

ESTUDIO ANALÍTICO DE CONEXIONES A MOMENTO EN ESTRUCTURAS DE ALMACENAMIENTO INDUSTRIAL TIPO RACK EMPLEANDO EL MÉTODO DE LAS COMPONENTES

Diego Molina Peñailillo¹, Eduardo Núñez Castellanos² y Claudio Oyarzo Vera³

RESUMEN

La presente investigación está basada en el estudio analítico de conexiones rack, utilizando el método de las componentes, con el objetivo de cuantificar analíticamente el momento último y la rigidez elástica rotacional de diferentes tipos de conexiones rack. Se seleccionaron 5 tipos de conexiones, variando cantidad de pernos y longitud de soldadura entre viga y placa extrema. Posteriormente, se determinaron los componentes que conforman la conexión.

Realizado esto, se escogen las dimensiones y propiedades de los distintos materiales y se procede a cuantificar la resistencia y rigidez de cada uno de los componentes que actúan sobre la conexión. Una vez obtenidas las resistencias y rigideces de cada elemento, se procede a ensamblar la resistencia de la conexión, escogiendo el componente más débil que condiciona la unión. Con esto, se puede determinar el momento último antes de la falla. Luego, de igual forma que en la resistencia, se procede a ensamblar la rigidez de los distintos componentes para determinar la rigidez elástica rotacional de la conexión.

Finalmente, una vez obtenido el momento último y la rigidez elástica rotacional de la conexión, se procede a comparar con datos de pruebas monotónicas y pruebas cíclicas, verificando la aproximación del método con los resultados experimentales.

PALABRAS CLAVES: conexión, método de las componentes, resistencia, rigidez, momento último, rigidez elástica rotacional.

ABSTRACT

The present investigation is based on the analytical study of rack connections, using the component method, with the objective of analytically quantifying the last moment and the rotational elastic stiffness of different types of rack connections. 5 types of connections were selected, varying the number of bolts and weld length between beam and end plate. Subsequently, the components that make up the connection were determined.

Once this is done, the dimensions and properties of the different materials are chosen and the strength and stiffness of each of the components acting on the connection are quantified. Once the resistances and stiffnesses of each element are obtained, the resistance of the connection is assembled, choosing the weakest component that determines the union. With this, the last moment before the failure can be determined. Then, as in the case of resistance, the stiffness of the different components is assembled to determine the rotational elastic stiffness of the connection.

Finally, once the last moment and the rotational elastic stiffness of the connection are obtained, we proceed to compare with monotonous test and cyclic test data, verifying the approximation of the method with the experimental results.

KEYWORDS: connection, component method, resistance, stiffness, last moment, rotational elastic stiffness.

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

² Profesor Guía, D. de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, enunez@ucsc.cl

³ Profesor Informante, D. de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, coyarzov@ucsc.cl

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años el mercado industrial ha aumentado en gran manera, demandando a su vez nuevas formas de almacenamiento para sus productos. Una de las estructuras más utilizadas en las grandes industrias son los racks, cuya función es asegurar que los artículos se encuentren en resguardo, fuera del alcance de agentes que pudieran estropearlos.

Los racks son estructuras de acero utilizadas para el almacenamiento industrial, las cuales son angostas en una de sus direcciones en comparación con la otra que es mucho más larga. Al ser estructuras esbeltas, facilitan la operación de los productos, ya que, se generan pasillos donde se puede transitar libre y cómodamente (ver Figura 1).

Estas estructuras surgen como una necesidad en las empresas industriales, que necesitaban un mayor espacio, pero a su vez, tener los productos cerca de ellos para una muestra rápida a los clientes.

Los racks industriales pueden alcanzar alturas superiores a 10 metros, que permiten a través de sus diferentes niveles, almacenar una gran cantidad de productos en un espacio reducido. Son estructuras esbeltas, con una gran carga vertical y lateralmente poco resistentes. Es por ello, que su diseño está basado en resistir un momento flector alrededor de su eje fuerte, que es transmitido a una conexión viga-columna.

Una de las mayores incógnitas que se tiene a la hora de utilizar los racks, es saber la capacidad a flexión que posee la conexión, ya que, es la conexión misma la que se encarga de resistir la carga vertical. Si bien se pueden utilizar softwares estructurales para conocer la resistencia a flexión de la conexión, esto puede resultar muchas veces costoso e inhóspito para quienes no se perfeccionen en la utilización de los softwares. Sin embargo, existe un método que permite cuantificar de manera analítica el momento resistente último y la rigidez elástica rotacional de la conexión de rack.

Esto último es una gran ventaja, ya que, realizando cálculos analíticos se puede determinar la resistencia última a flexión de la conexión, conociendo el escenario donde se encontrará la estructura, de cara a las sollicitaciones de cargas. Esto conlleva a predecir el comportamiento de la estructura.

El método que se emplea para determinar la capacidad a flexión y rigidez elástica rotacional de la conexión rack, se denomina “Método de las componentes”. Si bien hay poca información, el Eurocódigo 3 [2], indica de qué manera se debe emplear este método.

Investigaciones previas tales como [3], indican cómo estimar el momento último y la rigidez elástica rotacional de la conexión rack y [4], es utilizada para la obtención de datos y posteriormente para la comparación con los resultados teóricos.

El objetivo general de esta investigación es estudiar el comportamiento de conexiones rack, utilizando el método de las componentes. Dentro del alcance de la investigación no está contemplado hacer ensayos experimentales ni estudios numéricos.

A continuación, se da a conocer el mecanismo utilizado para determinar la resistencia última y la rigidez elástica rotacional de las conexiones racks.

2. METODOLOGÍA

El método de las componentes permite cuantificar de manera analítica el momento resistente último y la rigidez elástica rotacional de una conexión viga-columna.

El método de los componentes divide la unión en una serie de componentes básicos individuales, cada uno de los cuales posee su propia resistencia y rigidez a tracción, compresión o cortante, siendo posible predecir la respuesta del nudo a partir del conocimiento de las propiedades mecánicas y geométricas de estos elementos básicos [1] y [5].

Se entiende por componente, a cualquier elemento que influye en las propiedades estructurales de la conexión.

Los pasos a seguir para determinar el momento resistente último y la rigidez elástica rotacional de la conexión rack, son los siguientes:

- Definir el tipo de conexión.
- Definir geometría de la conexión.
- Identificar los componentes de la conexión.
- Definir propiedades de los materiales.
- Determinar la resistencia (F) y la rigidez (k) de cada uno de los componentes.
- Determinar el momento resistente último y la rigidez elástica rotacional de la conexión, a partir del ensamblaje de los componentes.

Una vez obtenido el momento resistente último y la rigidez elástica rotacional de la conexión, se compara con datos experimentales.

2.1 Tipo de conexión

El primer paso es definir el tipo de conexión a analizar. A continuación, en la Figura 1 se puede apreciar la estructura de almacenamiento rack, la cual es utilizada para este estudio. También se puede observar el tipo de conexión que se analiza.

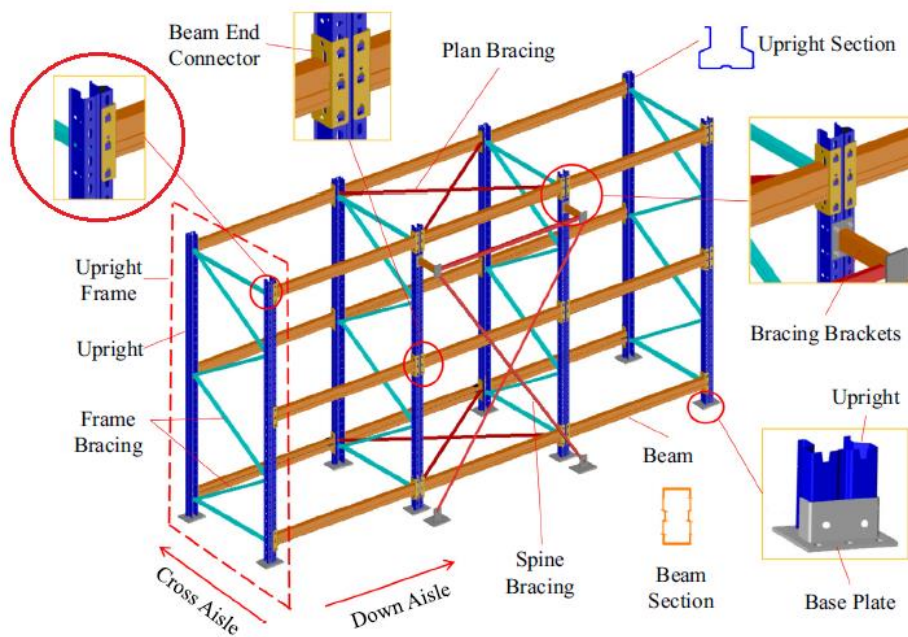


Figura 1: Modelo de rack y conexión.

Fuente: [4]

Para poder emplear el método de las componentes se escogen 5 tipos diferentes de conexiones (ver Figura 2), las cuales se analizan por separado.

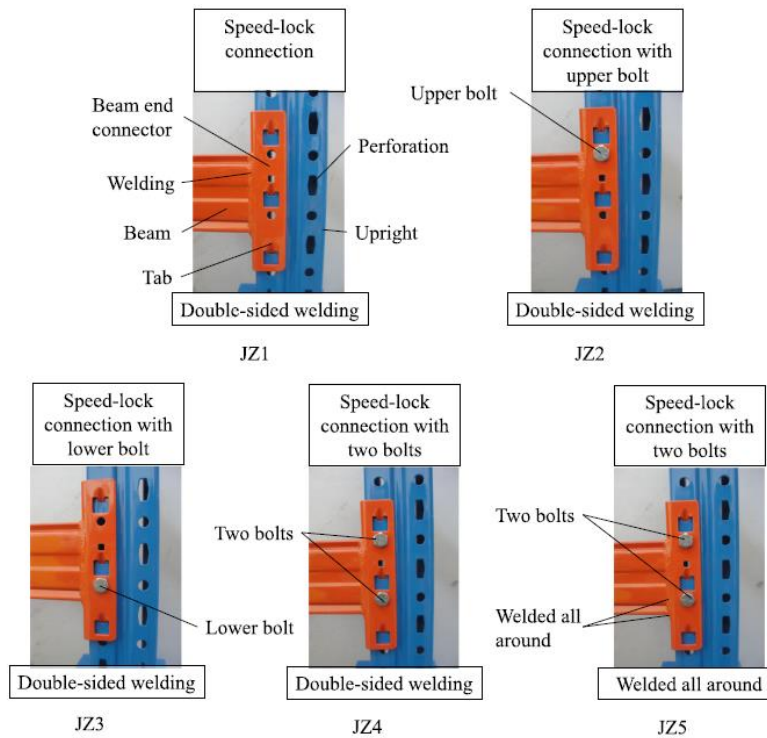


Figura 2: Tipos de conexiones.

