



**Universidad de Valladolid**



**ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES**

**UNIVERSIDAD DE VALLADOLID**

**ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES**

**Grado en Ingeniería Mecánica**

# **Dimensionado de un pórtico considerando el efecto de las uniones semirrígidas**

Autor:

**Gil Rodríguez, Jesús**

Tutores:

**Magdaleno González, Álvaro  
García García, Ismael**

Departamento de Construcciones  
Arquitectónicas, Ingeniería del  
Terreno, Mecánica de los Medios  
Continuos y Teoría de Estructuras

**Valladolid, Julio de 2024**



## Agradecimientos

A mis padres, por estar siempre ahí, por enseñarme que todo el trabajo tiene su recompensa y por todo el tiempo y esfuerzo que han invertido durante años para conseguir que haya llegado hasta aquí.

A Ángela, por ayudarme y aguantarme en los días malos, y hacer que este camino sea más fácil de recorrer.

A mis amigos, a los de toda la vida y a los que he conocido en mi paso por la universidad, por hacer más divertidos estos años de esfuerzo.

A mis tutores, por guiarme en este trabajo y ayudarme en los últimos pasos en el grado.



## Resumen

La optimización en el diseño de estructuras metálicas implica una utilización más eficiente de las uniones entre los elementos. Para aprovechar completamente sus características mecánicas resistentes es necesario un cálculo más preciso que el obtenido considerando las uniones completamente rígidas o articuladas.

A lo largo de este Trabajo de Fin de Grado se calculará la rigidez secante y se obtendrá el diagrama de rigidez de las uniones pilar-dintel de varios pórticos planos traslacionales, construidos con distintos perfiles metálicos. Se estudiarán varias uniones con distintas rigideces para después obtener los esfuerzos, tensiones y desplazamientos que aparecen en los casos de estudio planteados.

Con los resultados de cada caso se estudiará como afectan los cambios en la rigidez a la variación de los esfuerzos, tensiones y desplazamientos. Para facilitar la comprensión de los resultados, estos se presentarán en tablas y figuras comparativas.

**Palabras clave:** unión pilar-dintel, rigidez secante, IDEAStica, pórtico plano, diagrama de rigidez

## Abstract

The optimization in metallic structures design requires a more efficient performance to the joints between the components. To take advantage completely of its resistant properties is necessary a more precise estimation than the obtained with a fully rigid or articulated approach.

Along this Final Degree Project the secant stiffness and the stiffness diagram will be obtained for the joints between pillar and beam in some translational flat frames, built up with different metallic frames. Several joints with different stiffness will be analyzed to obtain forces, stresses and displacements that appear in the cases raised.

After the result of each case is obtained, the changes in forces, stresses and displacements will be compared with the changes in the stiffness. With the aim of ease the understanding of the results, they will be shown in comparative tables and figures.

**Key words:** pillar-beam joint, secant stiffness, IDEAStica, flat frame, stiffness diagram



# Índice

<b>Capítulo 1: Introducción .....</b>	<b>1</b>
1.1. Contexto y justificación .....	1
1.2. Antecedentes.....	2
1.3. Objetivos .....	7
1.4. Estructura del documento .....	8
<b>Capítulo 2: Metodología .....</b>	<b>9</b>
2.1. SAP2000 .....	11
2.1.1. Modelado de los pórticos .....	12
2.1.2. Semi-rigidez y giros .....	16
2.2. IDEAStica .....	18
2.2.1. Cálculo de Rigidez.....	19
2.2.2. Configuración de la norma .....	21
2.2.3. Modelado de las uniones .....	23
<b>Capítulo 3: Casos de estudio y resultados.....</b>	<b>35</b>
3.1. Cálculo de pórticos en SAP2000 .....	35
3.2. Cálculo de rigidez de uniones sin cartela.....	38
3.3. Cálculo de rigidez uniones con cartela .....	44
3.4. Resultados .....	49
<b>Capítulo 4: Conclusiones y líneas futuras.....</b>	<b>57</b>
4.1. Conclusiones.....	57
4.2. Líneas futuras.....	58

4.3. Consideraciones adicionales.....	59
<b>Referencias .....</b>	<b>61</b>
<b>Índice de figuras.....</b>	<b>63</b>
<b>Índice de tablas.....</b>	<b>69</b>
<b>Anexo: Despiece de las uniones.....</b>	<b>71</b>
Unión con IPE300 sin cartela.....	71
Unión con IPE330 sin cartela.....	73
Unión con IPE360 sin cartela.....	75
Unión con IPE300 con cartela.....	77
Unión con IPE330 con cartela.....	79
Unión con IPE360 con cartela.....	82

# Capítulo 1: Introducción

Las estructuras metálicas son parte indispensable de nuestras vidas. Cada vez son más utilizadas en cualquier contexto de edificación debido a su ligereza y resistencia, pudiéndose obtener grandes luces evitando el uso de columnas. El uso de este tipo de estructuras facilita la fabricación y montaje de los elementos, pudiendo fabricar todos ellos en taller y tan solo tener que ensamblarlos en obra. Además, ofrecen gran dinamismo a los proyectos, dado el poco tiempo necesario para su instalación.

Las uniones entre las vigas que forman parte de estas estructuras son parte fundamental del diseño, pues pueden suponer discontinuidades en la transmisión de esfuerzos y son la parte más delicada y a la vez compleja de calcular en un proyecto. Un fallo en una unión puede suponer el colapso completo de una estructura.

A la hora de realizar el cálculo global de una estructura es habitual realizar simplificaciones tomando los elementos como líneas que representan sus líneas medias. Esta simplificación se justifica en base a que la longitud de la viga es varios ordenes de magnitud mayor que el canto de la sección. Al hacer esta simplificación, las uniones entre las barras quedan reducidas a los puntos extremos de estas. Al tratarse de puntos, inicialmente puede parecer que sus características son poco relevantes para el comportamiento de la estructura, pero para nada es así. Un cambio en una unión puede cambiar completamente la distribución de esfuerzos de la estructura.

## 1.1. Contexto y justificación

En la actualidad, en un contexto de búsqueda de reducción de costes en los proyectos, a la vez que la utilización más eficiente de los recursos y los materiales, se plantea la cuestión de hacer más eficientes las estructuras metálicas. Las uniones entre los distintos componentes de las estructuras, debido a la complejidad de su cálculo, a menudo han sido fuentes de ineficiencias, estando sobredimensionadas y formadas por elementos que no aprovechan suficientemente sus características mecánicas.

Tradicionalmente, con el objeto de simplificar el cálculo estructural, las uniones se han clasificado como “rígidas”, donde el giro relativo entre los elementos es nulo, y “articuladas”, en las que ambos elementos pueden girar libremente uno con respecto al otro. El introducir esta simplificación en el cálculo conllevaba la necesidad de sobredimensionar las uniones si se consideraban rígidas, pues era prácticamente imposible calcular la rigidez de estas uniones sin potentes herramientas computacionales.

Con el paso de los años y el desarrollo de las herramientas de cálculo, se ha hecho más sencillo el cálculo preciso de la rigidez de las uniones. Esto hace que actualmente sea posible llegar a tener el comportamiento deseado en una unión, sin tener que sobredimensionarla, y que se aprovechen de un modo más eficiente las propiedades resistentes de sus elementos.

Teniendo en cuenta que las uniones pueden llegar a suponer un 40% del coste total de una estructura [1], calcularlas coherentemente, para que soporten de un modo suficiente las cargas, pero sin caer en el sobredimensionamiento puede ser crucial para rebajar los costes económicos y materiales.

El hecho de poder trabajar con la rigidez real de las uniones abre la posibilidad a cuantificar como se comportará una estructura ante cambios en la rigidez de una unión. Al disminuir la rigidez el momento que se transmitirá a través de ellas será también menor, con lo que será posible utilizar perfiles de menor sección. De esta forma se aprovecharán de un modo óptimo las características resistentes del material, pudiendo abaratar y aligerar la estructura.

## 1.2. Antecedentes

Hasta la década de 1930 no se había planteado los efectos de considerar la rigidez real de las uniones. A partir de estos años empezaron a surgir algunos estudios sobre la forma de incluir la rigidez de las uniones en el cálculo global de las estructuras, pero aún era complicado resolver las ecuaciones generadas por la escasa evolución de los ordenadores hasta ese momento.

A partir de los años 50 la capacidad de cálculo de los ordenadores aumentó, permitiendo resolver sistemas de ecuaciones más complejos que se planteaban al incluir la rigidez de las uniones. Fruto de estas investigaciones se incluyó una clasificación en función de la rigidez en la primera versión del Eurocódigo 3, aunque sin tratar su uso o cálculo. Hasta 2005 se siguieron realizando estudios, momento en el que se dedica una parte del Eurocódigo 3 al cálculo de uniones [2]. En los años más recientes, los trabajos sobre la rigidez en las estructuras se están encaminando a optimizar las uniones y estudiar la respuesta de nuevos tipos de uniones que se empiezan a desarrollar [3].

En líneas generales, las uniones admiten varios tipos de clasificaciones, bien sea por el tipo de elementos que unen, por su ejecución o por sus

características. Dejando de lado las clasificaciones físicas y dividiendo las uniones según sus características, aparecen dos clasificaciones principales: según su resistencia y según su rigidez.

La clasificación por resistencia hace referencia a la capacidad de la unión de soportar momentos en relación con los elementos que une. Esta clasificación se basa en establecer que elemento fallaría antes en el caso de que se sobrepasen las cargas para las que la unión ha sido diseñada. Por ello, esta clasificación se emplea a la hora de realizar el cálculo de las uniones en régimen plástico. Atendiendo a este criterio aparecen tres posibles clasificaciones [4]. La representación gráfica de esta clasificación aparece en la Figura 1.

*articuladas*: su resistencia a flexión es como máximo el 25% del momento plástico de cualquiera de los elementos que llegan a la unión

*de resistencia parcial*: su momento plástico es menor que, al menos, el de uno de los elementos de la unión.

