

## MODELO PARAMÉTRICO FEM PARA ANALIZAR LA UNIÓN ATORNILLADA VIGA-COLUMNA TIPO CHAPA FRONTAL EXTENDIDA SIMÉTRICA

**Rosendo Franco<sup>1</sup>, Juan J. Jiménez de Cisneros<sup>1</sup>, Jordan Quispe<sup>1</sup>, Renatto M. Yupa<sup>1</sup>**

1. Grupo INACOM/Aula PUCP-CIMNE, Sección Ing. Mecánica, Dpto. de Ingeniería,  
Pontificia Universidad Católica del Perú, Av. Universitaria 1801, Lima 32-Perú  
e-mail: rofranco@pucp.edu.pe

### Resumen

En este trabajo se presenta un modelo paramétrico basado en el Método de los Elementos Finitos (FEM), que permite analizar mediante simulación numérica computacional la unión atornillada viga-columna, tipo chapa frontal extendida simétrica. El modelo se ha desarrollado en el entorno del software ANSYS Mechanical mediante rutinas escritas por los autores en lenguaje APDL, de tal manera que se puede analizar cualquier combinación de tamaños de la viga y la columna con perfiles W normalizados. A diferencia de la mayoría de investigaciones sobre este tipo de unión, en este artículo se estudia la configuración simétrica y rigidizada, tanto en la columna como en la viga, que es recomendada para construcciones antisísmicas. El modelo considera el comportamiento elasto-plástico de la unión, con el criterio de fluencia de von Mises y la regla de endurecimiento cinemático trilineal, bajo los efectos de fuerza cortante y momento flector. Adicionalmente, se tienen en cuenta las condiciones de contacto entre los elementos de la conexión y los grandes desplazamientos que se producen hasta llegar al colapso, por lo que se trata de un modelo altamente no lineal. Para calibrar y validar el modelo, los resultados preliminares fueron comparados con resultados experimentales disponibles en la literatura especializada, alcanzándose una adecuada correspondencia entre los mismos. Como resultados finales el modelo permite obtener los valores del ángulo de giro en función del momento flector, para luego construir las curvas Momento-Rotación, lo que permite constatar que esta unión tiene un comportamiento semirrígido. Además, se determinan la ductilidad y la resistencia de la conexión.

**Palabras claves:** chapa frontal extendida, unión semirrígida, curva Momento-Rotación, FEM

## 1. Introducción

La construcción metálica en acero supone una de las soluciones mayormente empleadas en el Perú en proyectos de estructuras en industrias, tales como la minera (Figura 1), gracias a la gran resistencia que el acero posee por unidad de peso y por su ductilidad, que le permite soportar deformaciones y esfuerzos relativamente altos [1]. Una de las partes más críticas en el diseño de una estructura metálica es la unión entre componentes, ya sea soldada o atornillada, por lo que se requiere una correcta caracterización de sus propiedades para satisfacer los niveles de seguridad establecidos.

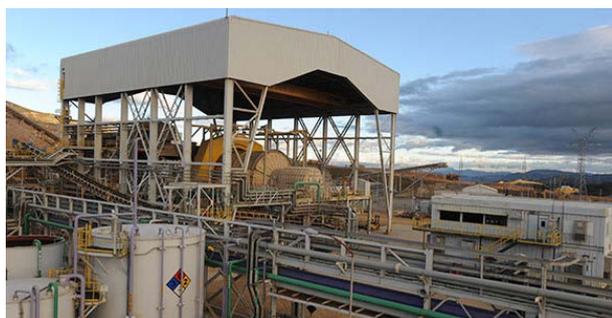


Figura 1: Estructura metálica en proyecto minero Yanacocha - Perú [2]

Una unión puede identificarse por tres parámetros: rigidez inicial, resistencia máxima y ductilidad o capacidad de rotación máxima (Figura 2).

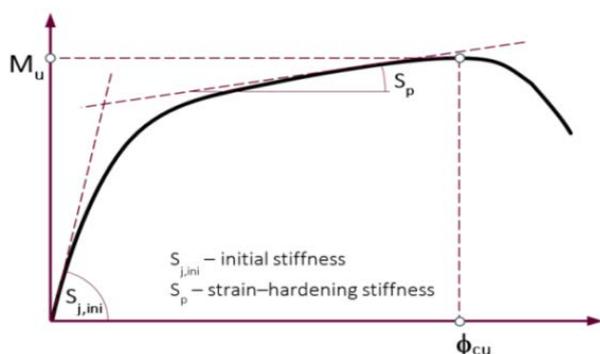


Figura 2: Curva Momento-Rotación [3]

La normativa actual vigente en el Perú para el diseño de estructuras metálicas [4] define como construcción tipo 3 aquella en la que las uniones entre los elementos que conforman la estructura poseen cierta capacidad de rotación. Sin embargo esta norma, al igual que el código americano AISC [5] en el que está basada, no establecen un procedimiento consistente para el análisis de rigidez y de ductilidad de los componentes. Los Eurocódigos estructurales [6] desarrollan un procedimiento para el análisis de rigidez y de resistencia, conocido como el método de las componentes, donde la unión es dividida en componentes básicas y las propiedades de la unión

se analizan a través de modelos que consideran estas propiedades. El uso de esta metodología presenta dos inconvenientes: la primera es que las propiedades de rigidez y resistencia analizadas son subvaloradas, lo que conlleva a que las soluciones diseñadas estén sobredimensionadas; y la segunda es que no se analiza la ductilidad de la conexión, necesaria para poder determinar el comportamiento de la estructura ante un evento sísmico.

El método de los elementos finitos es una técnica numérica ampliamente utilizada en la resolución de problemas estructurales. Desde que fue formulado inicialmente ha evolucionado constantemente, y en la actualidad es utilizado con éxito gracias a la capacidad de cálculo que han adquirido las computadoras, lo que permite abordar problemas con grandes no linealidades en tiempos relativamente cortos. La principal ventaja de este método es que pueden calcularse las propiedades reales de la unión objeto de estudio con un error mínimo, pues no se requiere considerar simplificaciones propias de la formulación por modelos analíticos. Adicionalmente, una vez calibrados los parámetros de análisis mediante comparación con ensayos experimentales, permite parametrizar la geometría y realizar un análisis de sensibilidad ante el cambio de las variables definidas. El primer estudio que incluye el método de elementos finitos para la evaluación de uniones fue hecho por Bose et al. [7], quienes estudiaron la unión soldada viga-columna. Luego se realizaron estudios de uniones atornilladas como las de Krishnamurthy y Graddy [8]. Por otro lado, Bursi y Jaspart [9] implementaron la componente de chapa frontal a la unión viga-columna. La variación del número de hileras de tornillos fue tratada por Bahaari y Sherbourne [10], mientras que Maggi et al. [11] desarrollaron el modelo tridimensional de la unión semirrígida con chapa frontal extendida. Modelos posteriores presentaron rigidizadores en la columna, tales como los de Shi YJ et al. [12]. Adicionalmente, Díaz et al. [13] proporcionan las macros de su estudio de uniones semirrígidas realizadas con el software ANSYS APDL. El comportamiento de los tornillos en las uniones semirrígidas fue estudiado por Wu Z et al. [14]. Posteriormente, al incrementarse el uso del método de elementos finitos en el diseño de estructuras metálicas, Abambres M. y Arruda MR. [15] proporcionan una revisión extensa de guías sobre modelado, simulación y validación de resultados.