Fuente: [4]

2.2 Geometría de la conexión

Los 5 tipos de conexiones (JZ1, JZ2, JZ3, JZ4 y JZ5) están constituidos por los mismos elementos, de igual dimensiones en todos los casos. Para la viga, se utiliza un perfil de sección K100x50x1,5 mm. Para la columna, se utiliza un perfil de sección N90x70x2,0 mm. Finalmente, para el conector (elemento que une viga y columna) se utiliza un perfil de 3,5 mm de espesor (ver Figura 3).

Además, cabe destacar que, la soldadura que une la viga con el conector, varía en los distintos tipos de conexiones. En las conexiones JZ1, JZ2, JZ3 y JZ4 la viga está soldada al conector solo en las caras laterales, mientras en la conexión JZ5, la viga está soldada al conector en todas sus caras (ver Figura 4).

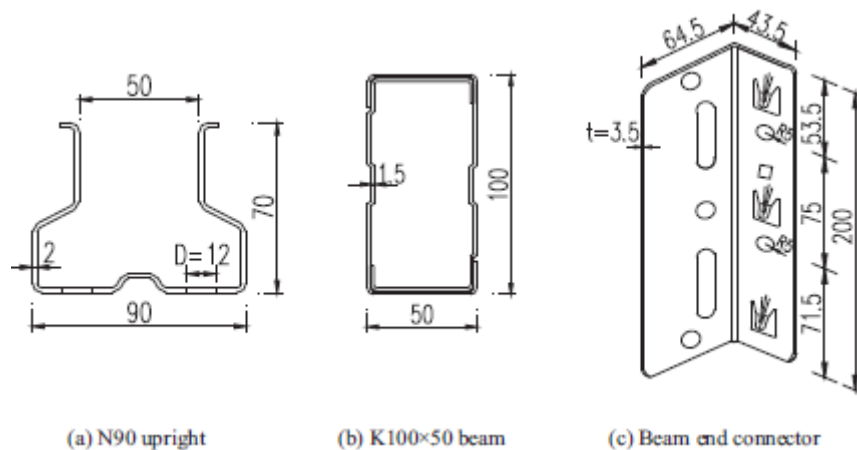


Figura 3: Dimensiones de elementos en la conexión (mm).

Fuente: [4]

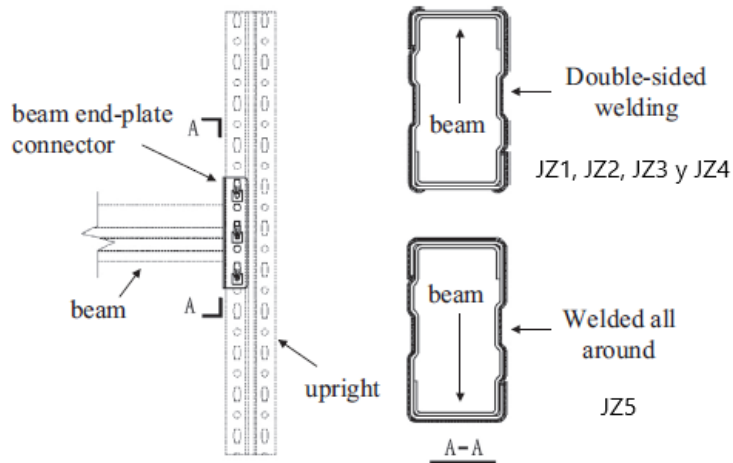


Figura 4: Modo de conexión y tipos de soldadura.
 Fuente: [4]

2.3 Componentes de la conexión

Los componentes son aquellos elementos que de una u otra forma influyen en las propiedades estructurales de la conexión. A continuación, en la Figura 5 se puede apreciar los componentes que influyen en las distintas conexiones.

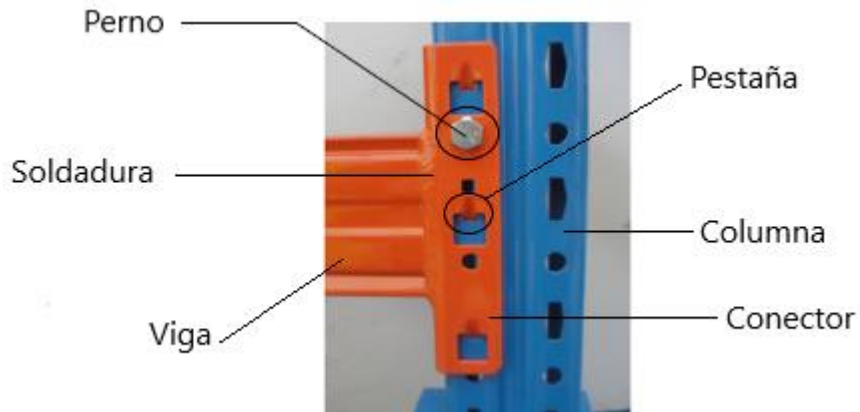


Figura 5: Componentes de la conexión.
 Fuente: [4]

Dado que las 5 conexiones son diferentes, en la Tabla 1 se observa un resumen de los distintos componentes que actúan en ellas.

Tabla 1: Componentes que actúan en las diferentes conexiones.

Conexión	Pernos	Soldadura	Viga	Columna	Pestañas	Conector
JZ1	No	2 lados	K100x50x1,5mm	N90x70x2mm	3	3,5 mm
JZ2	1 (superior)	2 lados	K100x50x1,5mm	N90x70x2mm	3	3,5 mm
JZ3	1 (inferior)	2 lados	K100x50x1,5mm	N90x70x2mm	3	3,5 mm
JZ4	2	2 lados	K100x50x1,5mm	N90x70x2mm	3	3,5 mm
JZ5	2	4 lados	K100x50x1,5mm	N90x70x2mm	3	3,5 mm

Fuente: Elaboración propia.

2.4 Propiedades de los materiales y los componentes

Las propiedades de los componentes que actúan en la conexión, se pueden detallar en la Tabla 2. Estas propiedades son utilizadas para determinar la resistencia y rigidez de cada elemento.

Tabla 2: Propiedades de los componentes.

Componente	f_y (N/mm ²)	f_u (N/mm ²)	E (N/mm ²)
Viga	261	363	196.000
Columna	251	363	196.000
Conector	247	358	196.000
Pestañas	247	358	196.000
Pernos	-	600	-
Soldadura	422	-	-

Fuente: Elaboración propia.

Nota1: Se utilizan pernos tipo M10, grado 6,8 y con un área transversal de 58mm².

Nota2: El tipo de soldadura utilizada es electrodo E6011.

2.5 Resistencia y rigidez de cada componente

A continuación, se detalla el mecanismo utilizado para determinar la resistencia, ya sea a flexión, compresión, tracción o corte de cada elemento y la rigidez axial de estos. La metodología y ecuaciones utilizada provienen de [3].

2.5.1 Soldadura

La soldadura es el componente que conecta la sección del extremo de la viga con el conector (ver Figura 6). Solo se considera en la evaluación de la resistencia de la conexión y se emplea mediante un modelo plástico rígido con una resistencia (F_{wel}) que puede ser estimada mediante la ecuación (1).

$$F_{wel} = \frac{M_{max,b}}{h_b} = \frac{J_w * f_{y,w}}{h_b * y_w} \quad (1)$$

Donde:

$M_{max,b}$ es el momento máximo transmitido por la viga.

h_b es la altura de la viga.

y_w es la distancia desde la fibra inferior de la soldadura hasta el centroide de la misma.

$f_{y,w}$ es la tensión de tracción de la soldadura.

J_w es el momento de inercia de la soldadura.

El momento de inercia de la soldadura queda definido como:

$$J_w = 2J_{wa} \text{ (para conexiones JZ1, JZ2, JZ3, JZ4).}$$

$$J_w = 2J_{wa} + 2J_{wb} \text{ (para conexión JZ5).}$$

Con:

$$J_{wa} = \frac{1}{12} a_{wa} h_b^{*3} \quad \text{y} \quad J_{wb} = \frac{1}{12} a_{wb}^3 b_b^*$$

Donde:

a_{wa} es el espesor efectivo de soldaduras laterales.

a_{wb} es el espesor efectivo de soldadura superior e inferior.

h_b es la altura de la viga.

b_b es el ancho de la viga.

$h_b^* = h_b - 2\sqrt{2}a_{wa}$ es la altura efectiva de soldadura en la viga.

$b_b^* = b_b - 2\sqrt{2}a_{wb}$ es el ancho efectivo de soldadura en la viga.

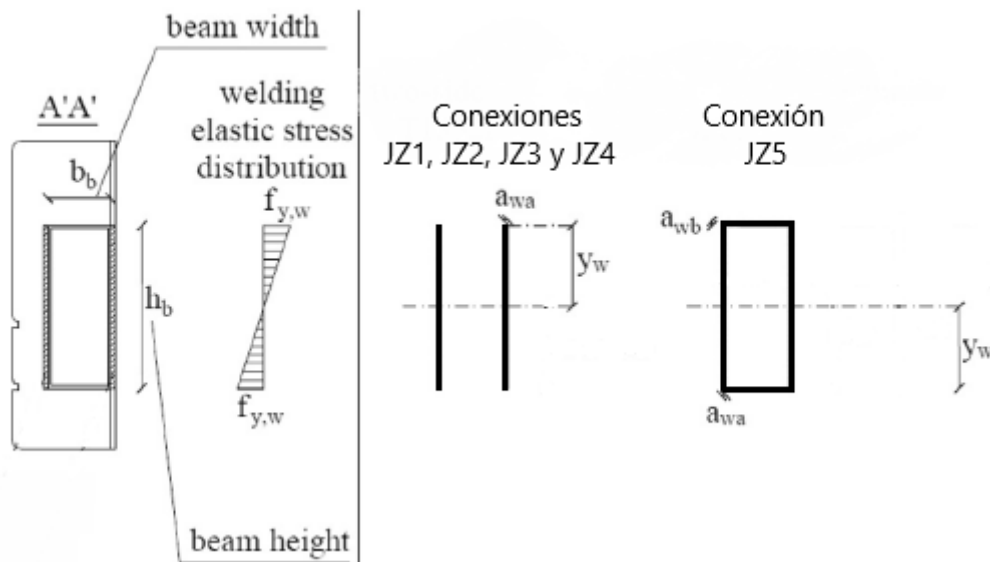


Figura 6: Modelo de soldadura en conexiones.

Fuente: [3]

2.5.2 Viga en tracción y compresión

Para evaluar la resistencia de la conexión, la viga debe ser considerada bajo los efectos de tracción y compresión. Se puede determinar la resistencia de la viga en tracción ($F_{bf,t}$) y compresión ($F_{bf,c}$) mediante la ecuación (2).

$$F_{bf,t} = F_{bf,c} = b_{eff,b} * t_b * f_{y,b} \quad (2)$$

Donde:

t_b es el espesor de la viga.