*de resistencia completa*: su momento plástico es mayor que el de todos los elementos que llegan a la unión.

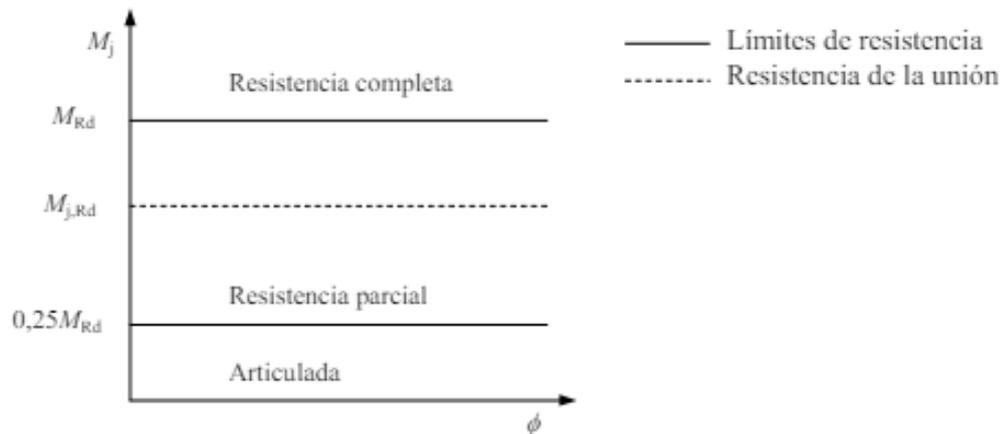


Figura 1: Límites para la clasificación por resistencia [2]

La clasificación según la rigidez hace referencia a la capacidad para transmitir el momento de una unión y el giro relativo que se produce entre sus elementos. Siguiendo este criterio aparecen tres posibles clasificaciones:

*articulaciones*: permiten el giro relativo entre los elementos sin que se desarrollen momentos en los extremos de las barras unidas que coarten la rotación.

*rígidas*: no permiten el giro entre los elementos que confluyen en la unión desarrollándose momentos en los extremos de las barras que se transmiten a través de la unión.

*semirrígidas*: uniones intermedias entre los casos anteriores. Permiten parcialmente el giro relativo de los elementos, pero también se desarrollan momentos a través de la unión [4].



Figura 2: Clasificación de las uniones según su rigidez [4]

Para simplificar la comprensión de esta clasificación se muestra la Figura 2, en la que se ve como en el caso de la unión semirrígida la deformada es un caso intermedio entre los dos anteriores.

La realidad es que todas las uniones son semirrígidas, ya que físicamente no es posible la existencia de uniones con rigidez nula o infinita. A pesar de esto, es posible considerar las uniones como rígida o articulada para simplificar el cálculo global de la estructura si la unión cumple algunas condiciones. Para poder clasificar la unión cuantitativamente se parte del diagrama de rigidez. El diagrama de rigidez de una unión es una gráfica momento-rotación, en la que se representa el giro entre los elementos en el eje de abscisas y el momento que soporta la unión en el eje de ordenadas.

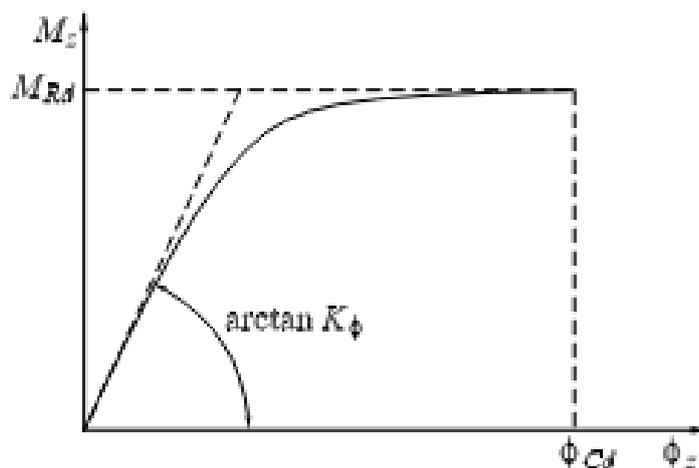


Figura 3: Curva momento-rotación [5]

La Figura 3 muestra una curva de rigidez genérica. La forma más exacta de obtener estas curvas es experimentalmente. Evidentemente, es imposible

abarcar toda la casuística de uniones existentes, dado que cada unión tiene distintas particularidades. Estos ensayos quedan relegados a validar los resultados de los cálculos realizados con los múltiples softwares disponibles [5].

En el diagrama de la Figura 3 se puede ver como la curva tiene dos zonas diferenciadas. El primer tramo abarca desde el inicio hasta aproximadamente dos tercios del momento resistente de la unión. En esta zona los incrementos en el momento se corresponden linealmente con aumentos en el giro. La pendiente de esta recta se conoce como rigidez inicial. A partir de ese valor, empieza a aparecer una zona no lineal en la curva, en la que cada vez hace falta menores incrementos en el momento para causar grandes variaciones en el giro.

Para trabajar con esta curva, han surgido distintas aproximaciones que simplifican el cálculo, ahorrando costes computacionales, a costa de perder precisión. Este tipo de aproximaciones se basan en sustituir la curva obtenida por rectas de pendiente conocida.

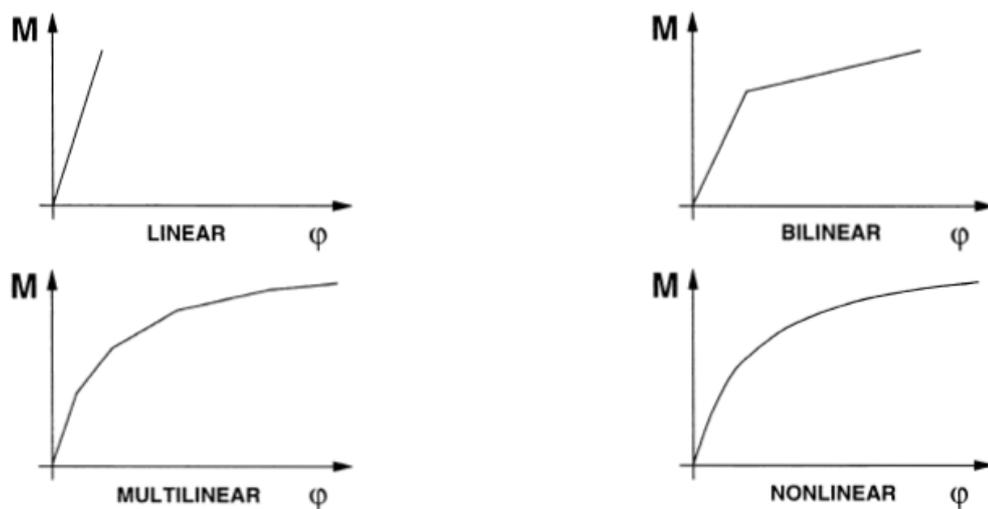


Figura 4: Representación de distintos tipos de aproximaciones [6]

En la Figura 4 se ven varios tipos de aproximaciones. Una primera aproximación sería con una sola línea, en la que solo se tiene en cuenta la rigidez inicial. Si se añade una segunda recta, se tiene en cuenta el tramo no lineal, aunque sin excesiva precisión. Si se añaden más rectas se aumenta la precisión del cálculo, pero sin aumentar tanto el coste computacional como si se utilizara la curva no lineal [6].

Sobre la curva es inmediato determinar la rigidez que tiene la unión. Basta con conocer el momento que soporta o el giro relativo entre los elementos y señalar la intersección de la curva con dicho valor para establecer el punto de trabajo de la unión. Uniendo este punto con el origen se obtiene una recta, cuya pendiente se obtiene con la ecuación 1. El valor de esta pendiente se conoce

como rigidez secante. La rigidez secante se corresponde con la rigidez inicial si la unión trabaja en el tramo lineal, pero puede variar significativamente si el punto de trabajo se encuentra en la zona no lineal.

$$S_{j,s} = \frac{M}{\theta_{rel}} \quad (1)$$

Para determinar la rigidez secante, no basta con conocer el momento que se ha obtenido de un cálculo global de la estructura. Al tener en cuenta la rigidez, el valor del momento obtenido cambiará, con lo que será necesario hacer un recálculo del momento y verificar si el valor de la rigidez es correcto. Si la rigidez secante está en la zona no lineal de la curva, las variaciones en la rigidez pueden hacer muy costoso el cálculo. Se han desarrollado estudios para obtener la rigidez secante de un modo directo, con una pérdida de precisión asumible, pero con gran ahorro de tiempo y cálculos [7].

Una vez obtenida la rigidez, se puede clasificar la unión como rígida, articulada o semirrígida. Para ello, se establecen límites de rigidez en función de la rigidez de la unión y del resto de la estructura. Estos límites se establecen comparando la rigidez inicial de la unión con unos valores de referencia establecidos por el Eurocódigo 3 [8]. Los valores límite se calculan teniendo en cuenta parámetros de la estructura, ya que el valor de la rigidez por sí solo no determina si una unión se puede considerar rígida o no. Para una misma rigidez, la unión puede clasificarse de distinta forma dependiendo de las características de los elementos que conecte. Por ejemplo, para un mismo giro relativo en una unión, si los elementos unidos son cortos la unión puede considerarse semirrígida, pero si su longitud aumentase podría pasar a considerarse rígida.

