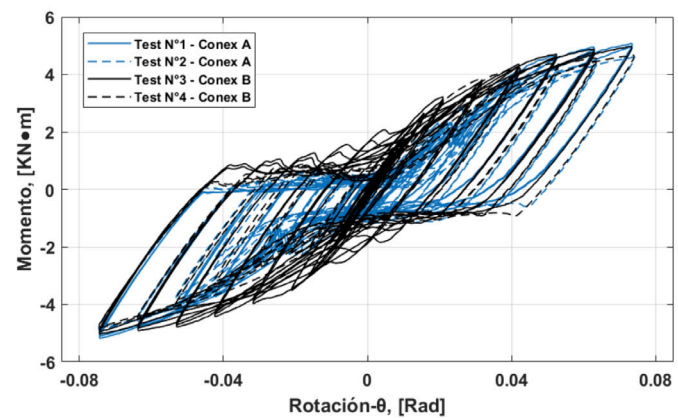
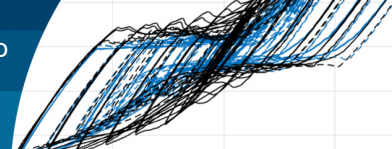


Figura 7: Curvas momento-rotación de los cuatro ensayos realizados.

La Figura 8 muestra los resultados de la energía disipada promedio por cada nivel de rotación, para los dos ensayos realizados a la conexión tipo A y B. La energía disipada corresponde al área encerrada entre la curva de carga-descarga y se determinó utilizando el comando trapz (x,y) en el software Matlab. Este comando realiza una integración numérica utilizando la regla de Simpson, que evalúa el área entre dos puntos discretos considerando una línea recta entre ellos. En esta figura se puede apreciar que la energía disipada promedio de todas las pruebas aumenta significativamente de acuerdo al nivel de rotación que se encuentre. Lo anterior se debe a que, para niveles bajos de rotación la energía disipada por la conexión está entregada por la fricción de los pernos con la perforación de la columna, mientras que para niveles altos de rotación esta energía disipada es proporcionada por la fricción más la plastificación de la conexión. Las dos pruebas de la conexión tipo A muestran que la energía disipada promedio es similar en ambas repeticiones, excepto para el nivel de rotación de 0.07 rad. Por otro lado, las dos pruebas de la conexión tipo B muestran que sólo para niveles de hasta 0.03 rad la energía disipada entre ambos ensayos son similares y que desde ese punto en adelante existe una notoria diferencia. También, en esta figura se puede apreciar que para niveles de rotación menores a 0.02 rad, la energía disipada por la conexión tipo A es mayor que la conexión tipo B. Lo anterior se asocia a la pretensión que tienen ambos tipos de conexiones, ya que la fuerza de fricción depende de la fuerza normal que es proporcional a la pretensión de los pernos, y del coeficiente de fricción que exista entre las superficies. Por lo tanto, al aumentar



la pretensión en la conexión tipo B, también se aumenta la fuerza normal y, por ende la fuerza de fricción, logrando que se necesite una mayor fuerza para que los pernos se deslicen sobre la perforación de la columna.

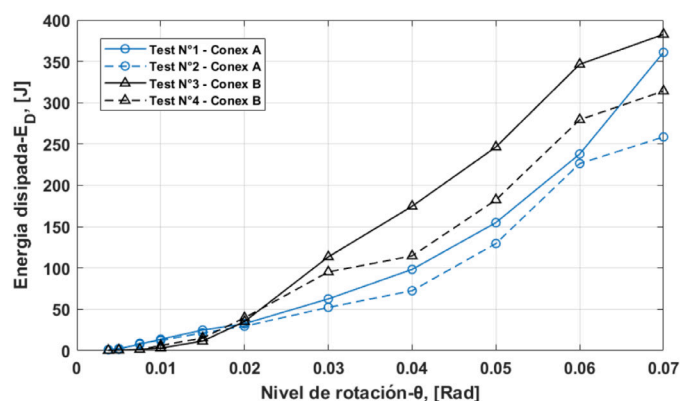


Figura 8: Resultados de la energía disipada promedio por cada nivel de rotación.