$f_{y,b}$ es la tensión de fluencia de la viga.

$b_{eff,b}$ es el ancho de la viga.

2.5.3 Conector en tracción y compresión

De acuerdo con [2], la resistencia del conector a tracción ($F_{cow,t}$) y compresión ($F_{cow,c}$) puede estimarse mediante la ecuación (3).

$$F_{cow,t} = F_{cow,c} = \omega_{co} * b_{eff,co} * t_{co} * f_{y,co} \quad (3)$$

Donde:

$f_{y,co}$ es el límite elástico del conector.

ω_{co} es el factor de reducción del conector que explica interacción con el corte [2].

t_{co} es el espesor del conector.

$b_{eff,co}$ es el ancho efectivo del conector que explica la propagación de las tensiones transmitidas por la viga asumiendo la tangente del ángulo de dispersión 1:2,5.

Para determinar la rigidez axial del conector tanto en tracción ($K_{cow,t}$) y compresión ($K_{cow,c}$), se utiliza la ecuación (4), suponiendo un ángulo de 45° para la distribución de la carga (ver Figura 7).

$$K_{cow,t} = K_{cow,c} = \frac{E * b_{eff,co} * t_{co}}{d_{wco}} \quad (4)$$

Donde:

d_{wco} es la profundidad del conector.

t_{co} es el espesor del conector.

E es el módulo elástico del acero.

$b_{eff,co}$ es el ancho efectivo del conector para rigidez, suponiendo la tangente del ángulo 1:1.

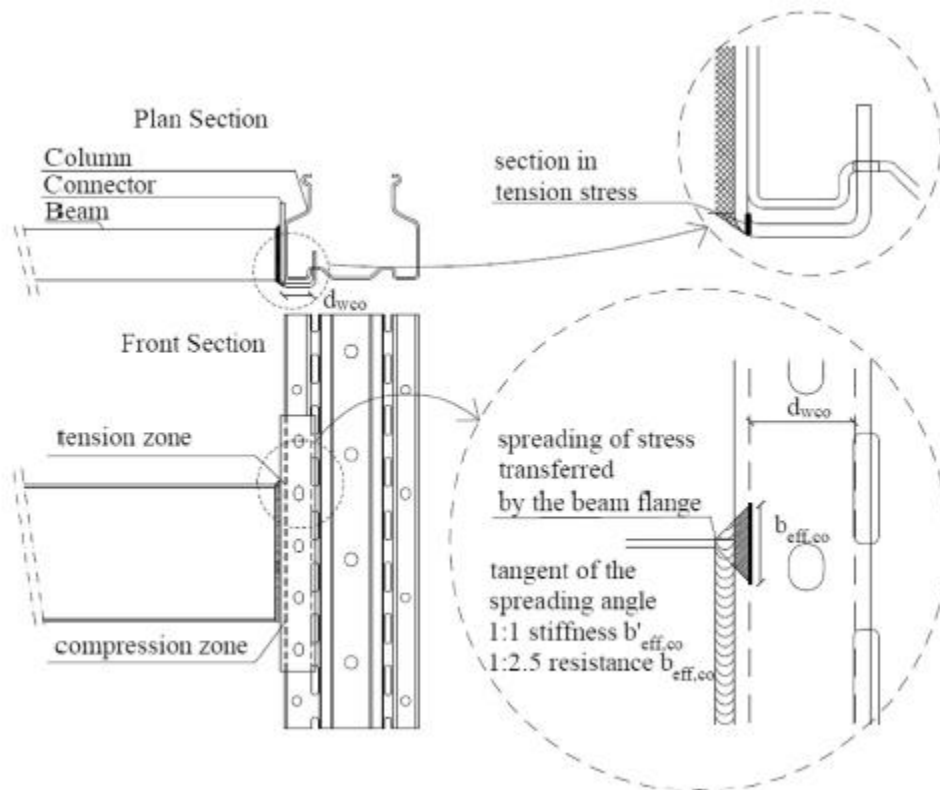


Figura 7: Modelo de conector en tracción y compresión.
 Fuente: [3]

2.5.4 Conector en flexión

La resistencia a la flexión del conector ($M_{co,b}$), puede estimarse mediante la ecuación (5).

$$M_{co,b} = W_{pl,co} * f_{y,co} \quad (5)$$

Donde:

$f_{y,co}$ es la tensión de fluencia del conector.

$W_{pl,co}$ es el módulo de sección plástico del conector.

La rigidez elástica inicial del conector a flexión, puede estimarse mediante la ecuación (6).

$$K_{co,i} = \frac{F}{\delta} \quad (6)$$

Donde:

F es la fuerza aplicada.

δ es la desviación bajo la fuerza F que toma en cuenta los efectos de flexión y corte.

El conector en flexión se puede observar en la Figura 8.



Figura 8: Conector en flexión observado durante las pruebas.
 Fuente: [3]

2.5.5 Pestañas en momento y corte

El comportamiento rotacional de la conexión se ve afectado por la pestaña. Las pestañas están sometidas a flexión (Fase 1, Figura 9), y para evaluar su rigidez inicial ($K_{t,s}$) se utiliza la ecuación (7).

$$K_{t,s} = \frac{F}{\delta} \quad (7)$$

Donde:

$\delta = \left(\frac{I_F^3}{3EI} + \frac{1,2I_F}{GA_v} \right) F$ es la desviación en el punto donde se concentra la carga F , ejercida por la pared de la columna.

G es el módulo de corte del acero (81.000 N/mm²).

E es el módulo elástico del acero.

I_F es el brazo palanca de la fuerza F .

$I = \frac{t_{tab}^3 l'_{tab}}{12}$ es el momento de inercia de la sección transversal de la pestaña.

$A_v = l'_{tab} t_{tab}$ es el área efectiva de la pestaña bajo el momento flector (en Fase 1).

Donde:

t_{tab} es el grosor de la pestaña.

l'_{tab} es la longitud de la sección transversal de corte en la pestaña (ver Figura 9).

Después de la deformación por flexión, la pestaña se somete a un esfuerzo de corte (Fase 2, Figura 9). Esto influye solo en la resistencia a flexión de la conexión. La resistencia al corte de la pestaña ($F_{t,s}$) queda definida por la ecuación (8).

$$F_{t,s} = \frac{F_{u,co} * A_{v,tab}}{\sqrt{3}} \quad (8)$$

Donde:

$F_{u,co}$ es el esfuerzo último del conector.

$A_{v,tab} = l''_{tab} t_{tab}$ es el área efectiva de corte de la pestaña.

Donde:

l''_{tab} es el grosor de la pestaña.

t_{tab} es la longitud de la sección transversal de corte en la pestaña (ver Figura 9).

En la Figura 10, se puede apreciar los efectos de flexión y corte en las pestañas.

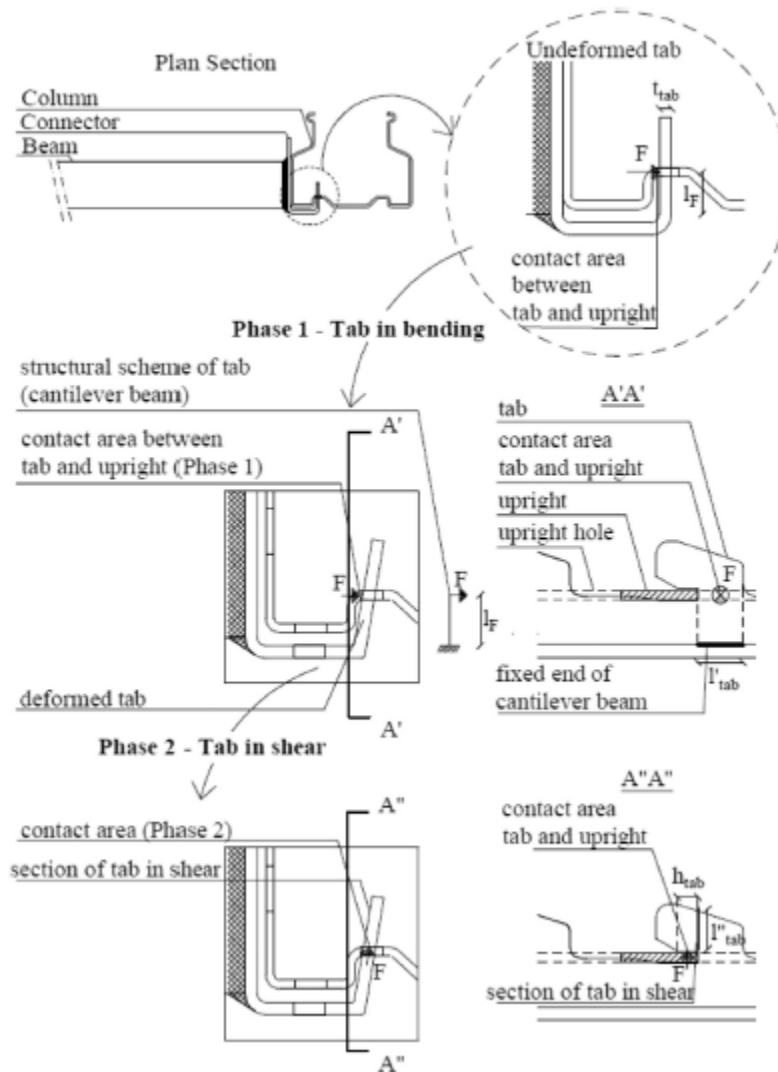


Figura 9: Modelo de pestaña en flexión y corte.

Fuente: [3]

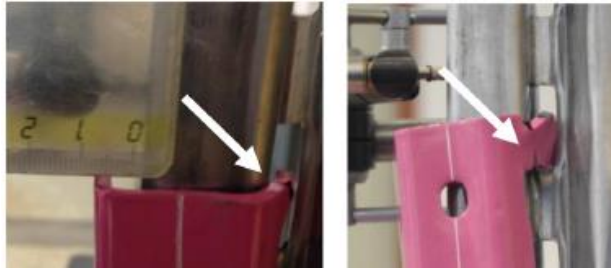


Figura 10: Efecto de flexión y corte en pestañas respectivamente.
 Fuente: [3]

2.5.6 Pernos en corte

Para determinar la resistencia de los pernos en corte ($F_{v,Rd}$), se utiliza la ecuación (9) en acuerdo con [1] y [2].

$$F_{v,Rd} = \frac{0,6 * f_{u,b} * A_s}{\gamma_{M1}} \quad (9)$$

Donde:

$f_{u,b}$ es la tensión última del perno a corte.

A_s es el área de la sección transversal del perno.

γ_{M1} es un factor de reducción que depende el tipo de material.