En el presente trabajo se describe un modelo paramétrico de elementos finitos propuesto por los autores, que recoge recomendaciones de otros autores, su validación con resultados existentes en

la bibliografía y su aplicación en el estudio de uniones atornilladas viga-columna con chapa frontal, simétricas y rigidizadas. En el presente trabajo el modelo se aplica a 10 casos, para los cuales se obtuvieron las curvas Momento-Rotación, así como los valores característicos de rigidez inicial y momento último. La geometría y materiales utilizados corresponden a los comúnmente empleados y disponibles en el mercado peruano.

## 2. Modelo propuesto

El modelo propuesto consta de la geometría de la unión y sus restricciones, del mallado, de las condiciones de contorno, del modelo de material utilizado, de las consideraciones adicionales, así como de su parametrización y automatización.

### 2.1. Geometría de la unión

La unión semirrígida objeto de estudio consta de los siguientes componentes: columna, viga, chapa frontal, tornillos y rigidizadores. Las dimensiones de la viga y la columna son obtenidas de los perfiles W considerados, los cuales a la vez servirán para determinar las dimensiones de la chapa frontal y de los rigidizadores. Respecto de los tornillos, la unión consta de filas internas que pueden variar de dos a seis hileras; además, hay dos filas adicionales, una por encima y la otra por debajo de la viga. En la Figura 3 se pueden observar las dimensiones necesarias para la parametrización de la unión y en la Tabla 1 se define la simbología correspondiente.

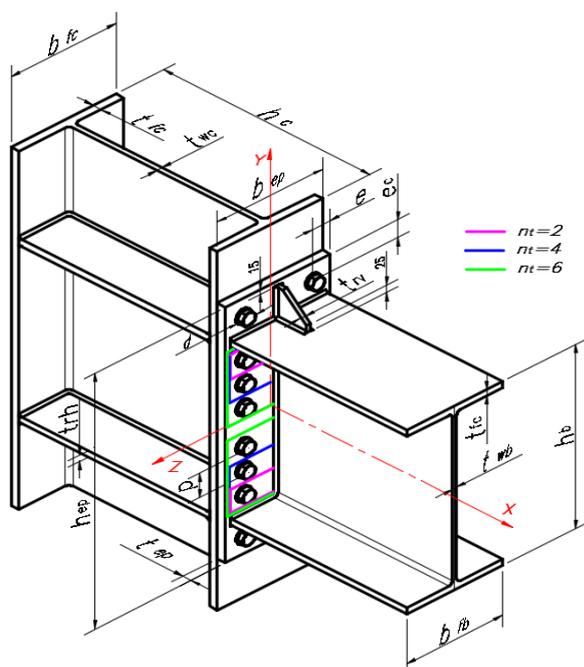


Figura 3: Unión semirrígida parametrizada

Dado que con el presente modelo se desean analizar múltiples combinaciones viga-columna, se consideraron las siguientes restricciones:

$$t_{wc}/t_{wb} > 1 \quad ; \quad \text{espesores} < 27 \text{ mm}$$

$$t_{fc}/t_{fb} > 1 \quad ; \quad t_{fc}/t_{fb} \leq 2.5 \text{ a } 3$$

$$b_{fb}/b_{fc} > 0.75 \quad ; \quad b_{fb}/b_{fc} \leq 1$$

$$W_{pl,y,b}/W_{pl,y,c} > 0.5 \quad ; \quad W_{pl,y,b}/W_{pl,y,c} \leq 1.2$$

$$i_{y,b}/i_{y,c} > 1 \quad ; \quad i_{y,b}/i_{y,c} \leq 1.5$$

Tabla 1: Simbología utilizada para parametrizar las dimensiones de los elementos de la unión

Parámetro	Descripción
$b_{ep}$	Ancho de la chapa
$b_{fb}$	Ancho del ala de la viga
$b_{fc}$	Ancho del ala de la columna
$d$	Diámetro nominal del tornillo
$d_0$	Diámetro del agujero del tornillo
$e$	Distancia entre el centro del tornillo y el vértice lateral de la chapa
$e_c$	Distancia entre el centro del tornillo y el vértice superior de la chapa
$h_b$	Altura de la viga
$h_c$	Altura de la columna
$h_{ep}$	Altura de la chapa
$i_{y,b}$	Radio de giro de la viga en el eje "y"
$i_{y,c}$	Radio de giro de la columna en el eje "y"
$p$	Distancia entre tornillos internos
$t_{ep}$	Espesor de la chapa
$t_{fb}$	Espesor del ala de la viga
$t_{fc}$	Espesor del ala de la columna
$t_{hb}$	Espesor de la cabeza del tornillo
$t_{nb}$	Espesor de la tuerca
$t_{rh}$	Espesor del rigidizador de la columna
$t_{rv}$	Espesor del rigidizador en la viga con la chapa
$t_w$	Espesor de la arandela
$t_{wc}$	Espesor del alma de la columna
$t_{wb}$	Espesor del alma de la viga
$n_t$	Número de filas internas de tornillos
$W_{pl,y,b}$	Módulo resistente de la viga en el eje y-y
$W_{pl,y,c}$	Módulo resistente de la columna en el eje y-y

Las dimensiones de los rigidizadores y de la chapa frontal se definieron por las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned} t_{rh} &= t_{fb} & t_{rv} &= t_{wb} \\ e_c &= 2 * d_0 & e &= 2 * d_0 \\ p &= 3 * d_0 & t_{ep} &= t_{fc} \end{aligned}$$

Para el modelamiento de los tornillos se utilizó un modelo similar al propuesto de Wu Z. et al. [14], que ofrece resultados más próximos a los resultados experimentales en comparación con las propuestas formuladas por otros autores. La geometría del tornillo presenta la cabeza y la tuerca de forma cilíndrica, el vástago se divide en dos tramos cilíndricos con diferentes diámetros. El

tramo con mayor diámetro corresponde a la parte sin roscar y el tramo con menor diámetro a la parte roscada. Por otro lado, las arandelas son modeladas sin considerar su holgura con los tornillos, formando en conjunto un solo sólido. En la Figura 4 se pueden apreciar los parámetros utilizados para el modelamiento de los tornillos.