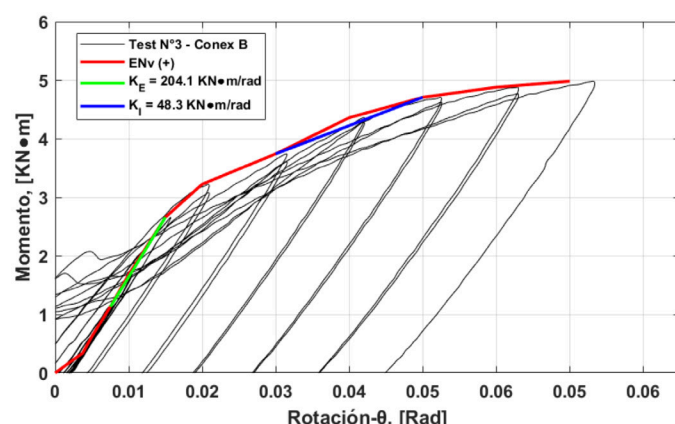


Figura 9: Envoltorio con sus respectivos valores de rigidez elástica e inelástica.

En la Figura 9 se presenta un ejemplo de la curva envolvente para el primer ensayo de la conexión tipo B. Para obtener esta curva se calcularon los máximos valores del momento de acuerdo con cada nivel de rotación del protocolo de carga. A partir de esta envolvente se obtuvo la rigidez de la rama elástica e inelástica de todos los ensayos realizados, cuyos resultados se muestran en la Tabla 3. Estas rigideces se obtuvieron experimentalmente como las pendientes de las ecuaciones de la recta ajustada por mínimos cuadrados a los puntos de la rama elástica y de post fluencia de cada curva envolvente. Con respecto a estos resultados se puede decir que la rigidez elástica de la conexión tipo B presenta un aumento de alrededor de un 45 % con respecto

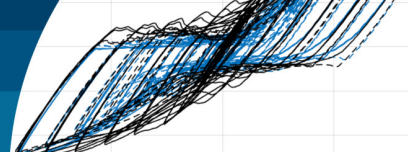
al tipo A. Mientras que para la rigidez inelástica no existe un aumento o disminución representativo que se pueda asociar a estas conexiones. Adicionalmente, en esta tabla se presenta la energía disipada acumulada durante todo el protocolo de carga de los cuatro ensayos, lo cual confirma los resultados presentados en la Figuras 6, 7 y 8 sobre el aumento de la energía disipada al pasar de una conexión tipo A, a una tipo B.

Tabla 3: Resultados de rigidez elástica, inelástica y energía disipada acumulada de todos los ensayos.

Test	Tipo conexión	Energía disipada acumulada E_{D-AC} , J	Rigidez elástica K_E , kNm/rad	Rigidez inelástica K_I , kNm/rad
1	A	997.0	105.8	52.5
2	A	814.1	113.5	32.6
3	B	1316.0	204.1	48.3
4	B	1049.0	194.8	35.0

Conclusiones

Se realizaron ensayos experimentales de carga cíclica cuasi-estática controlada por desplazamiento a cuatro especímenes de conexiones viga-columna de racks de almacenamiento industrial. Se utilizó un protocolo de carga basado en deformación impuesta en el extremo libre de la viga con amplitudes crecientes que van desde 6.45 mm hasta 137.5 mm. Las conexiones se materializan con cuatro pernos, dos de las cuales tienen un torque de apriete de 61 Nm y las otras dos con 108.5 Nm. Los resultados mostraron que a mayor torque de apriete de los pernos, mayor es la energía disipada en cada ciclo carga-descarga, y menor es el efecto de pinching en la conexión. La energía disipada resultó ser casi nula en los ciclos de pequeña amplitud de deformación impuesta, creciendo conforme aumenta dicha amplitud. La capacidad de disipación de energía se incrementó aproximadamente de manera lineal entre 0.01 y 0.03 rad de amplitud de rotación en la conexión. Sin embargo, superada la amplitud de 0.03 rad se registra un incremento no lineal en la tasa de disipación de energía con el incremento de la amplitud de deformación impuesta. Lo anterior permite inferir que, para deformaciones pequeñas no se ha superado el momento debido al roce entre las partes apernada y los elementos trabajan en rango lineal, por lo que no hay disipación de energía. Superado el umbral de 0.01 rad de amplitud de rotación se vence