De igual forma, según [5] la rigidez a corte del perno ($K_{t,v}$) se puede obtener mediante la ecuación (10).

$$K_{t,v} = \frac{16 * d^2 * f_{u,b}}{d_{M16}} \quad (10)$$

Donde:

$f_{u,b}$ es la tensión última del perno a corte.

d es el diámetro del perno.

d_{M16} es el diámetro de un perno M16.

2.5.7 Columna en punzonamiento

Entre los componentes de la columna, una parte está sometida a punzonamiento debido a la carga vertical que transmiten las pestañas (ver Figura 11). Este componente está activo solo en la zona de tracción de la conexión, ya que la fuerza de punzonamiento se transfiere mediante las pestañas que funcionan en tracción. De acuerdo con [2], la resistencia a punzonamiento de la columna ($F_{cw,p}$), puede estimarse mediante la ecuación (11).

$$F_{cw,p} = 0,6 * d_m * t_{cw} * f_{u,cw} \quad (11)$$

Donde:

t_{cw} es el espesor de la columna.

$f_{u,cw}$ es el esfuerzo de tensión último de la columna.

$d_m = t_{tab} + 2h_{tab}$ es el perímetro de la pestaña en contacto con la columna (Figura 11).

Donde:

t_{tab} es el grosor de la pestaña.

h_{tab} es la altura de la pestaña.

Para determinar la rigidez de la columna a punzonamiento ($K_{cw,p}$), se utiliza la ecuación (12).

$$K_{cw,p} = \frac{F}{\delta} \quad (12)$$

Donde:

F es la fuerza en punzonamiento aplicada en la pestaña.

$\delta = \left(\frac{\chi l_{cw,p}}{4GA_{cw,p}} + \frac{l_{cw,p}^3}{192EJ_{cw,p}} \right) F$ es la desviación causada por flexión y corte bajo carga F .

G es el módulo de corte del acero (81.000 N/mm²).

χ es el factor de corrección por corte.

$l_{cw,p}$ longitud de la columna donde actúa fuerza F (ver Figura 11).

E es el módulo elástico del acero.

$A_{cw,p} = t_{cw}h_{tab}$ es la sección transversal de la zona de punzonamiento (ver Figura 11).

$J_{cw,p} = \frac{1}{12} h_{tab} t_{cw}^3$ es el momento de inercia de la sección sometida a punzonamiento, con:

h_{tab} es la altura de la pestaña (ver Figura 11).

t_{cw} es el grosor de la columna.

El efecto de punzonamiento puede observarse en la Figura 12.

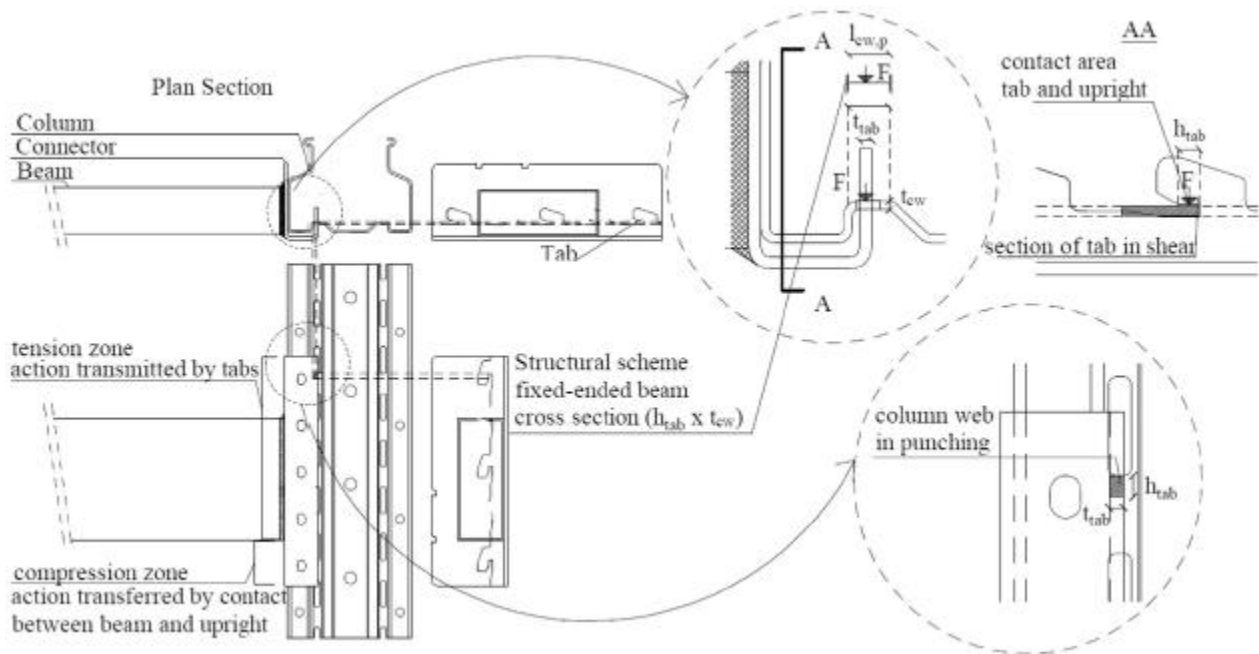


Figura 11: Modelo de columna en punzonamiento.

Fuente: [3]



Figura 12: Efecto de punzonamiento en la columna
 Fuente: [3]

2.5.8 Columna en aplastamiento

La acción transferida por las pestañas causa aplastamiento en la columna. La resistencia de la columna a aplastamiento ($F_{cw,b}$), que está activo en la zona de tracción (ver Figura 13) puede estimarse mediante la ecuación (13).

$$F_{cw,b} = 2,5 * \alpha * f_{u,cw} * h_{tab} * t_{cw} \quad (13)$$

Donde:

t_{cw} es el grosor de la columna.

$f_{u,cw}$ es el último esfuerzo de tensión en la columna.

h_{tab} es la altura de la pestaña (ver figura 13).

$$\alpha = \frac{f_{u,co}}{f_{u,cw}}$$

La rigidez de este componente ($K_{cw,b}$), puede estimarse mediante la ecuación (14).

$$K_{cw,b} = 12 * K_b * K_t * h_{tab} * f_{u,cw} \quad (14)$$

Donde:

$f_{u,cw}$ es el último esfuerzo de tensión en la columna.

h_{tab} es la altura de la pestaña (ver figura 13).

$$K_b = 1,25 [2].$$

$$K_t = \frac{1,5t_{cw}}{d_{M16}}$$

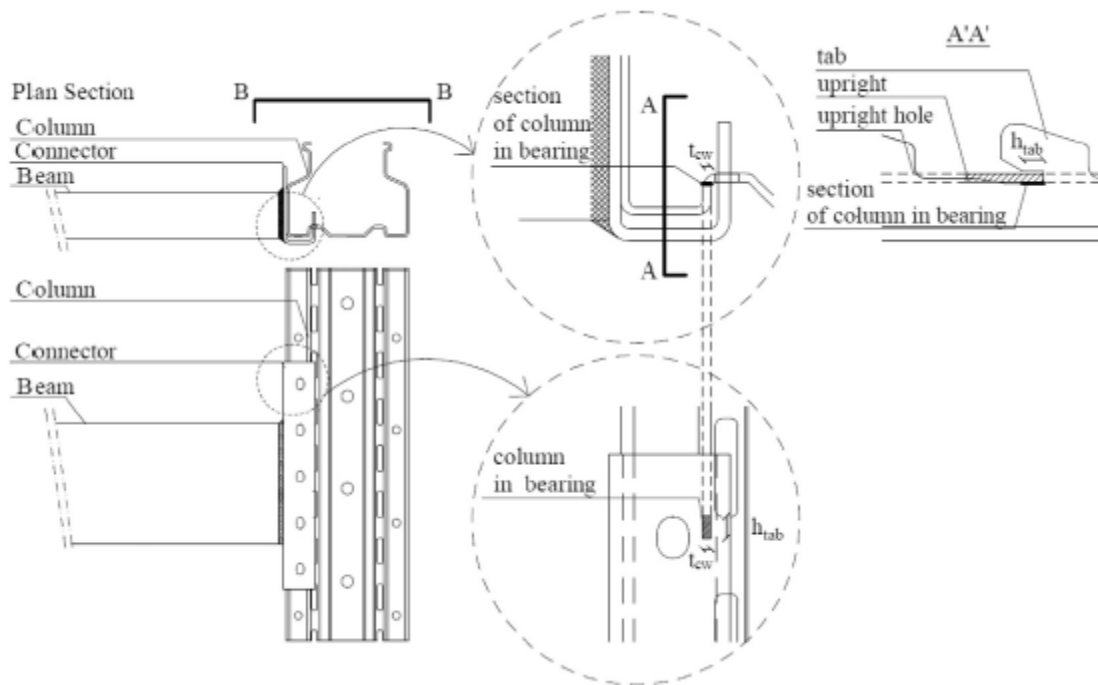


Figura 13: Modelo de columna en aplastamiento.
 Fuente: [3]

2.5.9 Columna en tracción y compresión

La resistencia de la columna en compresión, puede estimar mediante la ecuación (15).

$$F_{cw,cr} = \omega * b_{eff,c} * t_{cw} * f_{y,cw} \quad (15)$$

Donde:

ω es el factor de reducción por efecto de corte en la columna.

$b_{eff,c}$ es el ancho efectivo de la columna en sector de compresión (ver Figura 14).

t_{cw} es el espesor de la columna.

$f_{y,cw}$ es el límite elástico de la columna.

Además, se tiene que:

$$F_{cw,cb} = F_{cw,cr} \left(\frac{1}{\lambda} \left(1 - \frac{0,22}{\lambda} \right) \right)$$

Donde:

$$\lambda = \left(\frac{b_{eff,c} t_{cw} f_{y,cw}}{F_{cr}} \right)^{1/2}$$

$$F_{cr} = \left(\frac{\pi E t_{cw}^3}{3(1 - \nu^2) d_{w,cb}} \right)$$

Donde:

E es el módulo elástico del acero.

t_{cw} es el espesor de la columna.

ν es el coeficiente de Poisson (0,3).

$d_{w,cb}$ es la profundidad de la columna en pandeo (ver Figura 14).

Finalmente, la resistencia de la columna en compresión ($F_{cw,c}$), queda definida por la ecuación (16).

$$F_{cw,c} = \min(F_{cw,cb}; F_{cw,cr}) \quad (16)$$

La resistencia de la parte traccionada ($F_{cw,t}$), se puede determinar mediante la ecuación (17).

$$F_{cw,t} = \omega * b_{eff,t} * t_{cw} * f_{y,cw} \quad (17)$$

Donde:

$f_{y,cw}$ es el límite elástico de la columna.

t_{cw} es el espesor de la columna.

ω es el factor de reducción por efecto de corte en la columna.