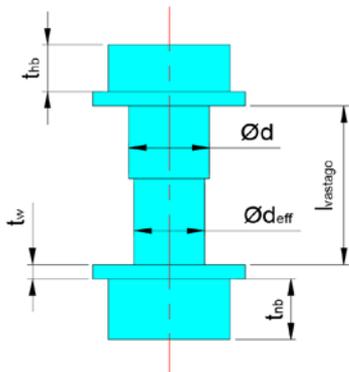


Figura 4: Geometría del tornillo utilizada para la simulación

Se consideró que la soldadura que une los rigidizadores con la columna y la viga es en ángulo y continua, para evitar el efecto de concentración de esfuerzos. Además, el área transversal del cordón de soldadura es modelada como un triángulo isósceles recto.

## 2.2. Mallado

Para obtener una malla estructurada se dividieron convenientemente los volúmenes de los diferentes componentes. En las zonas más cercanas al contacto entre la chapa frontal y el ala de la columna se realizó un mallado más fino. Todos los volúmenes fueron mallados con el elemento SOLID186, que es un elemento sólido tridimensional, de 20 nodos, cuadrático [16]. Este elemento es adecuado para el análisis estructural no lineal, presente en el estudio de las uniones semirrígidas, ya que las deformaciones que se desarrollan alcanzan el rango plástico.

Las superficies en contacto deben ser malladas con elementos especiales. Los contactos se producen entre los siguientes componentes:

- Chapa frontal y ala de la columna
- Chapa frontal y arandela
- Ala de la columna y arandela
- Diámetro mayor de tornillo y agujero chapa
- Diámetro menor de tornillo y agujero columna

Para modelar estos contactos se utilizaron los elementos CONTA174 y TARGE170, que son adecuados para el análisis de contacto entre superficies en estructuras tridimensionales [16].

Por otro lado, para considerar la pretensión en los tornillos, se define una sección en cada tornillo que se enmalla con elementos PRETS179. Estos elementos tienen un solo grado de libertad, que es el desplazamiento en la dirección de la fuerza de pretensión aplicada.

Finalmente, se utilizó un elemento puntual MASS21, cuyo nodo tiene 6 grados de libertad, para la aplicación de la carga externa sobre la viga. Los detalles sobre la carga se explican en el siguiente acápite.

## 2.3. Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno están dadas por las cargas externas aplicadas, las restricciones de desplazamientos y la simetría del modelo, las cuales se describen a continuación.

Se aplicó una fuerza externa vertical, en el elemento puntual, conectado a la cara de la viga como se representa en la Figura 5. Esta forma de aplicar la carga evita los efectos locales (esfuerzos, deformaciones) que se producirían si la fuerza se aplicara directamente sobre la viga.

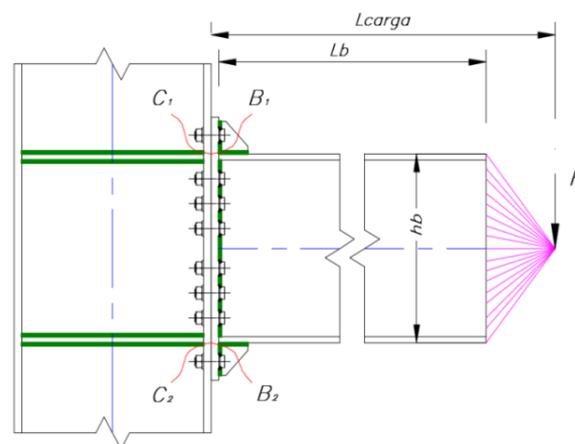


Figura 5: Esquema de aplicación de la carga externa

En la cara inferior de la columna se restringió el desplazamiento en la dirección de su eje, es decir, en dirección vertical. En la zona de los rigidizadores superiores e inferiores de la columna, se restringió el desplazamiento en la dirección del eje de la viga, es decir, en dirección horizontal.

Se aprovechó la simetría del problema para disminuir el costo computacional. Esto gracias a que la unión con chapa frontal es simétrica con respecto del plano XY definido y la carga externa aplicada actúa en dicho plano. En tal sentido se aplicó una restricción de desplazamiento en la dirección del eje Z en todas las caras pertenecientes al plano de simetría.

En la Figura 6 se puede apreciar la malla del modelo de elementos finitos desarrollado, considerando todas las restricciones de desplazamiento, la carga externa aplicada y la condición de simetría.

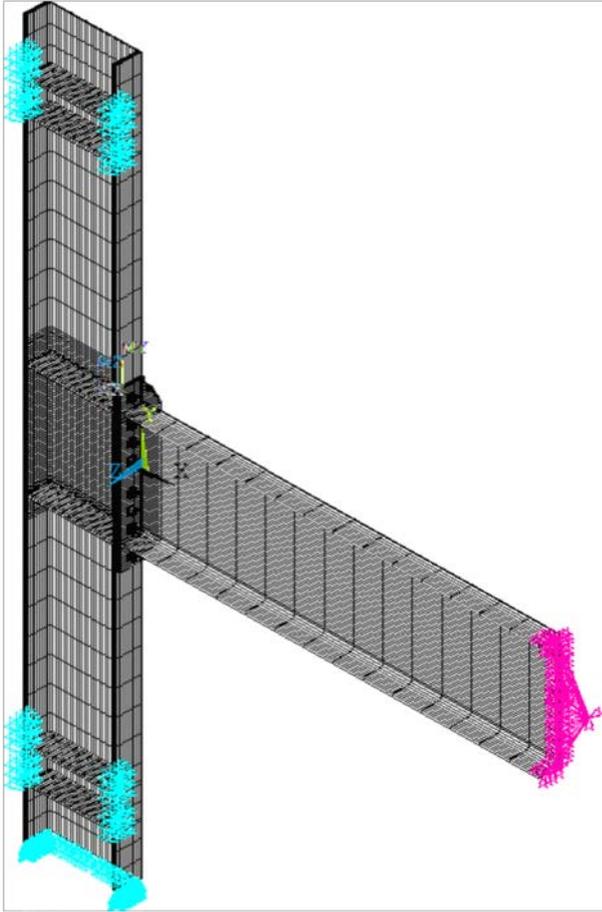


Figura 6: Modelo de elementos finitos de la unión semirrígida

## 2.4. Modelo de material

Para el comportamiento del material de los componentes de la unión se utilizó un modelo elasto-plástico, con el criterio de fluencia de von Mises y la regla de endurecimiento cinemático trilineal, similar al planteado por Díaz et al. [13], el cual es representado en la Figura 7.