el roce entre las partes apernadas existiendo disipación de energía por roce, con elementos trabajando en rango lineal. Pasada la amplitud de rotación de 0.03 rad los elementos constituyentes comienzan a trabajar en rango no lineal, existe aplastamiento de las perforaciones, pandeo y fluencia de los elementos que conforman la viga; lo anterior se suma al trabajo del roce incrementando la capacidad de disipación de energía de la conexión. Finalmente, las conexiones con torque de apriete de pernos de 61 Nm y las de 108 Nm alcanzaron resistencias máximas similares al final de los ciclos de carga con amplitud de deformación mayor a 0.03 rad. Esto se debe a que la transferencia de carga entre viga y columna ocurre por aplastamiento entre pernos y perforaciones. Por lo tanto, el torque de apriete y, por ende, el momento debido al roce, ya no son relevantes en la transferencia de carga.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la empresa INGERACK por proporcionar los racks ensayados, y a su gerente Ingeniero Alexis Aguilera, así como al ingeniero de proyectos de la empresa, Sr. Óscar Álvarez, por la retroalimentación proporcionada.

Referencias

- AISC341 (2022). Seismic provisions for structural steel buildings. American Institute of Steel Construction. Chicago IL, USA
- Bernuzzi, C. and Castiglioni, C.A. (2001). Experimental analysis on the cyclic behaviour of beam-to-column joints in steel storage pallet racks. *Thin-Walled Structures* **39**(10), 841-859
- Chen, C.K., Scholl, R.E. and Blume, J.A. (1980). Earthquake simulation tests of industrial steel storage racks. *Seventh World Conference on Earthquake Engineering*, Istanbul, Turkey, 379-386
- Clifton, C., Bruneau, M., MacRae, G., Leon, R. and Fussell, A. (2011). Steel structures damage from the Christchurch earthquake series of 2010 and 2011. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering* **44**(4), 297-318
- Crosier, J., Hannah, M. and Mukai, D. (2010). Damage to steel storage racks in industrial buildings in the Darfield earthquake. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering* **43**(4), 425-428
- Dai, L., Zhao, X. and Rasmussen, K.J. (2018). Cyclic performance of steel storage rack beam-to-upright bolted connections. *Journal of Constructional Steel Research* **148**, 28-48
- Filiatrault, A., Bachman, R.E. and Mahoney, M.G. (2006). Performance-based seismic design of pallet-type steel storage racks. *Earthquake Spectra* **22**(1), 47-64
- Gusella, F., Lavacchini, G. and Orlando, M. (2018). Monotonic and cyclic tests on beam-column joints of industrial pallet racks. *Journal of Constructional Steel Research* **140**, 92-107
- Núñez, E., Aguayo, C. and Mata, R. (2023). Incremental dynamic analysis of steel storage racks subjected to Chilean earthquakes. *Thin-Walled Structures* **182**, 110288
- Perrone, D., Calvi, P.M., Nascimbene, R., Fischer, E.C. and Magliulo, G. (2019). Seismic performance of non-structural elements during the 2016 Central Italy earthquake. *Bulletin of Earthquake Engineering* **17**(10), 5655-5677
- Tagliaferro, B., Montuori, R. and Castellano, M.G. (2021). Shake table testing and numerical modelling of a steel pallet racking structure with a seismic isolation system. *Thin-Walled Structures* **164**, 107924
- Teh, L.H., Hancock, G.J. and Clarke, M.J. (2004). Analysis and design of double-sided high-rise steel pallet rack frames. *Journal of Structural Engineering* **130**(7), 1011-1021
- Uma, S.R. and Beattie, G. (2011). Observed performance of industrial pallet rack storage systems in the Canterbury earthquakes. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering* **44**(4), 388-393
- Yin, L., Tang, G., Zhang, M., Wang, B. and Feng, B. (2016). Monotonic and cyclic response of speed-lock connections with bolts in storage racks. *Engineering Structures* **116**, 40-55
- Zhao, X., Dai, L. and Rasmussen, K.J. (2018). Hysteretic behaviour of steel storage rack beam-to-upright boltless connections. *Journal of Constructional Steel Research* **144**, 81-105