Para esta clasificación, se establece el límite para la clasificación en función de la rigidez inicial. El valor límite para poder considerar una unión rígida se establece según la ecuación 2.

$$S_{j,ini} \geq \frac{k_b E I_b}{L_b} \quad (2)$$

Y en el caso del límite de las uniones articuladas según la ecuación 3.

$$S_{j,ini} \leq \frac{0,5 E I_b}{L_b} \quad (3)$$

Donde:

$k_b = 8$  para pórticos de estructuras no traslacionales para acciones horizontales

$k_b = 25$  para otros pórticos, siempre que en cada planta se verifique que  $K_b/K_c \geq 0,1$

$k_b =$  valor medio de la relación  $E I_b/L_b$  de todas las vigas en la planta en la que se encuentre la unión

$K_c$ = valor medio de la relación  $EI_c/L_c$  de todos los pilares de la planta

$I_b$ = momento de inercia de cada viga

$I_c$ = momento de inercia de cada pilar en la dirección de flexión considerada

$L_b$ =luz (entre ejes de pilar) de cada columna

$L_c$ =altura de la planta

Estos valores solo tienen en cuenta la rigidez inicial de la unión, con lo que será necesario conocer también el punto de trabajo de la unión para verificar esta clasificación. La rigidez secante de la unión puede ser significativamente menor que el valor de la rigidez inicial y hacer que la clasificación obtenida no sea válida para la carga que soporta la unión.

Observando la ecuación 2, se ve que el coeficiente  $k_b$  tiene un valor arbitrario. Este coeficiente sirve para determinar si una unión se puede considerar o no rígida atendiendo a la carga crítica de pandeo. Para las clasificar las uniones como rígidas, la carga crítica de pandeo no debe disminuir más de un 5% con respecto a la que tendría la unión si fuese perfectamente rígida.

El valor del coeficiente  $k_b$  cambia en función de si el pórtico está arriostrado o no. En otras palabras, de si es o no traslacional. En el caso de que se considere no traslacional, los desplazamientos horizontales se reducen muy significativamente. A consecuencia de esto, el valor límite para considerar un nudo como rígido es menor para pórticos no traslacionales, como se puede ver en la Figura 5 [6].

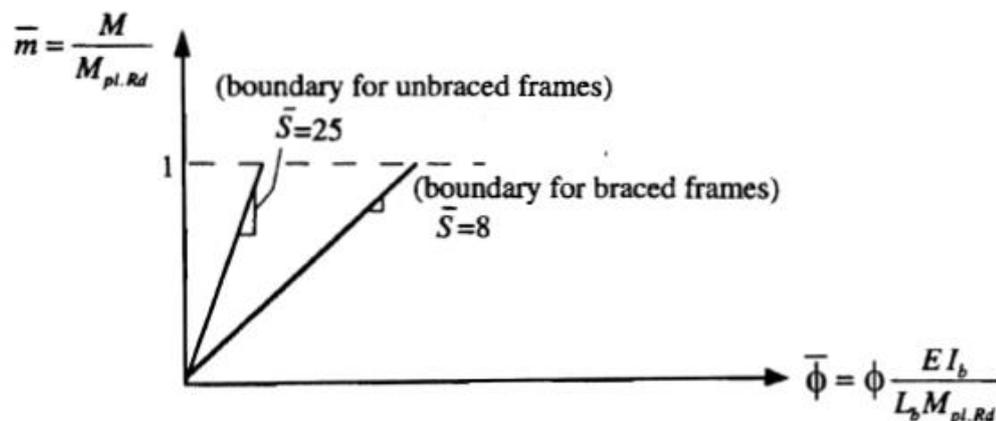


Figura 5: Límites para considerar una unión rígida en función de si la estructura es o no traslacional [6]

### 1.3. Objetivos

Tras lo expuesto anteriormente, a continuación, se detallan los objetivos que se persiguen con la realización de este trabajo.

- Estudiar la rigidez de distintas uniones en régimen elástico, y la influencia en esta del perfil que tengan los elementos que llegan a ella.
- Evaluar la variación de los resultados de esfuerzos, tensiones y desplazamientos entre uniones de estructuras con el mismo perfil, pero con distinta rigidez.
- Comparar los resultados de esfuerzos, tensiones y deformaciones de las estructuras con rigidez real con los obtenidos en estructuras con nudos idealmente rígidos e idealmente articulados.
- Adquirir los conocimientos necesarios para el modelado, cálculo e interpretación de resultados en un software específico para el análisis de la rigidez en uniones de estructuras metálicas.

## 1.4. Estructura del documento

El desarrollo del trabajo se estructurará en cuatro capítulos, cuyo contenido se resume a continuación, a excepción de este primer capítulo de introducción.

- El segundo capítulo tratará sobre el método de trabajo que se empleará. Se presentarán las herramientas informáticas que se emplearán a lo largo del trabajo, además de detallar el proceso de modelado de los pórticos y uniones con los que se trabajará.
- El tercer capítulo contendrá el proceso de estudio de las distintas uniones, así como las figuras correspondientes a los resultados de estos cálculos.
- En el cuarto y último capítulo se expondrán las conclusiones obtenidas a lo largo del trabajo, además de proponer algunas posibles líneas de estudio futuras

## Capítulo 2: Metodología

Para alcanzar los objetivos propuestos, a lo largo de este trabajo se van a analizar dos tipos de uniones desmontables, una unión pilar dintel simple y otra en la que se introducirá una cartela. Las uniones mostradas en la Figura 6 unirán el pilar y el dintel de un pórtico recto, en el que se utilizará el mismo perfil para pilares y dintel. Para comparar los resultados obtenidos del cálculo de las estructuras se modelarán varios pórticos cambiando la sección con la que se construyen entre IPE300, IPE330 e IPE360.

A lo largo del trabajo se utilizarán dos softwares para la obtención de los resultados. Será necesario contar con un software de cálculo global de estructuras, que permita calcular esfuerzos, tensiones y desplazamientos. Para ello se utilizará SAP2000. En cuanto a la obtención de la rigidez de las uniones, será necesario una herramienta de cálculo que permita modelar y calcular las mismas, para lo que se utilizará IDEASTatica.

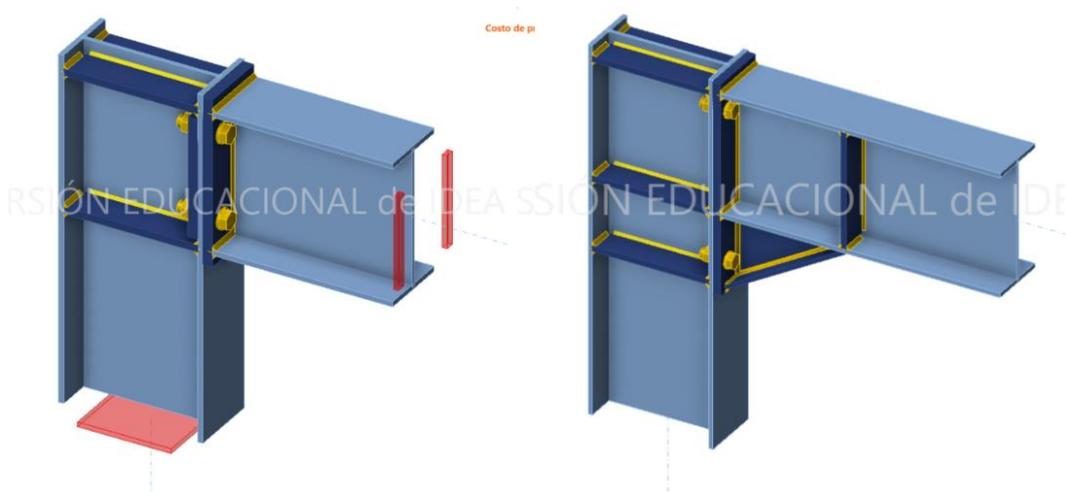


Figura 6: Uniones sin cartela y con cartela

En primer lugar, a fin de obtener los esfuerzos que soportarán las uniones, se modelarán las estructuras de las que formarán parte. Estas estructuras serán sencillas, para evitar complicar innecesariamente el cálculo. Se crearán tres pórticos rectos, cada uno estará compuesto por un solo tipo de perfil y estarán todos sometidos a la misma carga. El pórtico que se dimensionará tendrá 9 m

de altura y 18 m de luz, como se ve en la Figura 7. Además, el módulo de la nave se establece inicialmente en 6 m, esto es, la distancia entre dos pórticos consecutivos.

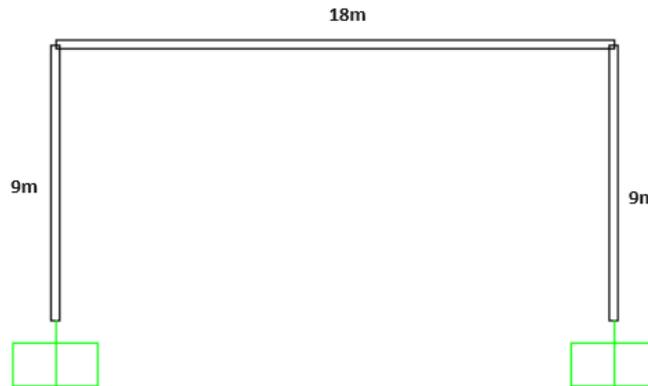


Figura 7: Pórtico acotado

Se supondrá un pórtico intermedio de una nave industrial, sin tener interacción con el resto de los pórticos, con lo que no aparecerán cargas fuera del plano del pórtico. Por simplicidad, solo se tendrá en cuenta la carga de uso que tendría la cubierta, que será de 1000 N/m. Esta carga es la que indica el CTE [9] para sobrecargas de uso en cubiertas que solo se usarán para mantenimiento.

Para facilitar la comparativa entre los resultados con los diferentes perfiles, no se tendrá en cuenta el peso propio del pórtico, que es pequeño frente a la carga de uso.

Perfil	Dimensiones							Agujeros			Peso p kp/m
	h mm	b mm	e mm	e <sub>1</sub> mm	r <sub>1</sub> mm	h <sub>1</sub> mm	u mm	w mm	a mm	e <sub>2</sub> mm	
IPE 300	300	150	7,1	10,7	15	249	1.160	80	23	7,1	42,20
IPE 330	330	160	7,5	11,5	18	271	1.250	85	25	7,5	49,10
IPE 360	360	170	8,0	12,7	18	299	1.350	90	25	8,0	57,10

Figura 8: Propiedades de perfiles [10]

El peso propio de los perfiles aparece en la última columna de la Figura 8, expresado en kp/m, lo que hace que, en el caso del perfil con mayor peso, se tenga un peso propio de 560 N/m, lo que es más de 10 veces menor que la carga y permite no tener en cuenta el peso propio sin gran alteración de los resultados.