$b_{eff,t}$ es el ancho efectivo de la columna en sector de tracción (ver Figura 14).

El modelo de la columna sometida a tracción y compresión se representa en la Figura 14.

La rigidez elástica axial de la columna en compresión ($K_{cw,c}$) y tracción ($K_{cw,t}$) puede ser calculada con las ecuaciones (18) y (19) respectivamente.

$$K_{cw,c} = \frac{E * b'_{eff,c} * t_{cw}}{d_{wc,c}} \quad (18)$$

$$K_{cw,t} = \frac{E * b'_{eff,t} * t_{cw}}{d_{wc,t}} \quad (19)$$

Donde:

E es el módulo elástico del acero.

t_{cw} es el espesor de la columna.

$d_{wc,c}$ es profundidad de la columna en compresión.

$d_{wc,t}$ es profundidad de la columna en tracción.

$b'_{eff,c}$ es el ancho efectivo de la columna para la rigidez en compresión ($\frac{2}{5} b_{eff,c}$)

$b'_{eff,t}$ es el ancho efectivo de la columna para la rigidez en tracción (tangente del ángulo 1:1).

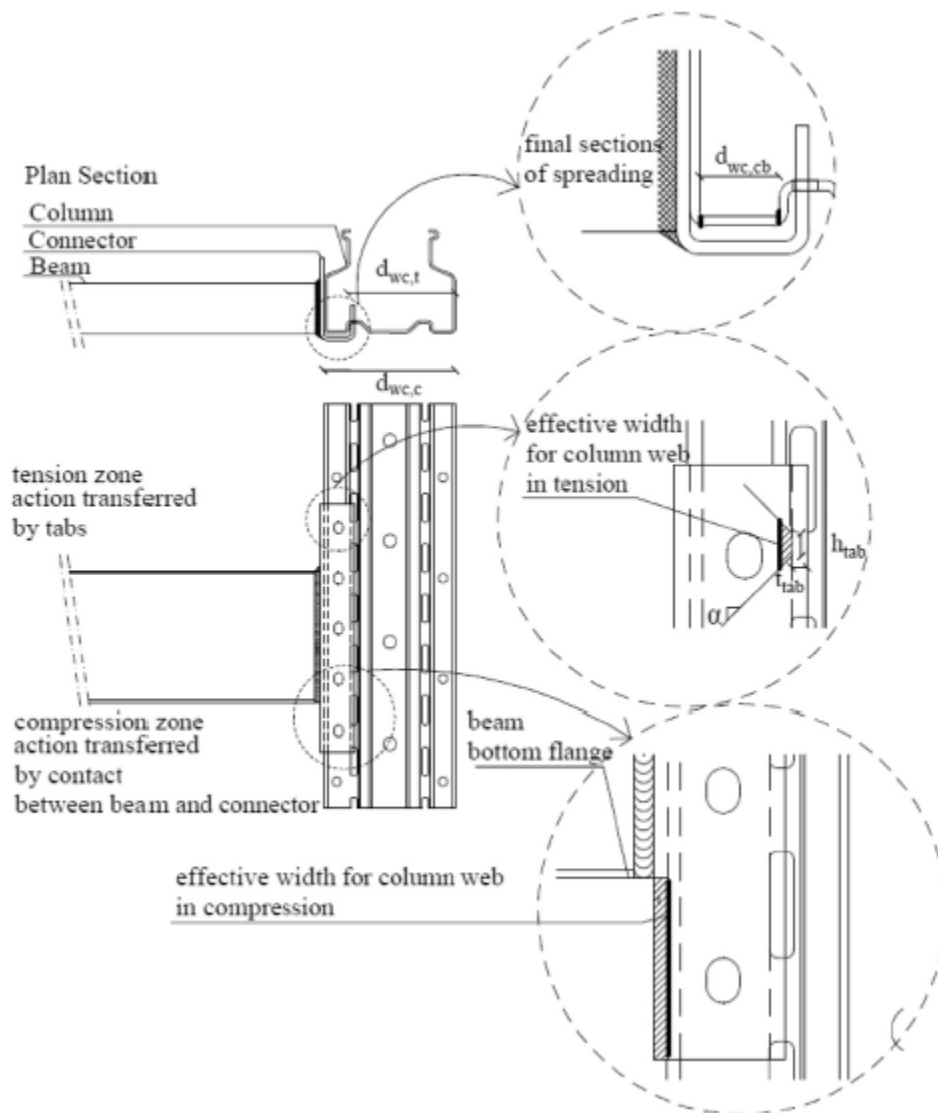


Figura 14: Modelo de columna en tracción y compresión
 Fuente: [3]

2.5.10 Columna en corte

La resistencia al corte de la columna, queda definida por la ecuación (20).

$$F_{cw,s} = \frac{f_{y,cw} * A_{vc,net}}{\sqrt{3}} \quad (20)$$

Donde:

$f_{y,cw}$ es el límite elástico de la columna.

$A_{vc,net}$ es el área de corte neto de la columna, igual al corte bruto que excluye el ancho de la ranura.

La rigidez de la columna a corte, puede estimarse mediante la ecuación (21).

$$K_{cw,s} = \frac{0,38E}{\left(\frac{\sum h1}{A_{vc}} + \frac{\sum h2}{A_{vc,net}}\right)} \quad (21)$$

Donde:

E es el módulo elástico del acero.

$A_{vc} = l_{wc,s} t_{cw}$ es el área de corte bruto de la columna con;

$l_{wc,s}$ longitud de la columna.

t_{cw} es el espesor de la columna.

$A_{vc,net}$ es el área de corte neto de la columna, igual al corte bruto que excluye el ancho de las ranuras.

$\sum h1$ y $\sum h2$ son las alturas del área de corte bruto (A_{vc}) y corte neto ($A_{vc,net}$) respectivamente (ver Figura 15).

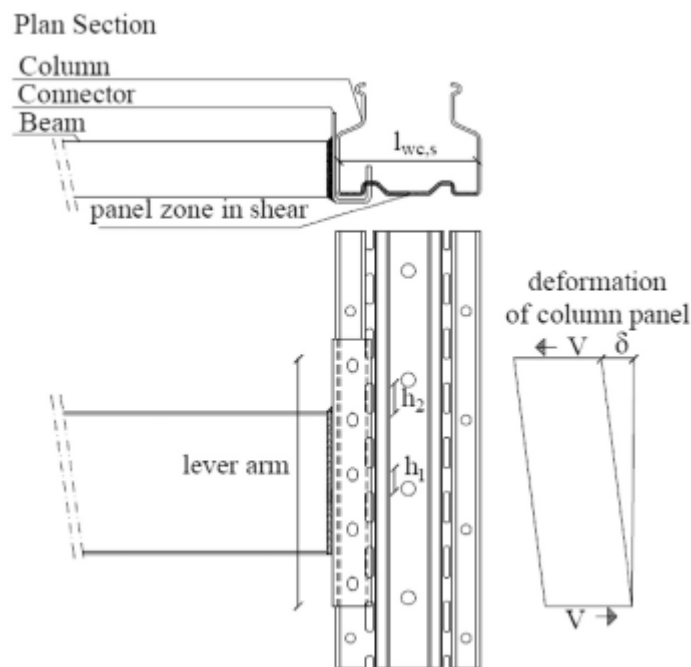


Figura 15: Modelo de columna en corte.

Fuente: [3]

2.6 Momento resistente de la conexión

Una vez que se identifica la resistencia y rigidez de cada uno de los componentes, se puede estimar el momento resistente último de la conexión, utilizando las propiedades mecánicas y geométricas de los distintos componentes.

El modelo desarrollado para predecir la resistencia a flexión de la conexión rack, se representa en la Figura 16a.

Los resortes que representan la soldadura y resistencias de la viga, se encuentran a nivel de los extremos de esta (superior e inferior).

Los resortes que representan al conector y a los componentes de la columna se encuentran a nivel de las pestañas y pernos según corresponda. De estos, 4 niveles se encuentran en tracción, mientras el otro restante se encuentra en compresión, actuando en el centro de rotación (C.R).

Cada nivel posee un brazo palanca que representa el comportamiento del panel en los distintos niveles.

El componente más débil (weakest) gobierna la resistencia de cada nivel según corresponda, pudiendo simplificar el modelo que es representado en la Figura 16b.

Donde:

$$F_{weakest} = \min(F_{cw,p}; F_{cw,b}; F_{cw,t}; F_{t,s} \text{ o } F_{v,Rd}) \text{ (sólo para los niveles 1, 2, 3 y 4).}$$

Nota1: La resistencia al corte de la pestaña ($F_{t,s}$) y la resistencia al corte del perno ($F_{v,Rd}$), se incluyen **solo en el caso que corresponda**, respetando el nivel en cual está trabajando uno u otro componente.

Nota2: En ningún caso, pueden utilizarse las 2 juntas.

$$F_{weakest,beam} = (F_{cow,i}; F_{bf,i}) \text{ (para todas las conexiones).}$$

Por condición de equilibrio, la reacción en la zona de compresión es igual a la suma de fuerzas que actúan más débilmente en cada fila. La resistencia a la flexión del conector ($M_{co,b}$) no puede ser excedida. Así, a través de la ecuación (22) se puede determinar el centro de compresión medido desde el centro de rotación.

$$Z_c = \frac{M_{co,b}}{Z} \quad (22)$$

Donde:

Z es la fuerza de reacción en la zona de compresión.

$M_{co,b}$ es la resistencia del conector a flexión.

Una vez determinado el centro de compresión, la resistencia última a flexión de la conexión rack, puede estimarse mediante la ecuación (23).

$$M_{u,num} = \min(M_{u,weld}; M_{u,beam}; M_{u,conector}; M_{u,panel}) \quad (23)$$

Donde:

$M_{u,weld} = F_{wel} * h_b$ es el momento último que resiste la soldadura.

$M_{u,beam} = F_{weakest,beam} * h_b$ es el último momento que resiste la viga.

$M_{u,conector} = F_{weakest} * \sum_i^r h_i + M_{co,b}$ es el último momento que resiste el conector.

$M_{u,panel} = F_{cw,s} * Z_{eq}$ es el último momento que resiste el panel de columna.

h_i es la distancia del componente en tracción ($i = 1:4$) desde el centro de rotación.

Z_{eq} es el brazo de palanca equivalente.

h_b es la altura de la viga.