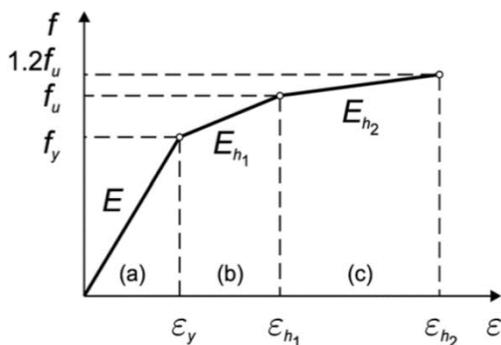


Figura 7: Curva esfuerzo-deformación del material [13]

Donde:

$$E_{h1} = \frac{E}{50} \quad E_{h2} = \frac{E_{h1}}{10}$$

## 2.5. Consideraciones adicionales

Para desarrollar las simulaciones las cargas se aplicaron en 4 etapas, de acuerdo con las sugerencias de Díaz et al. [13], las cuales se describen a continuación y se representan en la Figura 8.

- 1) Aplicar la fuerza de pretensión  $P$  en los tornillos
- 2) Aplicar gradualmente la fuerza externa puntual  $F$  hasta generar un momento en la unión igual a  $2M_{j,Rd}/3$  (momento de diseño según Eurocódigo 3 [6]).
- 3) Descargar gradualmente la fuerza externa puntual  $F$  hasta que la fuerza de pretensión  $P$  sea nula.
- 4) Reaplicar la fuerza externa puntual  $F$  hasta generar el momento último en la unión ( $M_{j,U}$ ).

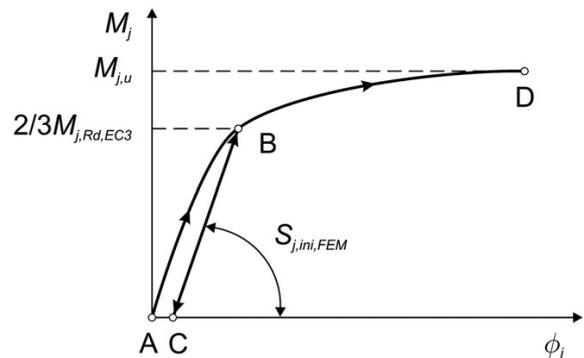


Figura 8: Proceso de carga. Pretensión (A), fuerza externa (A-B), descarga (B-C), recarga (C-D) [13]

El momento  $M$  aplicado en la unión es calculado mediante la multiplicación de la fuerza externa  $F$  y la distancia entre el punto de aplicación de la carga y la cara de la chapa en contacto con la columna (Figura 5).

$$M = F * L_{carga}$$

El momento último de la unión se obtiene cuando la deformación de cualquiera de sus componentes alcanza el valor del alargamiento límite del material, que se define para el tornillo y demás componentes por las siguientes expresiones.

$$\begin{aligned} \varepsilon_{b,máx} &= \varepsilon_{b,ult} \\ \varepsilon_{p,máx} &= \varepsilon_{p,ult} \end{aligned}$$

Donde:

$\varepsilon_{b,ult}$ : Deformación límite del material del tornillo.

$\varepsilon_{p,ult}$ : Deformación límite del material de los demás componentes de la unión.

$\varepsilon_{b,máx}$ : Deformación actuante máxima del tornillo.

$\varepsilon_{p,máx}$ : Deformación actuante máxima de los demás componentes de la unión.

El ángulo de rotación de la unión ( $\phi$ ) se obtiene de la suma del ángulo de rotación de la chapa frontal ( $\phi_{ep}$ ) más el ángulo de rotación de la columna ( $\phi_s$ ), como se puede apreciar en la Figura 9. Para determinar estos ángulos se procedió a definir 4 puntos referenciales en el modelo, 2 de los cuales pertenecen a la columna y los otros 2 a la chapa frontal. Se midieron sus desplazamientos y se utilizó las siguientes expresiones.

$$\phi_s = \text{atan}\left(\frac{U_{C_1} - U_{C_2}}{h_b}\right)$$

$$\phi_{ep} = \text{atan}\left(\frac{U_{B_1} - U_{B_2}}{h_b}\right)$$

$$\phi = \phi_s + \phi_{ep}$$

Dónde:

$U_{C_1}$ : Desplazamiento horizontal del punto  $C_1$

$U_{C_2}$ : Desplazamiento horizontal del punto  $C_2$

$U_{B_1}$ : Desplazamiento horizontal del punto  $B_1$

$U_{B_2}$ : Desplazamiento horizontal del punto  $B_2$

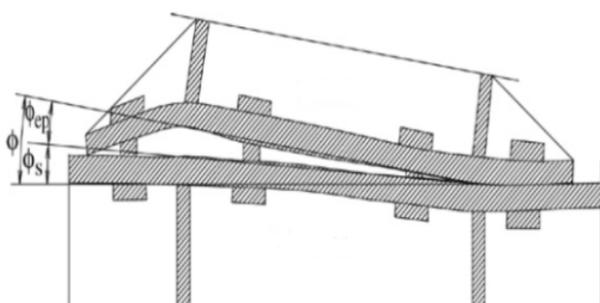


Figura 9: Definición del ángulo de rotación de la unión [12]

## 2.6. Parametrización y automatización

Como ya se mencionó, con el modelo propuesto se pretende analizar múltiples combinaciones viga-columna, para ello es necesario parametrizar y automatizar el proceso de simulación. En tal sentido, los autores implementaron el modelo descrito a través de macros en el entorno del software ANSYS Mechanical APDL.

En un archivo independiente se definen los parámetros geométricos de la unión semirrígida, que son leídos por la macro principal. Este archivo

es el único que se modifica en dependencia de la combinación viga-columna y del número de filas internas de tornillos. Las propiedades mecánicas de los materiales se definen también en un archivo independiente, que eventualmente se puede modificar si se desean evaluar otros materiales. Esto ha sido útil, por ejemplo, para validar el modelo, pues los resultados experimentales de la referencia se basan en materiales distintos a los que se enfoca el presente estudio (mercado peruano).

## 3. Análisis de sensibilidad de malla

Para evaluar la independencia de los resultados con respecto a la malla utilizada, se probó el modelo propuesto con diferentes densidades de malla, para tratar de reproducir los experimentos desarrollados por Shi YJ. et al. [12]. El análisis de sensibilidad se realizó mediante de dos pruebas diferentes.

En la primera prueba se fijó el momento aplicado en un valor constante de 267 kN·m, que corresponde al momento con el que se calcula la rigidez rotacional inicial ( $S_{j,ini}$ ) del espécimen 4 (EPC-4). En la Figura 10 se muestra cómo varía el valor del ángulo de giro en función del número de elementos de la malla. Se puede observar que a medida que aumenta el número de elementos, el ángulo de rotación calculado por simulación converge a un valor casi constante, cercano al experimental (color rojo, línea inferior).