Para el modelado y cálculo de la estructura será necesario el uso de un software de cálculo global de estructuras, que en este caso será en SAP2000.

---

En primer lugar, para tener referencias sobre el comportamiento de las estructuras al incluir la rigidez, se calcularán los casos extremos en cuanto a la rigidez de las uniones, con rigidez infinita y cero.

Después, para el modelado y cálculo de las uniones se utilizará un software específico para este fin, que será IDEASTatica. En este software se crearán las uniones y se realizará el cálculo de rigidez. Para tener una primera aproximación sobre el esfuerzo que llega a la unión, se utilizarán los obtenidos en SAP2000 en el caso de nudos rígidos. IDEASTatica dará, además de la curva de rigidez, el valor de la rigidez secante. Con este valor, se volverá a SAP2000 para recalcular los esfuerzos teniendo en cuenta que la unión no es infinitamente rígida. En las tablas en las que se muestran los resultados de las iteraciones solo se irá mostrando el valor del momento, si bien es necesario para el correcto cálculo introducir en IDEASTatica también los valores de axil y cortante.

Esto constituirá un proceso iterativo entre ambos softwares, que se realizará el número de iteraciones que sean necesarias para que la variación de momento y rigidez sea lo suficientemente pequeña entre iteraciones consecutivas para considerar que se ha obtenido la convergencia al punto de trabajo real de la unión. Al aparecer un cambio en la rigidez, esto hará que el momento cambie también, lo que puede inducir cambios en otros esfuerzos tensiones y desplazamientos.

El proceso descrito se realizará para cada una de las seis uniones, para después comparar los resultados obtenidos para cada una.

## 2.1. SAP2000

Como se ha mencionado en el apartado anterior el software que se utilizará para el cálculo global de las estructuras será SAP2000. La elección de este software se debe a que es el que se ha usado para las prácticas en las distintas asignaturas de Estructuras y Resistencia de materiales cursadas a lo largo del Grado en Ingeniería Mecánica, y del que se han obtenido conocimientos a lo largo de este tiempo.

Además, SAP2000 se adapta perfectamente al trabajo, pues permite calcular simultáneamente varias estructuras independientes a la vez. Añadido a esto, la interfaz es muy intuitiva haciendo posible dominar fácilmente los distintos comandos.

### 2.1.1. Modelado de los pórticos

Para el modelado de los pórticos el primer paso es crear la rejilla. Se usará el plano “xz”, ya que SAP2000 considera la gravedad en la dirección negativa del eje “z”. Se usa una rejilla con un distanciamiento de 18 m en el eje “x” y de 9 m en el eje “y”, teniendo dos líneas de rejilla en cada eje. Para el eje “y” se crea solo una línea porque el pórtico a modelar es plano.

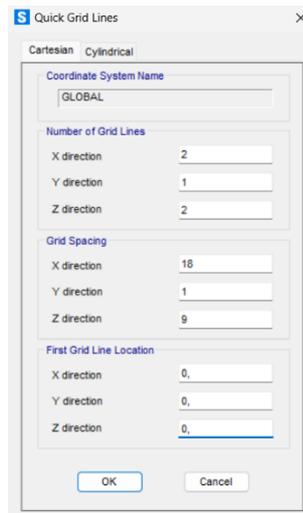


Figura 9: Creación de rejilla

Tras esto, se define el material. SAP2000 incluye las propiedades de los materiales más comunes para el diseño de estructuras según las normas de cada zona geográfica. En este caso se selecciona la norma europea y un acero de calidad S275. La geometría de la sección se obtiene de la biblioteca propia del programa que contiene las secciones más habituales. A cada una de las tres secciones se le asigna el material que se ha creado previamente (Figura 10).

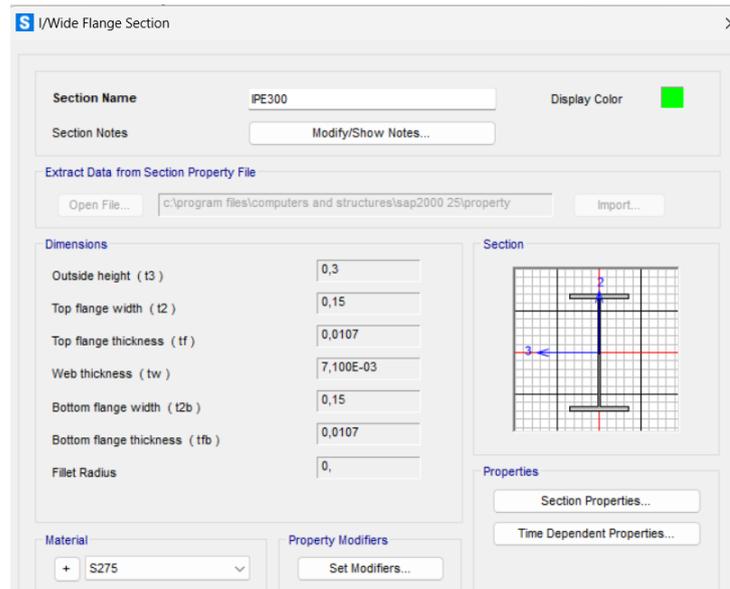


Figura 10: Propiedades de sección IPE300

Para crear el pórtico, se asigna a todas las líneas de la rejilla una sección previamente creada. Después, se colocan los apoyos, que, como se describió antes, van a ser empotramientos. Con esto, ya está creada la geometría de un pórtico. A continuación, se introducen las cargas. Para ello se crea un patrón de carga para la sobrecarga de uso, seleccionando en el tipo de patrón la opción “Other”. (Figura 11).

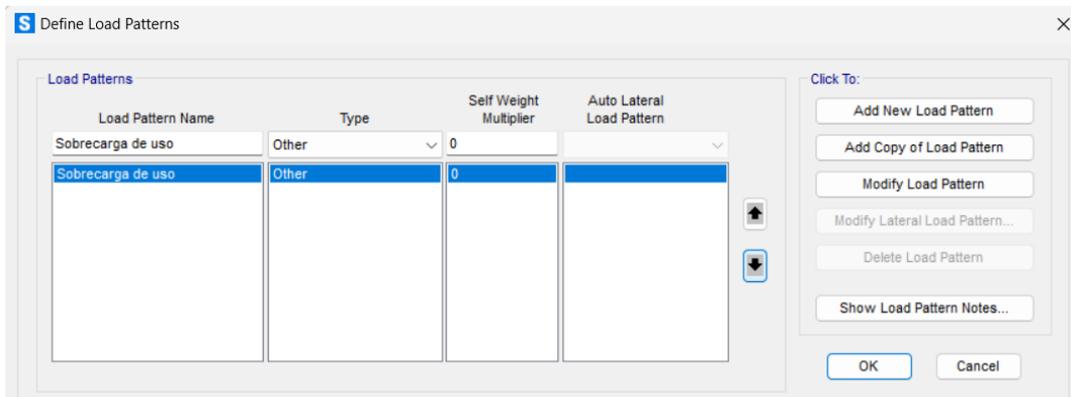


Figura 11: Creación del patrón de carga

Por último, se define el caso de carga (Figura 12). La sobrecarga de uso se modela como estática y lineal, con factor de escala igual a 1. Para el cálculo de pandeo es necesario crear un caso de carga específico. Este será de tipo “Buckling”, que es como el software denomina al análisis de pandeo y tendrá también un factor de escala de 1.

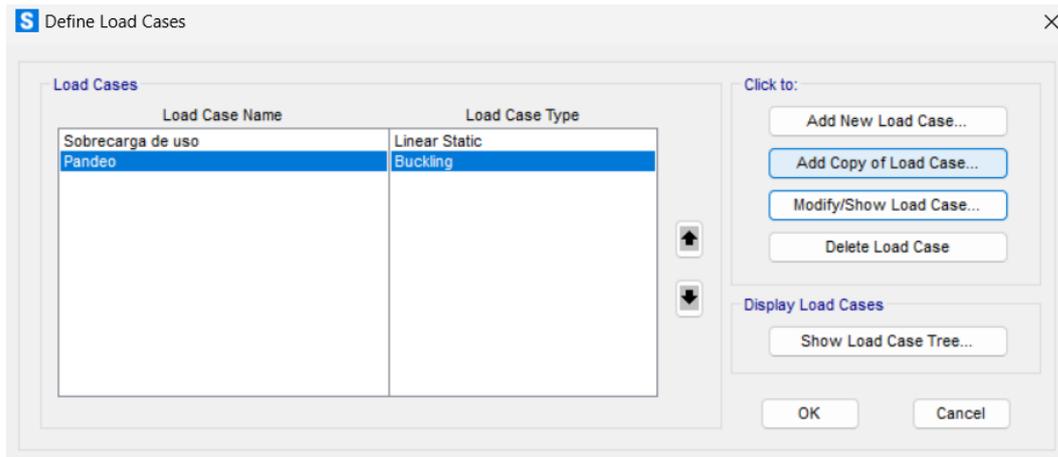


Figura 12: Creación de caso de carga

Una vez la geometría y las cargas están definidas hay que indicar al software en qué parte del pórtico van a actuar las cargas. Para ello, con el dintel seleccionado se va a la pestaña de carga distribuida (Figura 13), y, seleccionando el caso de carga de sobrecarga de uso se indica una carga uniforme de 6000 N/m, por tener 3 m de vano a cada lado del pórtico. En este caso, como se ha definido la carga vertical está en la dirección negativa del eje “z”, se define la carga en la dirección “Gravity”.