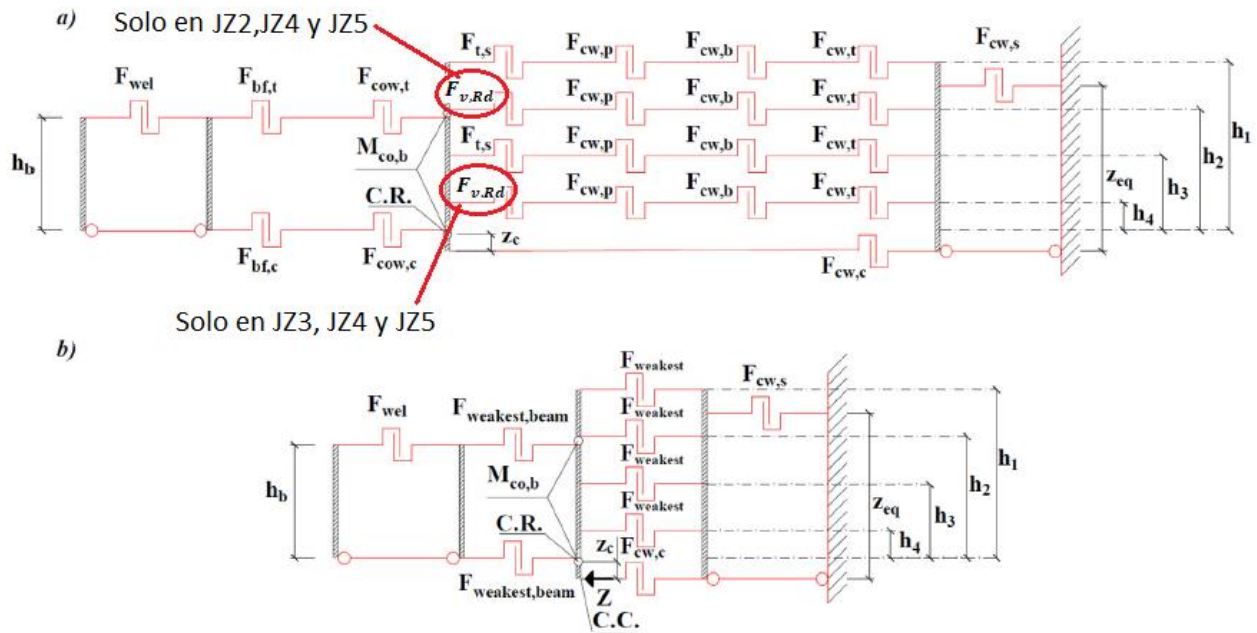


Figura 16a y 16b: Modelo para determinar momento último de la conexión rack.
Fuente: [3]

2.7 Rigidez elástica rotacional de la conexión.

El modelo adoptado para determinar la rigidez elástica, se muestra en la Figura 17. El procedimiento para determinar la rigidez elástica rotacional se representa en la Figura 18.

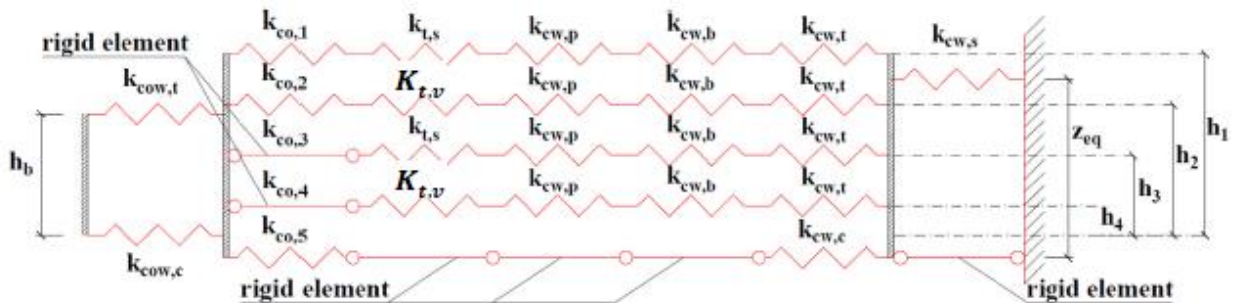


Figura 17: Modelo para determinar rigidez elástica rotacional de la conexión.
Fuente: [3]

Nota1: Al igual que en la resistencia, la rigidez de la pestaña y del perno en corte, se incluye solo en el caso que corresponda.

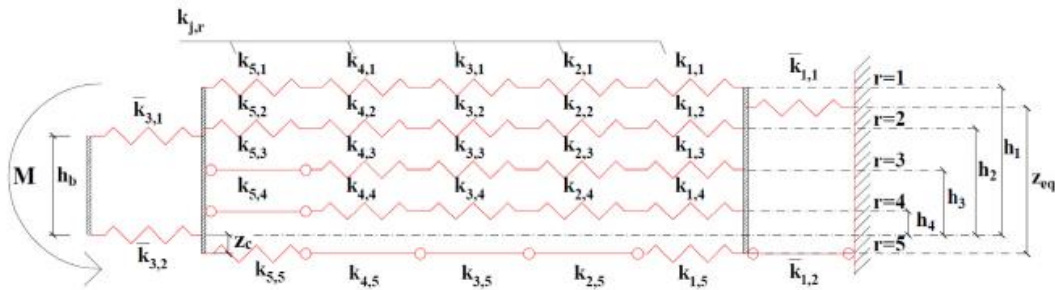


Figura 18: Procedimiento para determinar rigidez elástica rotacional de la conexión.
 Fuente: [3]

El primer paso es el cálculo de la rigidez efectiva (ver Figura 19) de cada fila ($r = 1:5$) a partir de la rigidez de cada componente. Esto se realiza a través de la ecuación (24).

$$K_{eff,r} = \frac{1}{\sum_{j=1}^5 \frac{1}{K_{j,r}}} \tag{24}$$

Una vez obtenida la rigidez efectiva de cada fila ($r = 1:5$), se procede a determinar una rigidez equivalente (Ver Figura 19) en tracción ($r = 1:4$). Esto se puede estimar mediante la ecuación (25).

$$K_{eq} = \frac{\sum_{r=1}^4 K_{eff,r} h_r}{h_{eq}} \tag{25}$$

Donde:

h_r es la distancia entre fila r y centro de rotación.

$h_{eq} = Z_{eq} - Z_c$ es la distancia equivalente hasta el centro de rotación.

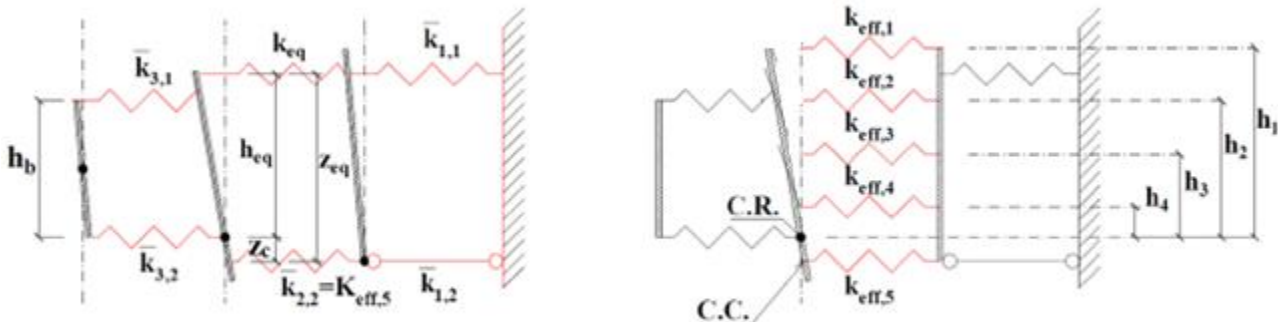


Figura 19: Rigidez efectiva y rigidez equivalente.
 Fuente: [3]

Luego de obtener la rigidez equivalente, se debe cambiar la rigidez axial de los componentes, por rigidez rotacional (ver Figura 20). Esto se puede realizar mediante la ecuación (26).

$$S_n = \left(\frac{Z_n^2}{\sum_{i=1}^2 \frac{1}{K_{-n,i}}} \right) \quad (26)$$

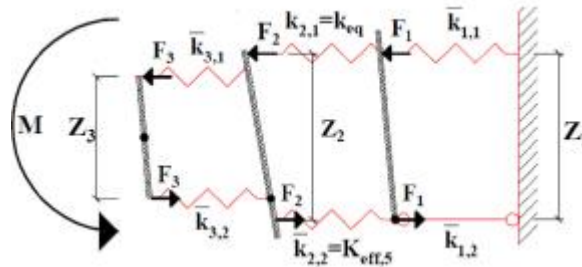


Figura 20: Rigidez rotacional.
Fuente: [3]

Finalmente, se puede determinar la rigidez inicial ($S_{ini,num}$) (ver Figura 21) mediante la ecuación (27).

$$S_{ini,num} = \frac{1}{\sum_{n=1}^3 \frac{1}{S_n}} \quad (27)$$

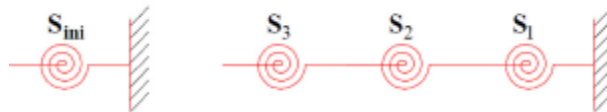


Figura 21: Rigidez inicial de la conexión.
Fuente: [3]

3. RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados teóricos y experimentales de cada conexión. Los resultados teóricos obtenidos con el método de las componentes se comparan con datos experimentales.

3.1 Momento último y rigidez elástica rotacional de las conexiones rack vs ensayos monotónicos

El momento último y la rigidez elástica rotacional de las conexiones rack determinados con el método de las componentes, se comparan con datos experimentales adquiridos de [4] (ver Figura 22). Estos datos experimentales fueron obtenidos a través de pruebas monotónicas, en donde las conexiones se sometieron a flexión hasta llegar a la falla.

Además, para determinar la rigidez elástica rotacional de la conexión, se utiliza la ecuación (28). La rigidez elástica de las conexiones, se obtiene valga la redundancia en la zona elástica (ver Figura 22).

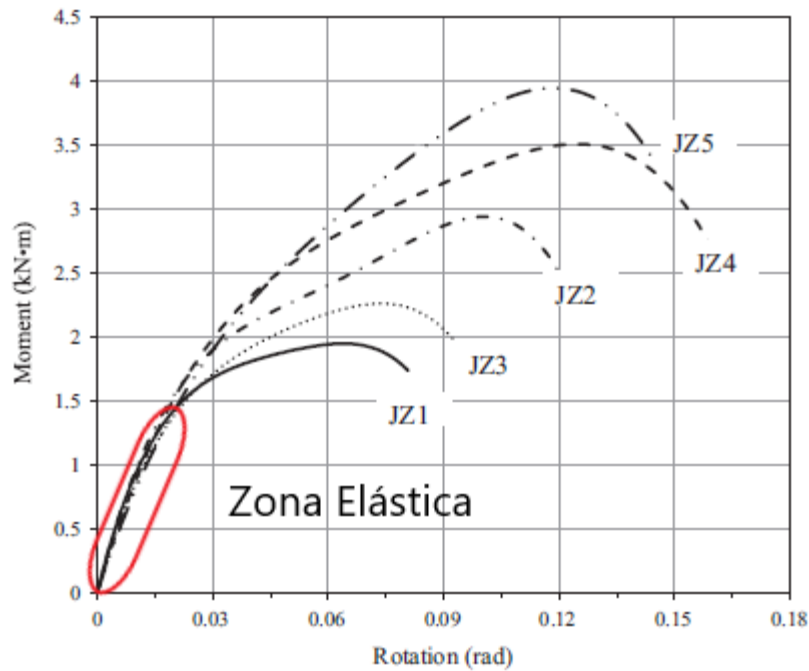


Figura 22: Resultados de pruebas monotónicas obtenidos de [4].

$$\theta = \frac{M_u}{EI} \quad (28)$$

Donde:

M_u es el momento último.