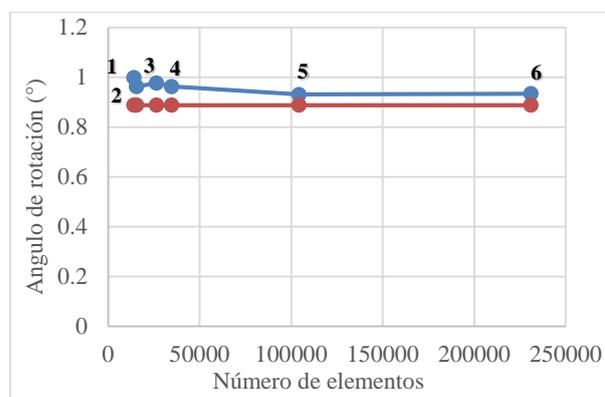


Figura 6: Ángulo de giro en función del número de elementos (momento constante)

En la Tabla 4 se muestran las características de las 6 mallas evaluadas.

Tabla 2: Características de las mallas evaluadas

Malla	Elementos	Nodos	Grados de libertad
1	14151	68479	205437
2	15483	76943	230829
3	26421	135625	406875
4	34601	180661	541983
5	104279	546854	1640562
6	230901	1089699	3269097

La segunda prueba consistió en obtener la curva Momento-Rotación con las diferentes mallas evaluadas, variando la carga aplicada. En la Figura 11 se comparan estas curvas con la curva experimental, observándose que las curvas obtenidas por simulación prácticamente coinciden y están muy próximas a la curva experimental (color rojo, curva más alta).

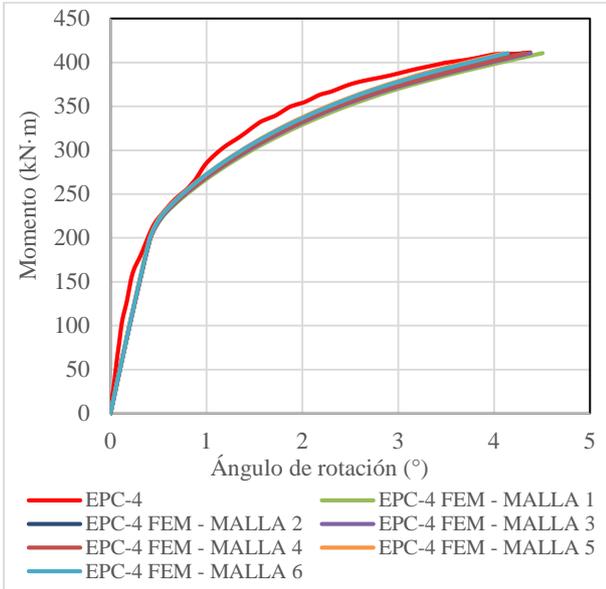


Figura 7: Curvas Momento-Rotación del EPC-4 (experimental y obtenidas por simulación)

Luego de analizar ambas pruebas se determinó utilizar la malla 5, pues su número de elementos es prudente y se alcanza mayor precisión en la primera prueba. Esta malla será igual para cualquier combinación viga-columna que se analice, sólo variará su escala (tamaño de los elementos) en dependencia del tamaño de los perfiles utilizados.

#### 4. Validación del modelo propuesto

La validación se realizó en base a los resultados experimentales obtenidos por Shi YJ. et al. [12]. Las propiedades de los materiales y la fuerza de pretensión utilizados se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3: Propiedades de los materiales [12]

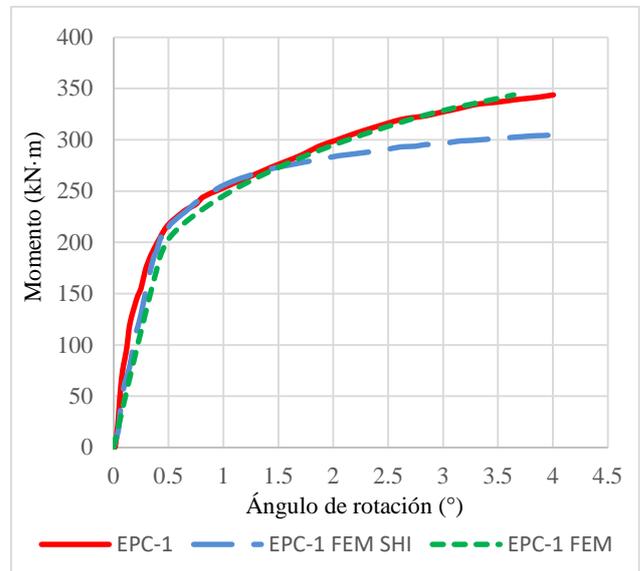
Material	Esfuerzo Fluencia (MPa)	Esfuerzo Tracción (MPa)	Módulo de Elasticidad (MPa)	Pretensión tornillos (kN)
Acero Q345 (esp≤16)	391	599	190707	-
Acero Q345 (esp>16)	363	537	204228	-
Tornillos (M20)	995	1160	-	155
Tornillos (M40)	975	1188	-	225

Los parámetros geométricos de los 5 especímenes evaluados se detallan en la Tabla 4.

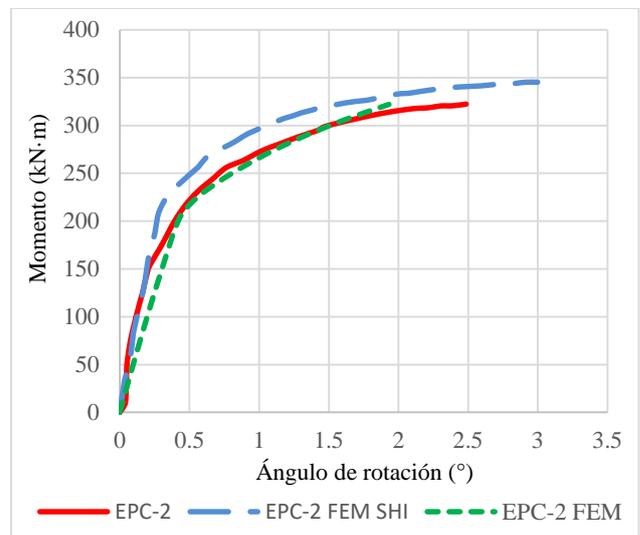
Tabla 4: Detalles de los especímenes evaluados [12]

Nº Esp.	Espesor de la chapa (mm)	Diámetro del tornillo (mm)	Momento Máx. (kN·m)
EPC1	20	20	343.7
EPC2	25	20	322.1
EPC3	20	24	390.3
EPC4	25	24	410.8
EPC5	16	20	355.4