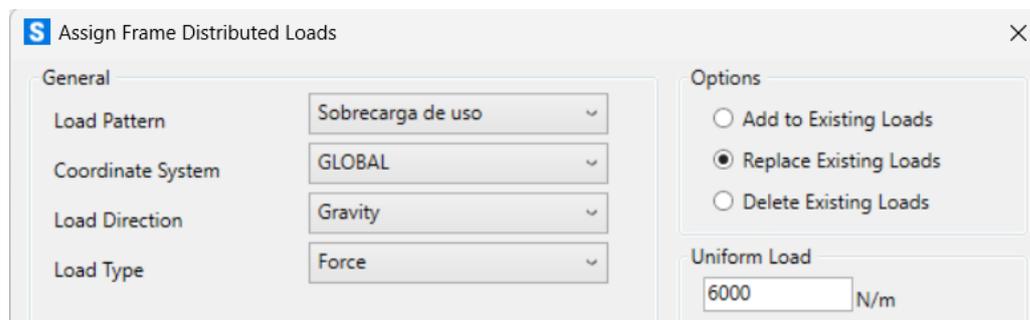


Figura 13: Creación de la carga

Con esto, se puede calcular el pórtico, pero, para tener mayor claridad y facilidad para comparar los tres posibles perfiles, se va a replicar este pórtico con las tres posibles secciones. Para ello se usará el comando “Replicate”. Se crean 3 copias del pórtico separadas, y a cada copia se le asigna una sección distinta.

Para evitar confusiones, las secciones van de mayor a menor de izquierda a derecha. Esto es, el pórtico de la izquierda tiene sección IPE360 y el de la derecha tiene sección IPE300 (Figura 14). También se muestra la sobrecarga de uso.

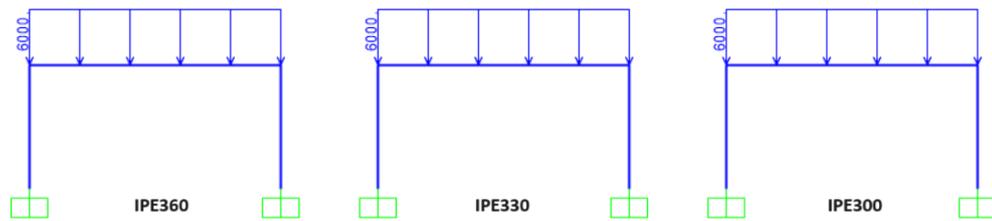


Figura 14: Pórticos rígidos con IPE300, IPE330 e IPE360

Para articular los pórticos, se seleccionan los pilares y en el menú “Assign” se elige “Frames” y se selecciona la opción “Releases/ Partial fixity”. En la ventana que aparece (Figura 15) se seleccionan los grados de libertad inicialmente restringidos que se desean liberar. En este caso serán los momentos 3-3 en los finales de los dinteles, por la orientación de sus ejes locales. Como se están creando uniones completamente articuladas se deja en 0 el valor de rigidez.

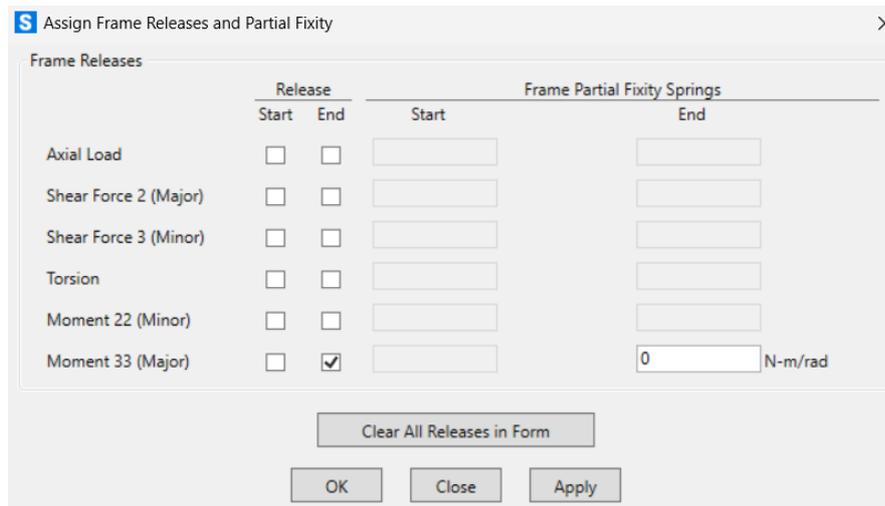


Figura 15: Menú de creación de extremos articulados



Figura 16: Pórtico articulado con rótulas en los pilares

Puede parecer algo anti-intuitivo ubicar las rótulas en los pilares (Figura 16), en vez de colocar ambas en el dintel, pero esto, como se verá más adelante, simplifica la obtención de los giros en los nudos.

Para la comprobación de la disminución de la carga crítica de pandeo, se deben hacer algunas modificaciones con respecto a lo detallado anteriormente para el modelado de los pórticos.

Al ser el pandeo un fenómeno no lineal, si se realiza el cálculo más simple, con un único elemento por barra, los resultados serán poco precisos, por lo que es necesario dividir los elementos en varios tramos para aumentar la precisión. Para ello, se seleccionan los elementos, y se entra en el menú “Edit”. Aquí se selecciona la opción “Edit lines” y después “Divide frames”, donde aparece la ventana mostrada en la Figura 17. El software ofrece varias posibilidades para dividir los elementos como se puede ver. En este caso se selecciona la primera opción, en la que el usuario elige en cuantos elementos se divide el original, además de la diferencia de tamaño del primer y último elemento. Para el cálculo se dividirá cada viga en 20 elementos, y estos tendrán el mismo tamaño.

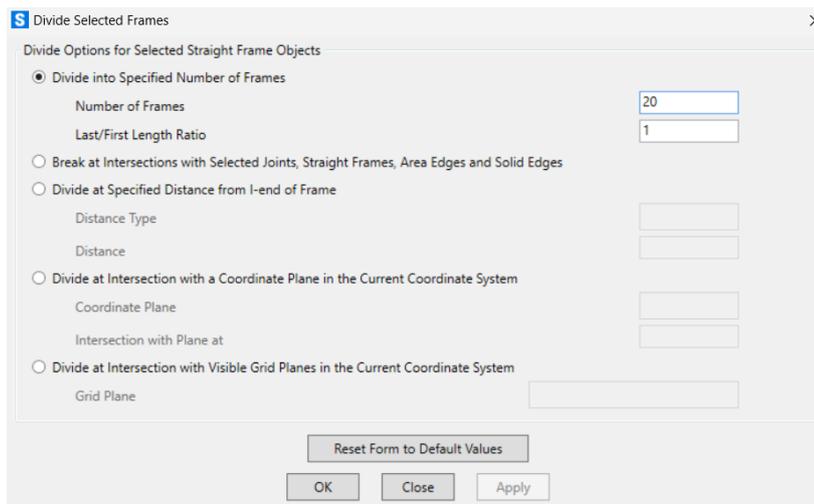


Figura 17: Menú para la división de elementos en SAP2000

### 2.1.2. Semi-rigidez y giros

Al liberar los grados de libertad en SAP2000, se desbloquea una casilla que permite introducir un valor. Este valor es la rigidez del nudo para el grado de libertad liberado. Cabe destacar que el software muestra de diferentes formas los tres tipos de nudo en la ventana de trabajo (Figura 18), para el caso de articular un dintel.

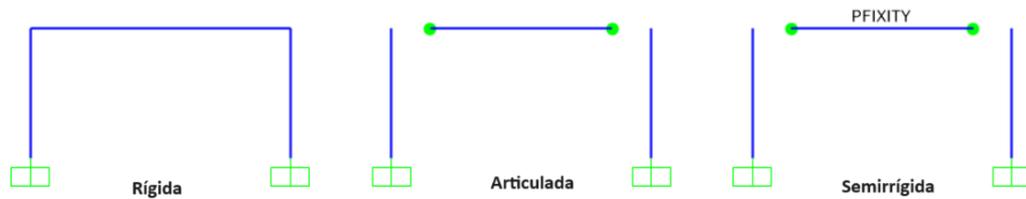


Figura 18: Comparación de pórtico con nudos rígidos, articulados y semirrígidos

En las uniones semirrígidas, además de aparecer la unión separada e indicada con un punto verde, aparece escrito “PFIIXITY”. A diferencia de esto, en las uniones completamente articuladas solo aparece el punto verde en la unión sin texto.

Cabe destacar que para el correcto cálculo solo se ha de introducir la rótula en uno de los dos elementos que conforman la unión. SAP2000 trata las rótulas como propiedades de los extremos de las barras y no de un punto. El resultado del cálculo no se verá afectado por la elección de una u otra barra.

Para obtener los giros en los nudos articulados habrá que tener en cuenta la forma en la que el software muestra los giros de los nudos. SAP2000 muestra el giro de uno de los elementos del nudo. En el caso de nudos completamente rígidos, como el giro relativo es 0, el valor que muestra es el giro global del nudo respecto a los ejes globales de la estructura.

En el caso de nudos total o parcialmente articulados el giro de los dos elementos que conforman la unión no es el mismo. SAP2000 solo mostrará el giro de uno de los elementos, concretamente del elemento que no tiene la rótula. El software muestra el giro global del extremo de dicha barra y no el giro relativo en el nudo. Para obtener el giro relativo habrá que pasar la rótula al otro elemento (Figura 19) y volver a calcular. El giro relativo será el resultado de restar el giro global de ambos elementos.

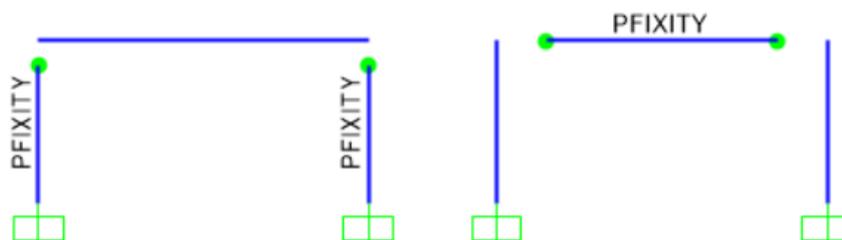


Figura 19: Comparación entre ubicar las rótulas en los extremos de los pilares o en los dos extremos del dintel

En uniones completamente articuladas se simplifica el cálculo. Como el momento que se transmite es nulo, y en este caso solo hay carga en el dintel, basta con obtener su giro para tener el giro relativo, porque el giro en el extremo del pilar será nulo.