EI es la rigidez elástica de la conexión.

θ es el ángulo de deflexión de la conexión, al comienzo y al fin de la prueba monotónica.

A continuación, en la Figura 23 se presentan los resultados, obtenidos con el método de las componentes y los resultados experimentales adquiridos de [4], considerando momento último.

Además, en la Tabla 3 se observa la diferencia entre los valores experimentales y teóricos, expresados en porcentaje.

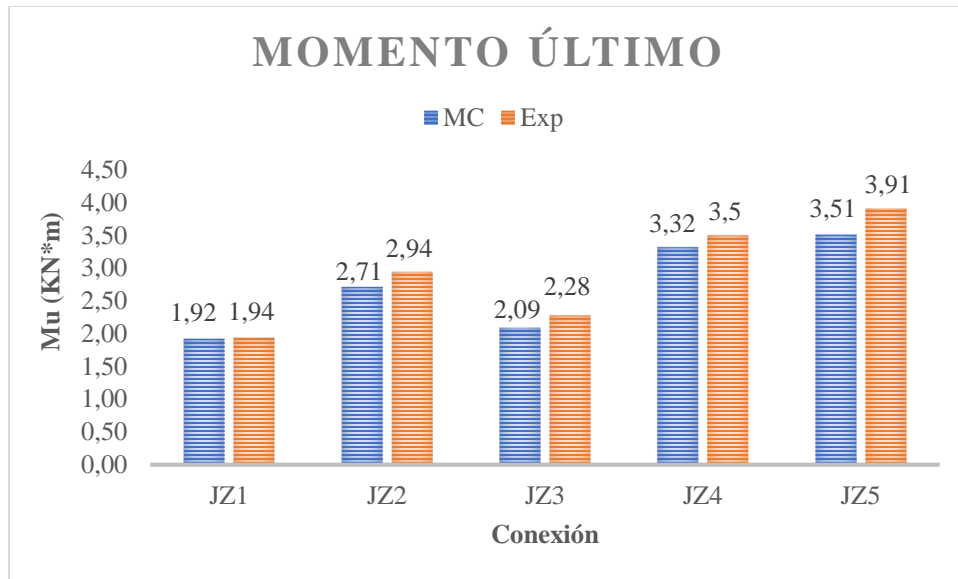


Figura 23: Momento último (MC vs Exp).
 Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3: Diferencia entre momento último experimental y teórico

Conexión	Momento
	Dif. %
JZ1	0,9
JZ2	7,7
JZ3	8,4
JZ4	5,2
JZ5	10,2

Fuente: Elaboración propia.

En base a lo observado en la Figura 23, se puede afirmar que la conexión que menos capacidad a flexión tiene es la JZ1. Esto se debe a que dicha conexión no posee pernos en ninguno de sus niveles, por ende, el conector está unido a la columna solo por las 3 pestañas. Al no tener pernos, los brazos de palanca se reducen solo a 2 en la zona de tracción, los cuales son h_1 y h_3 (h_2 y h_4 son igual a 0). Esto perjudica drásticamente el momento resistente último del conector. El componente que falla en esta conexión son las pestañas producto del esfuerzo de corte. La conexión JZ1 es la más débil, ya que, es muy básica en comparación con las demás.

De igual forma se puede observar que la conexión JZ2 tiene una mayor capacidad a flexión que la conexión JZ1. Esto se debe a que en la conexión JZ2 se añade un perno en la fila 2. Al añadir un perno, los brazos de palanca aumentan de 2 a 3 en la zona de tracción (h_1 , h_2 y h_3), aumentando consigo la capacidad a flexión de la conexión. En la fila 4, al no haber nada, el brazo palanca (h_4) sigue siendo 0. El componente que falla en esta conexión son las pestañas producto del esfuerzo de corte.

La conexión JZ3 igual posee un perno, pero a diferencia de la conexión anterior, el perno actúa en la zona inferior (fila 4). Si bien al utilizar un perno la capacidad a flexión de la conexión aumenta, esto no es tan notorio como en la conexión JZ2. A simple vista esto parece ilógico, ya que, las 2 conexiones son iguales con la única diferencia que sus pernos están localizados en diferentes lugares. Sin embargo, el brazo palanca del perno superior (JZ2) es mayor al brazo palanca del perno inferior (JZ3), medido desde el centro de rotación.

Esto último es la diferencia que marca la capacidad a flexión de las conexiones JZ2 y JZ3.

En la conexión JZ3, los brazos de palanca son h_1 , h_3 y h_4 en la zona de tracción (h_2 igual a 0), debido a que no hay ningún componente actuando en esa fila. El componente que falla en esta conexión son las pestañas productor de esfuerzo de corte.

La conexión JZ4 posee una mayor capacidad a flexión que las anteriores. Esto se debe a que dicha conexión posee 2 pernos localizados en las filas 2 y 4. Al añadir 2 pernos en la zona superior e inferior, los brazos de palanca que actúan en la zona de tracción son h_1 , h_2 , h_3 y h_4 . Esto quiere decir que, en cada fila, hay un componente actuando, trayendo consigo un aumento en la capacidad a flexión de la conexión. El componente que falla en esta conexión es el conector producto de los esfuerzos de tracción y compresión.

Finalmente, la conexión JZ5 es la que tiene una mayor capacidad a flexión. Si bien es parecida a la conexión JZ4, la única diferencia es el modo de soldadura, para unir la viga con el conector. En esta conexión la viga está soldada al conector por sus 4 caras. Al diferenciar su modo de soldadura, y con la presencia de 2 pernos, esta conexión es la más resistente. El componente que falla en esta conexión es el conector producto de los esfuerzos de tracción y compresión.

En las 5 conexiones la diferencia entre en lo experimental y lo teórico no sobrepasa el 11% (Tabla 3).

A continuación, en la Figura 24 se presentan los resultados obtenidos con el método de las componentes y los resultados experimentales adquiridos de [4], considerando rigidez elástica rotacional.

Además, en la Tabla 4 se observa la diferencia entre los valores experimentales y teóricos, expresados en porcentaje.

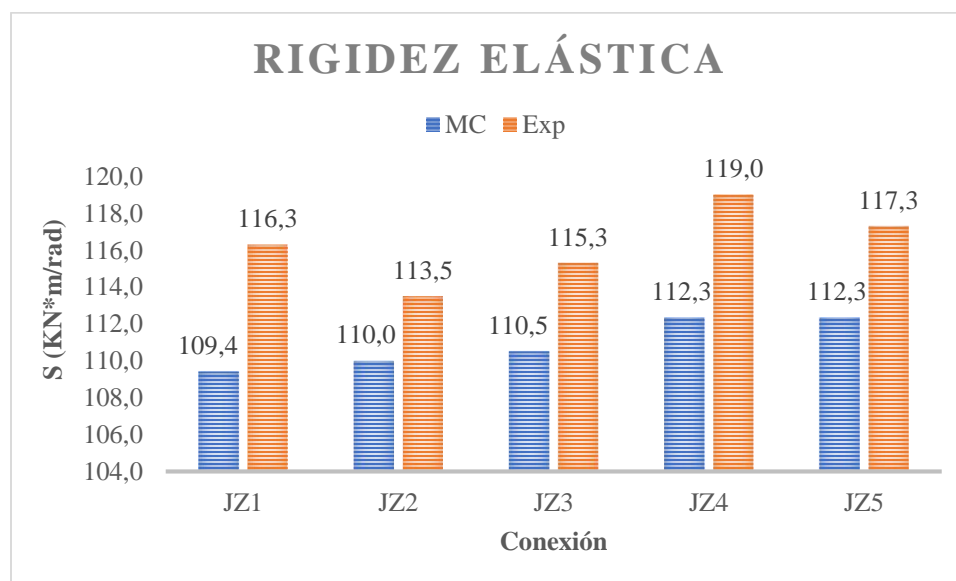


Figura 24: Rigidez elástica rotacional (MC vs Exp).

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4: Diferencia entre rigidez elástica experimental y teórica.

Conexión	Rigidez
	Dif. %
JZ1	5,9
JZ2	3,1
JZ3	4,1
JZ4	5,5
JZ5	4,2

Fuente: Elaboración propia.

En base a lo observado en la Figura 24, se puede afirmar claramente que la rigidez elástica es mayor en la conexión JZ5. Esto se debe a que dicha conexión posee toda clase de componentes, incluyendo 2 pernos y soldadura en sus 4 caras laterales.

También, se puede observar que la rigidez elástica en las conexiones JZ4 y JZ5 son equivalentes. Esto se debe a que, las 2 conexiones poseen los mismos tipos de componentes. La diferencia entre ambas es el modo de soldadura, pero este componente no influye en la rigidez elástica rotacional de la conexión.

De igual forma, se puede observar claramente que la conexión JZ1 es la que tiene menor rigidez elástica rotacional, ya que, es una conexión simple sin pernos.

Las demás conexiones aumentan su rigidez, en la misma manera que se le agregan otros componentes.

En las 5 conexiones, la diferencia entre lo experimental y lo teórico no supera el 6% (Tabla 4).

3.2 Momento último y rigidez elástica rotacional de las conexiones rack vs ensayos cíclicos

El momento último y la rigidez elástica rotacional de las conexiones rack, determinados con el método de las componentes, se comparan con datos experimentales de ensayos cíclicos obtenidos de [4] (ver Figura 25).

En los ensayos cíclicos, la conexión se somete a esfuerzos de flexión negativos y positivos hasta lograr la falla.

En la Figura 25 se puede apreciar el momento último positivo y negativo en todas las conexiones. Al obtener este valor y conociendo la rotación de la conexión, se utiliza nuevamente la ecuación (28), para determinar la rigidez elástica rotacional.