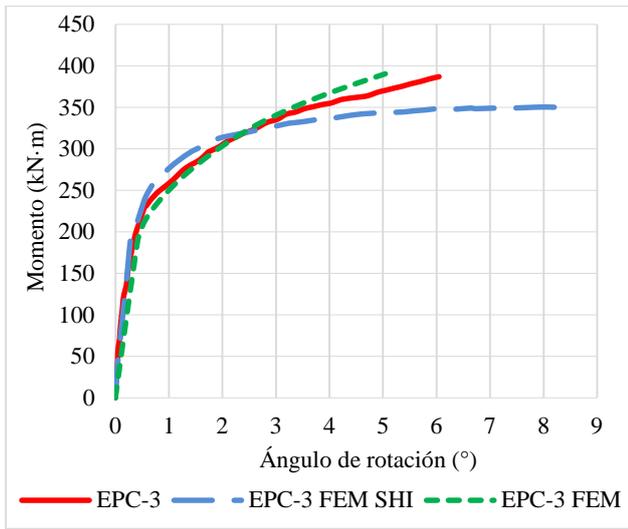
Utilizando las macros desarrolladas se obtuvieron las curvas “Momento-Rotación” de la Figura 12 a), b), c), d) y e). En estos gráficos se aprecian los resultados experimentales (color rojo) junto a los resultados numéricos obtenidos por los autores de la referencia (color celeste) y a los resultados obtenidos en el presente trabajo (color verde).



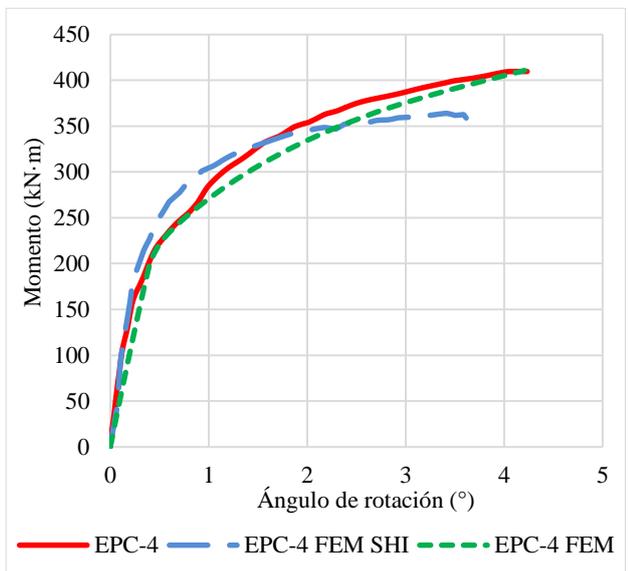
a) EPC-1



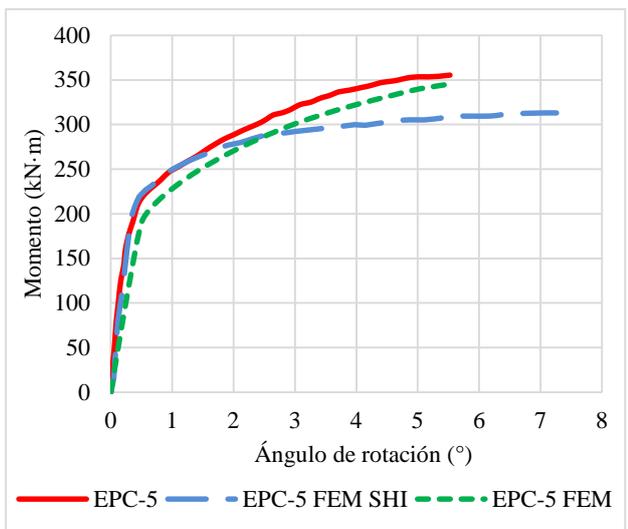
b) EPC-2



c) EPC-3



d) EPC-4



e) EPC-5

Figura 8: Curvas Momento-Rotación (experimental, FEM referencia y FEM presente trabajo)

Por otro lado, en la Figura 13 se presenta una comparación cualitativa de la unión deformada experimental con la obtenida mediante simulación numérica, correspondiente al espécimen EPC-4. Se aprecia deformación en el ala inferior de la viga, así como en la zona de contacto entre la chapa frontal y la columna, incluyendo una separación a la altura del ala superior de la viga.

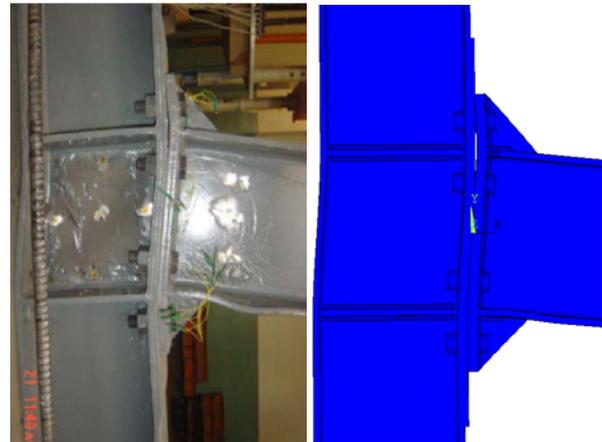


Figura 9: Comparación cualitativa entre resultado experimental (izquierda) y la simulación numérica (derecha)

Luego de analizar los gráficos, se puede apreciar que las curvas del modelo numérico, planteado en el presente trabajo, son muy cercanas a las obtenidas experimentalmente. Por otro lado, el comportamiento de la unión, determinado por la simulación, es cualitativamente similar al comportamiento experimental. De este modo podemos validar el modelo propuesto.

## 5. Aplicación del modelo

El modelo propuesto se aplicó en el análisis del comportamiento de 10 combinaciones viga-columna, indicadas en la Tabla 5. La longitud de la columna para todas las combinaciones fue de 2 metros, mientras que la longitud de la viga ( $L_b$ ) fue de 1.4 metros y la longitud donde se aplicó la carga ( $L_{carga}$ ) fue de 1.5 metros.

Tabla 5: Combinaciones viga-columna analizadas

Nº Comb.	Columna	Viga	Nº Esp.
1	W 310 x 165 x 44.5	W 360 x 130 x 32.9	P001
2		W 410 x 140 x 38.8	P002
3	W 310 x 200 x 60	W 310 x 165 x 38.7	P003
4		W 410 x 180 x 53	P004
5	W 310 x 200 x 74	W 310 x 165 x 44.5	P005
6		W 410 x 180 x 67	P006
7	W 310 x 250 x 86	W 360 x 200 x 64	P007
8		W 360 x 200 x 72	P008
9	W 310 x 310 x 129	W 360 x 250 x 110	P009
10		W 410 x 260 x 100	P010

En la Tabla 6 se muestran los detalles de las 10 combinaciones analizadas.