A lo largo del trabajo, se estudiarán los esfuerzos, desplazamientos y tensiones en distintas secciones de la estructura. Las tres secciones de mayor relevancia y en las que se calcularán los distintos valores se denotarán como sigue (Figura 20), para simplificar la notación:

“a”, sección base del pilar

“b”, nudo entre pilar y dintel

“c”, sección media del dintel

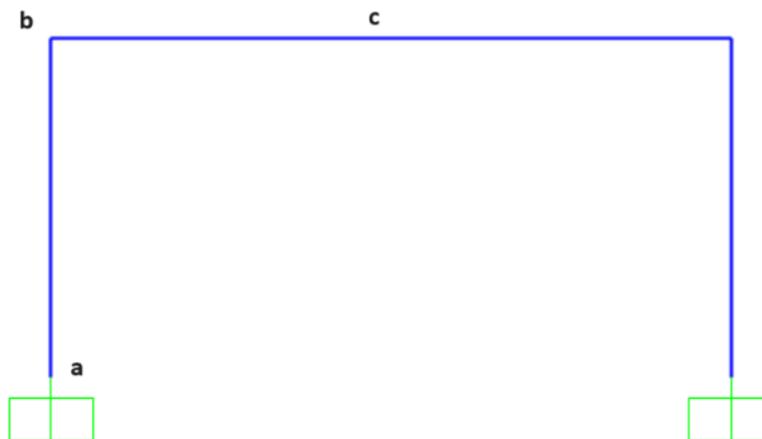


Figura 20: Pórtico con el nombre de las secciones

## 2.2. IDEASTatica

Para el cálculo de la rigidez de los nudos se utilizará IDEASTatica. Este software permite calcular en detalle uniones, tanto de acero como de hormigón. En este caso se utilizará el módulo “Connection”, especializado en uniones de estructuras metálicas, como es el caso. Este módulo permite todo tipo de cálculos en las uniones, además del cálculo de tensión-deformación, cuenta con la posibilidad de realizar el cálculo de la rigidez, sobre el que se desarrollará este trabajo, así como diseño por capacidad o diseño sísmico entre otros.

El software trae implementados los parámetros de cálculo de las normativas sobre estructuras de las zonas geográficas más importantes (Figura 21). Así, seleccionando una zona geográfica ya se tendrán los materiales o perfiles estandarizados para dicha zona.

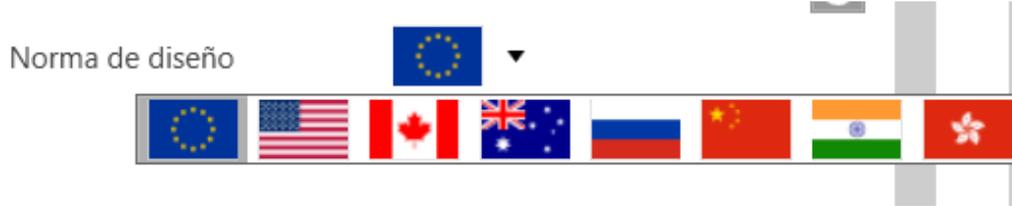


Figura 21: Normas de las diferentes zonas geográficas

## 2.2.1. Cálculo de Rigidez

IDEAStatica permite realizar cálculos de rigidez para el axil y para los dos momentos flectores. Para realizar el cálculo, el software solo requiere que se introduzcan cargas en los grados de libertad para los que se quiera realizar el cálculo. Como bien es sabido, la curva de rigidez de una unión es completamente independiente del momento que se le aplique, con lo que la relevancia del valor introducido es muy poca si solo se pretende obtener dicho diagrama, pero si se pretende conocer las deformaciones o esfuerzos internos que soporta la unión este valor cobra gran importancia.

Aunque el valor de la carga pueda ser poco relevante en función de los intereses, sí es de gran relevancia el signo si la unión no es simétrica con respecto al punto en el que se aplica el momento. Una unión diseñada para soportar el momento en un sentido puede no ser capaz de soportarlo en el contrario. Esto es importante dado que si se introduce el signo equivocado la curva de rigidez de una unión varía muy significativamente.

Si se va a querer caracterizar el comportamiento real de la unión y no solo conocer su curva de rigidez, será necesario introducir todas las cargas. Si se omite un esfuerzo puede ser que, en función de su valor, la unión falle al aplicar un momento que sí resistía al tener en cuenta dicho esfuerzo.

A pesar de que la curva de rigidez es independiente de las cargas, el software deja de calcular la curva cuando se llega al momento plástico último. Un cambio en las cargas puede reducir el valor del momento plástico último. Si esto ocurre, puede que la curva de rigidez no llegue al punto de trabajo de la unión indicando que esta ha fallado cuando no es así.

A efectos de cálculo de rigidez, el software solo permite calcular la rigidez de la unión de dos elementos entre sí, en el caso de que a una unión llegaran más de dos. No tiene sentido calcular una rigidez global, sino que hay que obtener la de cada conexión entre dos elementos por separado. Para elegir la rigidez de qué unión se quiere calcular hay que elegir ese elemento y marcar la opción "Seleccionar analizado" e introducir las cargas como se acaba de comentar.

Con estas puntualizaciones hechas, ya se podría realizar un cálculo de rigidez en IDEASTatica. Una vez se realiza el cálculo, el programa devuelve una tabla con varios datos (Figura 22) y una gráfica Momento-Rotación (Figura 23), en la que se dibuja la curva de rigidez de la unión.

Rigidez rotacional del componente de la unión

Ítem	Comp.	Cargas	MEd [kNm]	Mj,Rd [kNm]	Sj,ini [kNm/rad]	Sjs [kNm/rad]	$\phi$ [mrad]	$\phi_c$ [mrad]	L [m]	Sj,R [kNm/rad]	Sj,P [kNm/rad]	Clase
> M2	My	LE2	127,0	142,1	32788,8	22127,7	5,7	16,3	18,0	34329,2	686,6	Semi-rígido

Figura 22: Tabla de resultados cálculo de rigidez

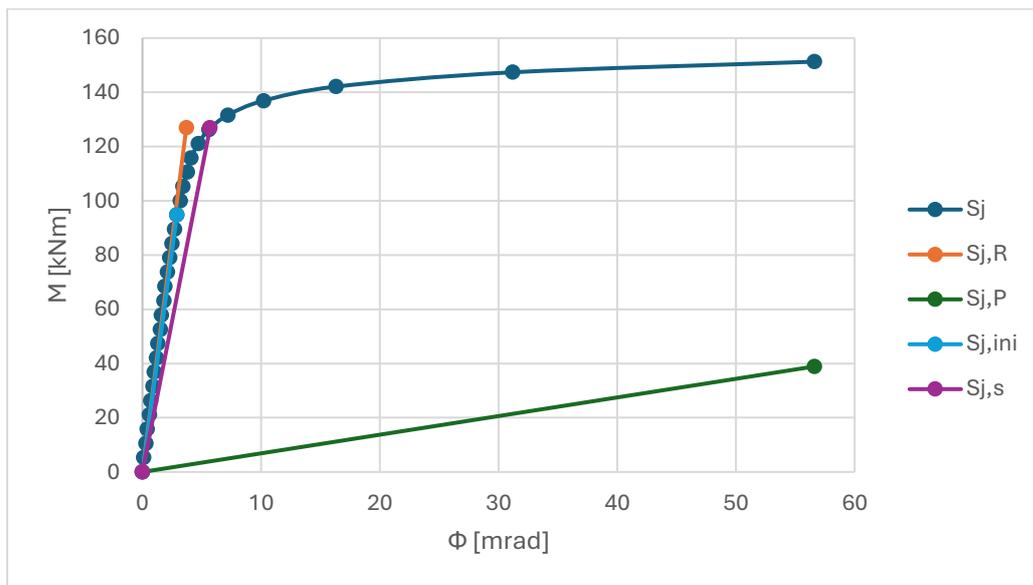


Figura 23: Diagrama de rigidez

**Item:** Elemento de la unión cuya rigidez se analiza.

**Componente:** Componente del esfuerzo para el cual se realiza el análisis.

**Cargas:** Combinación de cargas con la que se realiza el análisis.

$M_{Ed}$ : Valor del esfuerzo introducido.

$M_{j,Rd}$ : Momento máximo que resiste la unión antes de llegar a un 5% de plastificación.

$M_{c,Rd}$ : Momento plástico último de la unión.

$S_{j,ini}$ : Rigidez inicial.

$S_{j,s}$ : Rigidez secante.

$\Phi$ : Giro relativo de la unión.

$\Phi_c$ : Giro relativo de la sección al alcanzar el momento máximo.

$L$ : Longitud teórica para el momento.

$S_{j,R}$ : Valor límite de rigidez para considerar la unión rígida.

$S_{j,P}$ : Valor límite de rigidez para considerar la unión articulada.

IDEAStatica permite exportar los diagramas de rigidez a formatos Excel, .dxf y .PNG, permitiendo tener un análisis más profundo de los resultados obtenidos. A lo largo del trabajo los diagramas mostrados serán exportados a formato Excel para añadir la rigidez secante a los diagramas, ya que no se incluye por defecto.

Para determinar los límites para la clasificación de las uniones por su rigidez, como se ha visto en las ecuaciones 2 y 3, son necesarios valores del resto de la estructura. Estos valores son imposibles de conocer para el software, puesto que solo se modela la unión. Por ello, hay que introducir manualmente los datos necesarios para el cálculo: la luz del elemento a analizar y si el sistema es o no traslacional.