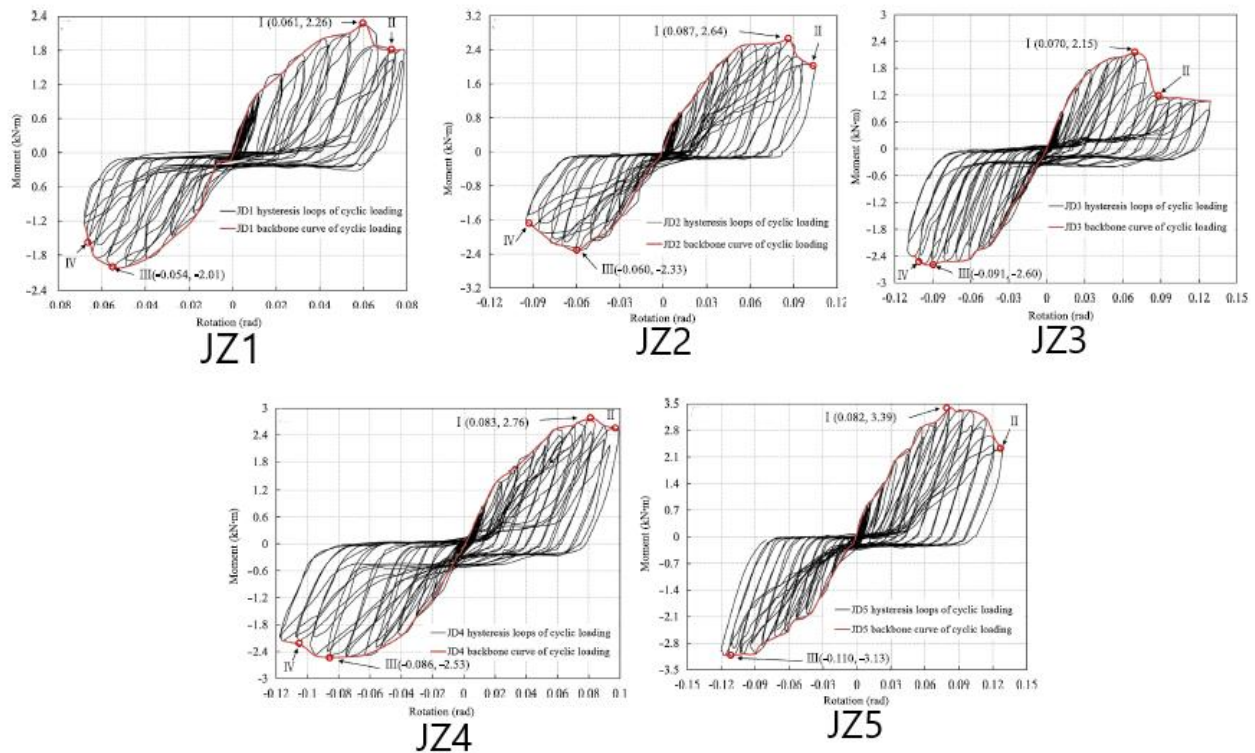


Figura 25: Resultados de pruebas cíclicas obtenidos de [4].

A continuación, en la Tabla 5 se presentan los resultados obtenidos con el método de las componentes y los resultados experimentales adquiridos de [4]. Todo esto, analizando flexión positiva.

Tabla 5: MC vs ensayos cíclicos (Positivos).

Conexión	Positivo					
	Momento + (KN*m)		Dif. %	Rigidez + (KN*m/rad)		Dif. %
	MC	Exp		MC	Exp	
JZ1	1,92	2,26	14,9	109,4	75,0	-45,9
JZ2	2,71	2,64	-2,8	110,0	80,0	-37,5
JZ3	2,09	2,15	2,9	110,5	66,6	-65,9
JZ4	3,32	2,76	-20,2	112,3	70,0	-60,5
JZ5	3,51	3,39	-3,5	112,3	87,5	-28,4

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a lo observado en la Tabla 5, se puede afirmar que el momento último tiene la misma tendencia que en los ensayos monotónicos, logrando la resistencia y rigidez más alta en la conexión JZ5. Sin embargo, en las conexiones JZ1 y JZ4, la diferencia entre lo experimental y lo teórico es muy alta, lo que nos da un indicio de que el método de las componentes no se aproxima a ensayo cíclicos, debido a la forma en la que estos se hacen, afectando sus propiedades estructurales.

En el caso de la rigidez elástica, la diferencia entre lo experimental y lo teórico es muy grande. Los resultados teóricos sobrepasan en gran manera a los resultados experimentales, lo que nos da nuevamente un indicio que, el método de las componentes no se aproxima a ensayos cíclicos.

A continuación, en la Tabla 6 se presentan los resultados obtenidos con el método de las componentes y los resultados experimentales adquiridos de [4]. Todo esto, analizando flexión negativa.

Tabla 6: MC vs ensayos cíclicos (Negativos).

Conexión	Negativo					
	Momento - (KN*m)		Dif. %	Rigidez - (KN*m/rad)		Dif. %
	MC	Exp		MC	Exp	
JZ1	-1,92	-2,01	4,3	-109,4	-60,0	-82,4
JZ2	-2,71	-2,33	-16,5	-110,0	-50,0	-120,0
JZ3	-2,09	-2,60	19,7	-110,5	-48,0	-130,2
JZ4	-3,32	-2,53	-31,1	-112,3	-60,0	-87,2
JZ5	-3,51	-3,13	-12,1	-112,3	-46,6	-141,1

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a lo observado en la Tabla 6, en el caso de los momentos últimos negativos, se puede afirmar que estos han ido perdiendo su tendencia, y por ende la diferencia entre lo experimental y lo teórico se ha hecho más amplia. Solamente en la conexión JZ1 se mantiene una diferencia aceptable para afirmar que el método se aproxima. En cambio, en las conexiones JZ2, JZ3, JZ4 y JZ5 la diferencia es mucha, lo que nuevamente nos indica una mala aproximación del método con los ensayos experimentales cíclicos.

En el caso de la rigidez elástica, la diferencia entre lo experimental y lo teórico sigue aumentando.

4. CONCLUSIONES

El método de las componentes se ajusta para estimar la capacidad a flexión y rigidez elástica de una conexión rack. Sin embargo, una vez realizado el estudio se pudo observar que se aproxima mejor en ensayos monotónicos que en ensayos cíclicos, ya que, en los ensayos cíclicos hay una degradación de todos los componentes que intervienen en aportar resistencia y rigidez, degradación que el método no puede capturar ciclo a ciclo. En cambio, en los ensayos monotónicos hay una degradación que sí logra percibir el método.

Se pudo observar que el método es capaz de cuantificar la componente más débil y, por ende, la componente que falla en la conexión. Debido a esto, se puede redimensionar dicho elemento con el fin de mejorar la capacidad a flexión de la conexión.

Se logró estudiar el comportamiento de los 5 tipos de conexiones, donde se observó que, de todas, la JZ1 fue la conexión donde se obtuvo menos resistencia a flexión y menos rigidez elástica, debido a que no tenía pernos en las filas 2 y 4.

En la conexión JZ5 se obtuvo mayor resistencia a flexión y rigidez elástica, debido a que tenía 2 pernos y soldadura por todas las caras de la viga. La soldadura aumenta su capacidad a flexión, pero no aporta rigidez. Esta conexión logró el mejor comportamiento de cara a la investigación.

Las demás conexiones van aumentando su capacidad a flexión y rigidez elástica en medida que se le agregan más componentes.

Al incluir uno o más pernos la capacidad a flexión y la rigidez elástica rotacional de la conexión aumenta de manera considerable. Sin embargo, según lo observado, el perno aporta más capacidad a flexión mientras más alejado se encuentre de la zona de compresión.

5. REFERENCIAS

- [1] **A. Guardiola (2006)**. “Comportamiento de los nudos semi-rígidos en estructuras metálicas de edificación”. *Departamento de mecánica de medios continuos y teoría de estructuras. Universidad politécnica de Valencia*.
- [2] **Eurocode 3 (2005)**. “Design of Steel Structures - Part. 1–8: Design of Joints” BS EN 1993-1-8.
- [3] **F. Gusella, M. Orlando, K. Thiele (2018)**. “Evaluation of rack connection mechanical properties by means of the Component Method”. *Journal of Constructional Steel Research*
- [4] **L. Yin, G. Tang, M. Zhang, B. Wang, B. Feng (2016)**. “Monotonic and cyclic response of speed-lock connections with bolts in storage racks”. *Engineering Structures*.
- [5] **L. Montoya (2013)**. “Influencia de flexibilidad de las conexiones en el comportamiento sísmico de edificios metálicos”.

AGRADECIMIENTOS

Primero que todo, quiero agradecer a Dios por concederme la oportunidad de estudiar esta hermosa carrera que es Ingeniería Civil. También le agradezco por brindarme inteligencia, perseverancia y los medios para poder culminar mi etapa universitaria. Dios me ha demostrado su amor y su bondad a lo largo de estos años, no dejándome solo en los momentos difíciles. Reconozco y sé que de Él provienen todas las cosas, y que gracias a Él soy lo que soy. Por eso hoy declaro, que toda la gloria y toda la honra siempre sea para Dios.

Dios me ayudó en todo momento, y hoy puedo decir... “Todo lo puedo en Cristo que me fortalece”

De igual forma, agradezco a mis padres René y Marcela, porque fueron un pilar fundamental en mi paso por la universidad. Les agradezco por siempre darme lo mejor, por inculcarme hermosos valores, por apoyarme en todo momento, por brindarme amor y cariño en los momentos difíciles y por darme siempre una voz de aliento o un consejo cuando lo necesitaba. También agradezco a mi hermano Patricio, a mi hermana Ailyn y a mi sobrino Agustín, porque siempre estuvieron conmigo, alentándome de una u otra forma, ya sea con palabras o con un gesto de cariño.

Doy gracias a Dios porque me dio una hermosa familia, que siempre estuvo conmigo. Ellos fueron testigos de mi sacrificio y constancia para lograr el objetivo de convertirme en Ingeniero Civil, por ende, este logro también les pertenece.

Agradezco igual a mi cuñada Anaiza, por prestarme su computador siempre que lo necesité, el cual fue de mucha utilidad durante mi carrea universitaria.

Además, quiero agradecer a todos mis familiares; abuelos, tíos, primos, etc., por las muestras de cariño reflejadas hacia mí, y por desearme siempre lo mejor.

Agradezco a Daniela, mi pareja, por estar conmigo durante el tiempo que duró esta tesis, dándome ánimo y brindándome su amor incondicional.

También agradezco a mis compañeros y amigos de generación más cercanos, por el apoyo y amistad brindada durante estos 6 años; Óscar Álvarez, Sebastián Alarcón, Alejandro Guzmán, Nicolás Mardones y Claudio Salazar. Con ellos compartí tiempos de estudio, risas, deporte, comidas, etc., que quedarán como lindos recuerdos de mi paso por la universidad.

Finalmente, quiero agradecer al profesor Eduardo Núñez Castellanos, quien fue el guía de esta tesis. Agradezco su paciencia y buena disposición que tuvo a lo largo de este estudio.

¡Gracias a Todos!

Atte.

Diego Hernán Molina Peñailillo.

Dedicado a mi familia...