Tabla 6: Detalles de los especímenes analizados

Nº Esp.	Espesor de la chapa (mm)	Diámetro del tornillo (mm)	Número de filas internas de tornillos	Momento Máx. (kN·m)
P001	11.2	16	4	163.3
P002	11.2	16	6	218.2
P003	13.1	20	4	189.8
P004	13.1	20	4	318.4
P005	16.3	20	4	219
P006	16.3	20	4	412.6
P007	16.3	27	2	354.3
P008	16.3	27	2	396.4
P009	20.6	27	2	634.1
P010	20.6	27	2	661

El material de la viga y de la columna se tomó como acero ASTM A572 Grado 50, debido a que es el acero comúnmente utilizado en el diseño de estructuras metálicas en el Perú, por su alta resistencia a condiciones sísmicas. Por otro lado, para el material de los tornillos se tomó el acero ASTM A325. Cabe resaltar que se consideró el mismo material de la viga y columna para las soldaduras y los rigidizadores. En la Tabla 7 se presentan las propiedades de los materiales utilizados.

Tabla 7: Propiedades de los materiales

Material	Esfuerzo fluencia mín. (MPa)	Esfuerzo tracción mín. (MPa)	Alargamiento Min (%)	Módulo Elástico (MPa)
ASTM A572 Grado 50	345	450	18	210000
ASTM A325	<M27	634.3	827.4	
	M27	558.5	723.9	

En la Figura 14 se presentan las curvas Momento-Rotación obtenidas tras la simulación de los 10 casos analizados. Mientras que en la Figura 15 a), b), c) y d) se muestra el resultado cualitativo de 4 simulaciones. En la Figura 16 a), b), c) y d) se presentan los esfuerzos de Von Mises generados en los componentes de chapa frontal y los tornillos, para las mismas 4 simulaciones.

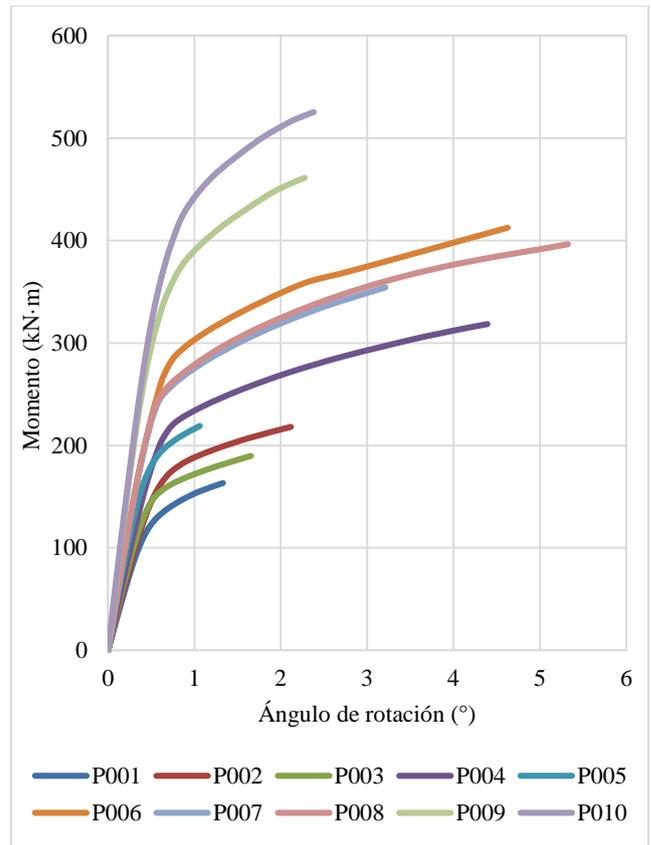


Figura 10: Curvas Momento-Rotación de las 10 uniones semirrígidas analizadas

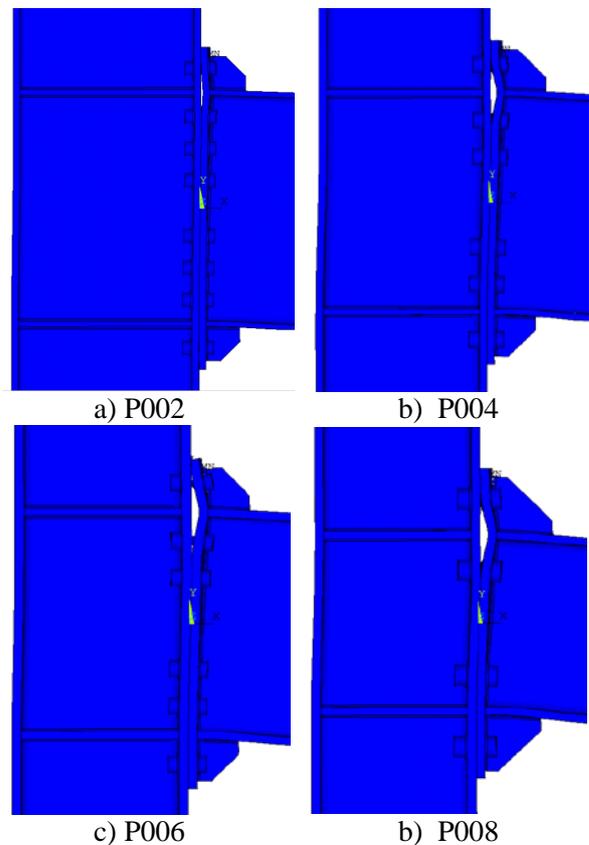


Figura 11: Resultados del comportamiento de la unión obtenidos por simulación numérica.