Para indicar si es o no traslacional basta con marcar o no la casilla de “Sistema arriostrado” en la ventana de “Configuración de la norma”. Para la luz hay que ir al elemento que se quiere analizar e introducir la distancia entre los apoyos del elemento en la dirección del esfuerzo para el que se quiere calcular la rigidez (Figura 24). Cabe destacar que el valor de la luz puede ser diferente para las dos direcciones del momento para las que se puede calcular la rigidez.

▼ **Análisis de rigidez**

Longitud teórica para My [m]	18,0
Longitud teórica para Mz [m]	18,0

Figura 24: Longitud teórica del dintel

## 2.2.2. Configuración de la norma

Como se comentó al introducir el software, antes de comenzar el diseño de las uniones, IDEAStatica pide seleccionar una norma. Aparte de los materiales y secciones, también se incluyen los coeficientes de cálculo que impone cada normativa, así como los factores de seguridad.

Los factores de seguridad se dejan por defecto. También se deja por defecto los parámetros sobre el hormigón, dado que no tendrán influencia al ser las

uniones exclusivamente metálicas. Estos parámetros son los indicados en el Eurocódigo, ya que la normativa seleccionada es la europea.

▼ **Configuración de la verificación**

Deformación plástica límite [%]	5,0
Deformación límite local [%]	3,0
Deformación plástica de adventencia. [%]	3,0
Nivel de alerta de la verificación [%]	95,0
Nivel óptimo de la verificación [%]	60,0
Distancia entre tornillos [d]	2,2
Distancia entre tornillos y el borde [d]	1,2
Detallado del anclaje: paso mínimo	4
ángulo de distribución de la carga en el bloque de hormigón [°]	26,6
Disminución de los NRd,s de los anclajes - hilo cortado [%]	85
Sistema arriostrado	<input type="checkbox"/>
Considerar la influencia de $\beta_p$ en FvRd	<input checked="" type="checkbox"/>
Desplazamiento de la sección a fatiga	1,5

Figura 25: Menú de configuración de la verificación

En cuanto al menú de configuración de la verificación (Figura 25), estos valores influyen en si la unión falla o no, pero no en cuanto al resultado de la rigidez. El único valor que cambia los resultados, aunque solo a efectos de clasificación, es marcar o no la opción de sistema arriostrado. En el caso a estudiar, como se suponen los pórticos aislados, no se marca la casilla de sistema arriostrado, considerando así la estructura como traslacional.

Por último, quedan las opciones de modelado y mallado (Figura 26). En este menú se puede determinar el tamaño de los elementos en los que se hará el mallado en función del tipo de elemento. También se puede modificar el número de iteraciones y algunos otros parámetros del cálculo. En este menú se puede cambiar el número de modos de pandeo que se calculan.

### ▼ Modelo y malla

Longitud por defecto de elemento estándar [h]	1,25
Longitud por defecto de elemento con sección hueca [h]	1,25
División de la superficie del mayor elemento tubular circular	64
División de arco de los elementos tubulares rectangulares	3
Número de elemento en el mayor ala o alma del elemento	12
Número de elementos en el alma mayor del elemento RHS	16
Número de elementos en placas individuales	20
Número de iteraciones en el análisis	25
Cuenta de iteraciones divergentes	3
Tamaño mínimo del elemento [mm]	8,0
Tamaño máximo del elemento [mm]	50,0
Número de modos de pandeo	6

Figura 26: Menú de configuración de modelo y malla

## 2.2.3. Modelado de las uniones

Tras conocer la forma en la que IDEASTatica trata el cálculo de rigidez y ajustar la configuración, se pasa a detallar el modelado de las uniones que se van a analizar. Previamente a esto, es necesario tener en cuenta algunas particularidades para el modelado, que si no se tienen en cuenta pueden conducir a resultados erróneos en el cálculo de rigidez.

IDEASTatica modela la unión a partir de un origen. Al introducir los elementos, por defecto se ubican con su línea media alineada con este origen. Esto solo es visible si se selecciona el modo de visión unifilar, donde el origen se modela con un punto negro. El cálculo de rigidez se realiza a partir de la diferencia de posición con respecto al origen, con lo que, si la unión no está bien posicionada con el origen los resultados no serán correctos. En la Figura 27, se ve como las líneas finalizan en el origen de la unión, con lo que esta unión estaría bien modelada. Sin embargo, en la Figura 28, se ve como el dintel no finaliza en el origen, si no en mitad del pilar, con lo que no estaría bien modelada.

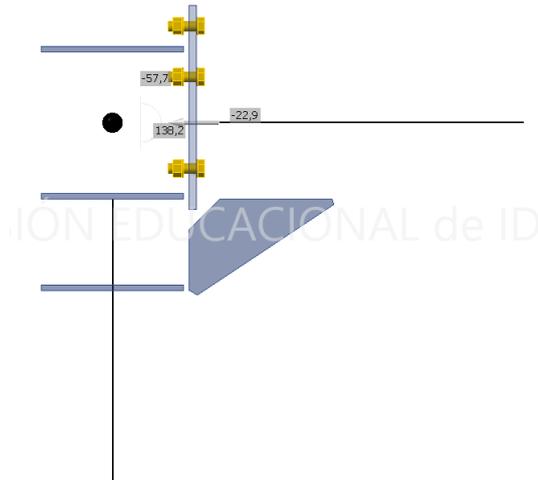


Figura 27: Unión modelada correctamente visualizada con esquema unifilar

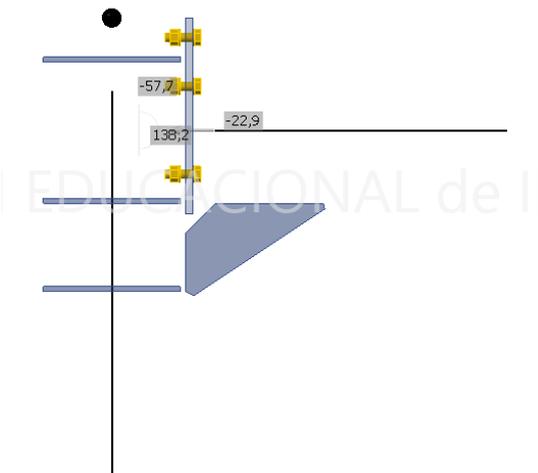


Figura 28: Unión modelada incorrectamente visualizada con esquema unifilar

### 2.2.3.1. Uniones sin cartela

Para la primera unión se realizará una unión de hombro atornillada sin cartela. En ella tan solo habrá una placa de testa y una contra placa de refuerzo, además de dos rigidizadores en el pilar a la altura de las alas del dintel.

El primer paso es introducir los dos miembros que concurren en la unión. Ambos se definen como finalizados, y el dintel se seleccionará como elemento analizado para el cálculo de rigidez. Al crear estos elementos se ha de tener cuidado para que el origen de la unión quede en los finales de las líneas medias, como se acaba de describir. En la Figura 29 se muestran los parámetros con los que se ha creado el dintel y en la Figura 30 con los que se ha creado el pilar.

Dintel [Elemento analizado]		Copia	Eliminar
<b>Propiedades</b>			
Sección transversal	3 - IPE300 S275 (IPE300)		
Espejo respecto Y	<input type="checkbox"/>		
Simetría Z	<input type="checkbox"/>		
Tipo geométrico	Acabado		
<b>Posición</b>			
Definido por	Rotaciones		
$\beta$ - Dirección [°]	0,0		
$\gamma$ - Inclinación [°]	0,0		
$\alpha$ - Rotación [°]	0,0		
Desplazamiento ex [mm]	0,0		
Desplazamiento ey [mm]	0,0		
Desplazamiento ez [mm]	0,0		
Alinear	En nudo		
<b>Modelo</b>			
Tipo de modelo	N-Vz-My		
Fuerzas en	Nodo		
<b>Análisis de rigidez</b>			
Longitud teórica para My [m]	18,0		
Longitud teórica para Mz [m]	18,0		

Figura 29: Parámetros para la creación del dintel con IPE300

Pilar [Elemento]		Seleccionar analizado	Copia	Eliminar
<b>Propiedades</b>				
Sección transversal	3 - IPE300 S275 (IPE300)			
Espejo respecto Y	<input type="checkbox"/>			
Simetría Z	<input type="checkbox"/>			
Tipo geométrico	Acabado			
<b>Posición</b>				
Definido por	Rotaciones			
$\beta$ - Dirección [°]	0,0			
$\gamma$ - Inclinación [°]	-90,0			
$\alpha$ - Rotación [°]	0,0			
Desplazamiento ex [mm]	0,0			
Desplazamiento ey [mm]	0,0			
Desplazamiento ez [mm]	0,0			
Alinear	En nudo			
<b>Modelo</b>				
Tipo de modelo	N-Vy-Vz-Mx-My-Mz			
Fuerzas en	Nodo			
<b>Análisis de rigidez</b>				
Longitud teórica para My [m]	9,0			
Longitud teórica para Mz [m]	9,0			

Figura 30: Parámetros para la creación del pilar con IPE300

El siguiente paso será extender el pilar 30 mm por encima del ala superior del dintel. Para ello, se crea un plano de trabajo paralelo a la sección del pilar y 180 mm por encima del origen de la unión (150 mm por ser la mitad de la altura de la sección del dintel y los 30 mm que va a sobresalir). Posteriormente se ejecutará una operación de “Corte/extensión” (Figura 31) hasta el plano para extender el pilar.



Figura 31: Operación de extensión del pilar

A continuación, se creará la placa de testa. Para ello se utilizará una operación de “Placa de unión” que se define con los parámetros mostrados en la Figura 32. Esta placa tendrá un espesor de 20 mm al igual que la placa de refuerzo. La placa se extenderá 25 mm por encima y por debajo del dintel. La placa se fijará al pilar mediante cuatro tornillos M24 10.9, ubicados entre las dos alas del dintel a las distancias mostradas en la Figura 33. Las soldaduras entre la placa y el dintel serán en ángulo por ambos lados, y se dejarán con espesor 0, para que el software las considere por defecto en función del espesor de los elementos a unir. La placa de refuerzo estará dividida en dos, separadas por el alma del pilar.