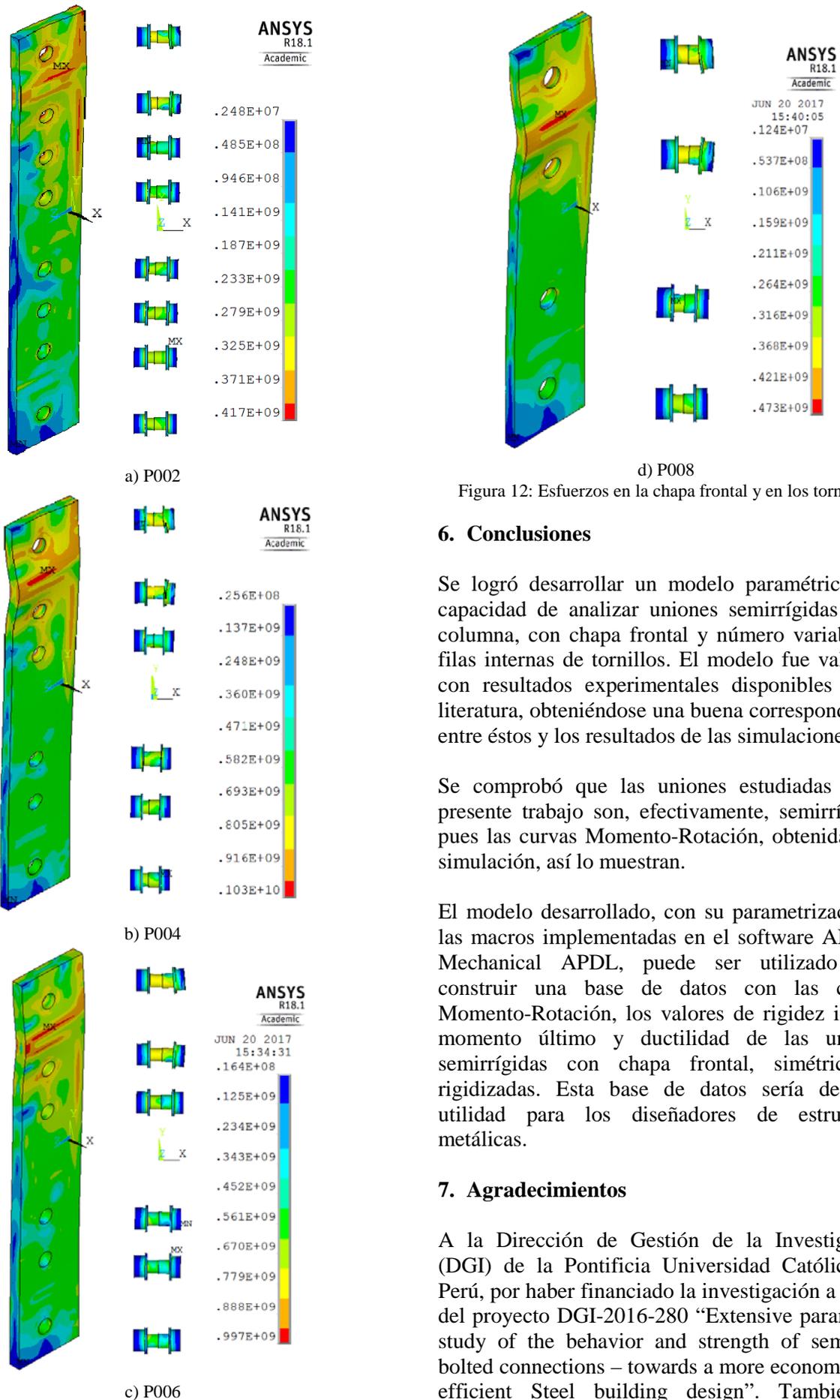


Figura 12: Esfuerzos en la chapa frontal y en los tornillos

## 6. Conclusiones

Se logró desarrollar un modelo paramétrico con capacidad de analizar uniones semirrígidas viga-columna, con chapa frontal y número variable de filas internas de tornillos. El modelo fue validado con resultados experimentales disponibles en la literatura, obteniéndose una buena correspondencia entre éstos y los resultados de las simulaciones.

Se comprobó que las uniones estudiadas en el presente trabajo son, efectivamente, semirrígidas, pues las curvas Momento-Rotación, obtenidas por simulación, así lo muestran.

El modelo desarrollado, con su parametrización y las macros implementadas en el software ANSYS Mechanical APDL, puede ser utilizado para construir una base de datos con las curvas Momento-Rotación, los valores de rigidez inicial, momento último y ductilidad de las uniones semirrígidas con chapa frontal, simétricas y rigidizadas. Esta base de datos sería de gran utilidad para los diseñadores de estructuras metálicas.

## 7. Agradecimientos

A la Dirección de Gestión de la Investigación (DGI) de la Pontificia Universidad Católica del Perú, por haber financiado la investigación a través del proyecto DGI-2016-280 “Extensive parametric study of the behavior and strength of semirigid bolted connections – towards a more economic and efficient Steel building design”. También es apreciada la colaboración de otros integrantes del Grupo de Investigación Asistida por Computadora

(INACOM) que contribuyeron con sus aportes al desarrollo del presente trabajo.

## 8. Referencias

- [1] Castillo L, “Estructuras Metálicas: Eficiencia de Acero”, *Rumbo Minero*, **98**: 238-249, 2016.
- [2] www.yanacocha.com, consulta: 02/09/2016
- [3] Ostrowski K, Kozłowski A, “FEM based assessment of the rotation capacity of bolted joints”, *Recent Progress in Steel and Composite Structures: Proceedings of the XIII International Conference on Metal Structures*, 479-487, 2016
- [4] “Norma de estructuras E.090. Estructuras metálicas”, Reglamento Nacional de Edificaciones, Perú, 2006.
- [5] American Institute of Steel Construction (AISC), “Flush and Extended Multiple-Row Moment End-Plate Connections”, Steel Design Guide series 16, 2003.
- [6] European Standards (EN), “Eurocode 3: Design of steel structures: Part 1.8 Design of joints”, 2002.
- [7] Bose SK, McNeice GM, Sherbourne AN, “Column webs in steel beam to column connections. Part I: formulation and verification”, *Computers Structures*, **2**: 253-272, 1972.
- [8] Krishnamurthy N, Graddy DE, “Correlation between 2- and 3-dimensional finite element analysis of steel bolted end-plate connections”, *Computers Structure*, **6**: 381-389, 1976.
- [9] Bursi OS, Jaspart JP, “Basic issues in the finite element simulation of extended end plate connections”, *Computers Structure*, **69**: 361-382, 1998
- [10] Bahaari MR, Sherbourne AN, “Behaviour of eight-bolt large capacity endplate connections”, *Computers Structure*, **77**: 315-325, 2000.
- [11] Maggi YI, Gonçalves RM, Leon RT, Ribeiro LFL, “Parametric analysis of steel bolted end plate connections using finite element modelling”, *Journal of Constructional Steel Research*, **61**: 689-708, 2005.
- [12] Shi YJ, Shi G, Wang YQ, “Experimental and theoretical analysis of the moment–rotation behaviour of stiffened extended end-plate connections”, *Journal of Constructional Steel Research*, **63**: 1279-1293, 2007.
- [13] Díaz C, Victoria M, Martí P, Querin OM, “FE model of beam-to-column extended end-plate joints”, *Journal of Constructional Steel Research*, **67**: 1578-1590, 2011.
- [14] Wu ZQ, Zhang SM, Jiang SF, “Simulation of Tensile Bolts in Finite Element Modeling of Semi-rigid Beam-to-column Connections”, *International Journal of Steel Structures*, **12**: 339-350, 2012.
- [15] Abambres M, Arruda MR, “Finite element analysis of steel structures – a review of useful guidelines”, *International Journal of Structural*, **7**: 490-515, 2006.
- [16] ANSYS, Inc. “ANSYS Mechanical APDL Element Reference”, 2013.
- [17] ANSYS, Inc. “Mechanical APDL Command Reference”, 2013.