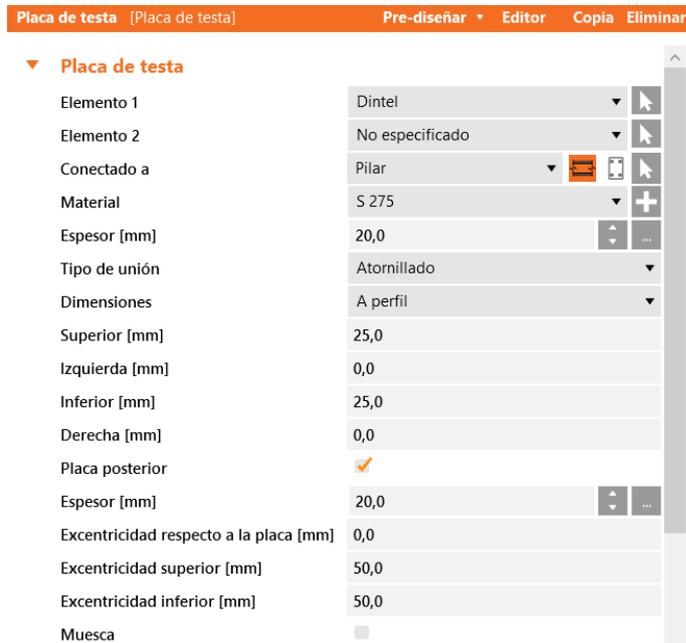


Figura 32: Parámetros de creación de la placa de testa

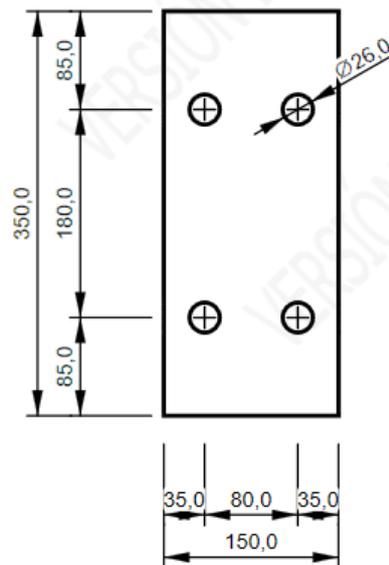


Figura 33: Dibujo acotado de la placa de testa de la unión con perfiles IPE300

Por último, se añaden los rigidizadores al pilar, de 15 mm de espesor y situados a la misma altura que las alas del dintel.

▼ **Rigidizadores**

En el elemento	Pilar
Relacionado con	Dintel
Posición	Ambos
Material	S 275
Espesor [mm]	15,0
Localización	Ambos
Posición X [mm]	0,0
$\alpha$ - Inclinación [°]	0,0
Ancho [mm]	0,0
Desplazamiento superior [mm]	0,0
Desplazamiento inferior [mm]	0,0
Repetir conteo	1
Espacio [mm]	0,0
Esquinas achaflanadas	<input checked="" type="checkbox"/>
Tamaño del corte del chaflán [mm]	15,0
▼ <b>Soldaduras</b>	
Todas las soldaduras [mm]	0,0  Automatic

Figura 34: Parámetros de creación de los rigidizadores

Con esto, la primera unión ya está modelada, a falta solo de introducir las cargas que ha de soportar. La geometría de la unión se muestra en la Figura 35. Para más detalles sobre las dimensiones de esta unión y el resto de las uniones sin cartela, el despiece acotado de todos sus elementos se encuentra en el Anexo, a partir de la página 71 de este documento.



Figura 35: Vista de la unión sin cartelas con perfil IPE300

Las demás uniones sin cartela tendrán la misma geometría, y solo será necesario modificar la altura del plano que limita la extensión del dintel hasta 195 mm en el caso del IPE330 y hasta 210 mm para el IPE330, para tener en cuenta la modificación en la altura de la sección. Los tornillos permanecen a la misma distancia de las alas en los tres casos. El resto de la geometría permanece sin variaciones.

Por último, será necesario introducir los valores de esfuerzo que se obtuvieron en SAP2000 para los pórticos rígidos. Antes de comenzar el cálculo de rigidez se procederá a la verificación de pandeo de las uniones. Solo se realizará para el caso del perfil IPE300. Si esta no presenta problemas de pandeo las demás tampoco lo harán, pues tienen perfiles más robustos y la unión tiene las mismas características.

Para realizar el cálculo de rigidez hay que hacer un cálculo de tensión-deformación y después, en la pestaña de verificación, seleccionar el cálculo de abolladura. Tras realizar este cálculo, IDEASTatica devuelve el coeficiente de cuantos modos de pandeo que se le pida calcular en "Configuración de la norma". En este caso se ha dejado por defecto y se han calculado las 6 primeras formas de pandeo, cuyos coeficientes se muestran en la Figura 36. Como se puede ver, la primera forma de pandeo aparece si se multiplica la carga por 8,65. Esto no va a ocurrir, pues la unión fallará mucho antes de que se pueda producir la abolladura, como se verá al realizar los cálculos de rigidez.

**Pandeo local de la unión**

	Cargas	Forma	Factor
>	LE1	1	8,65
		2	9,11
		3	9,42
		4	10,24
		5	11,22
		6	12,62

Figura 36: Tabla de coeficientes de pandeo de la unión sin cartela con IPE300

### 2.2.3.2. Uniones con cartela

Buscando rigidizar la unión, se incluirá una cartela en la zona inferior del dintel esperando tener una rigidez mayor en las uniones. Esta cartela estará soldada a la parte inferior del dintel y a la placa de testa, que en este caso será más larga.

Para el modelado de esta unión, se aprovechará en gran medida las operaciones con las que se creó la unión sin cartela, modificando los parámetros necesarios y añadiendo las operaciones necesarias.



Figura 37: Parámetros de creación de la cartela con IPE300

Lo primero que se hará es crear la cartela, y, a partir de ahí realizar las modificaciones necesarias en el resto de los elementos para incluirla. La

cartela se crea con una operación de “Cartela”. Se crea con la opción de triangular con ala a fin de tener una geometría similar a un perfil en T. Las opciones con las que se crea se muestran en la Figura 37.

Para completar, se añaden cuatro rigidizadores, una pareja se ubica en el dintel (Figura 38) y la otra en el pilar (Figura 39). Ambas se ubican en los puntos finales de la cartela.

Rig. dintel [Rigidizadores]		Pre-diseñar	Editor	Copia	Eliminar
<b>▼ Rigidizadores</b>					
En el elemento	Dintel				
Relacionado con	No especificado				
Posición	Ambos				
Material	S 275				
Espesor [mm]	15,0				
Localización	Ambos				
Posición X [mm]	300,0				
$\alpha$ - Inclinación [°]	0,0				
Ancho [mm]	0,0				
Desplazamiento superior [mm]	0,0				
Desplazamiento inferior [mm]	0,0				
Repetir conteo	1				
Espacio [mm]	0,0				
Esquinas achaflanadas	<input checked="" type="checkbox"/>				
Tamaño del corte del chaflán [mm]	15,0				
<b>▼ Soldaduras</b>					
Todas las soldaduras [mm]	0,0			Automatic	

Figura 38: Parámetros de creación de rigidizadores en el dintel en la unión con perfiles IPE300

Rig. pilar [Rigidizadores]		Pre-diseñar	Editor	Copia	Eliminar
<b>▼ Rigidizadores</b>					
En el elemento	Pilar				
Relacionado con	No especificado				
Posición	Ambos				
Material	S 275				
Espesor [mm]	15,0				
Localización	Ambos				
Posición X [mm]	510,0				
$\alpha$ - Inclinación [°]	0,0				
Ancho [mm]	0,0				
Desplazamiento superior [mm]	0,0				
Desplazamiento inferior [mm]	0,0				
Repetir conteo	1				
Espacio [mm]	0,0				
Esquinas achaflanadas	<input checked="" type="checkbox"/>				
Tamaño del corte del chaflán [mm]	15,0				
<b>▼ Soldaduras</b>					
Todas las soldaduras [mm]	0,0			Automatic	

Figura 39: Parámetros de creación de rigidizadores en el pilar en la unión con perfiles IPE300

Por último, se modifica la placa de testa para que se pueda soldar a ella la cartela (Figura 40). También se cambia la posición de los tornillos, que siguen siendo cuatro, pero ahora dos de ellos pasan a estar fuera del dintel y están ubicados a la altura de la cartela. Esto causa que se retire la placa trasera de

refuerzo, puesto que los rigidizadores del dintel harían que solo pudiera quedar un tornillo por cada trozo de placa.

Placa de testa [Placa de testa]		Pre-diseñar	Editor	Copia	Eliminar
<b>Placa de testa</b>					
Elemento 1	Dintel				
Elemento 2	No especificado				
Conectado a	Pilar				
Material	S 275				
Espesor [mm]	20,0				
Tipo de unión	Atornillado				
Dimensiones	A perfil				
Superior [mm]	25,0				
Izquierda [mm]	0,0				
Inferior [mm]	195,0				
Derecha [mm]	0,0				
Placa posterior	<input type="checkbox"/>				
Muesca	<input type="checkbox"/>				
<b>Tornillos</b>					
Tipo	M24 10.9				
Capas superiores [mm]	-60,0				
Capas a la izquierda [mm]	-35,0				
Capas inferiores [mm]	115,0				
Capas a la derecha [mm]	-35,0				
Piano de corte en rosca	<input checked="" type="checkbox"/>				

Figura 40: Parámetros de la modificación de la placa de testa en la unión de perfiles IPE300



Figura 41: Vista de la unión con cartela con perfil IPE300

Con la geometría ya definida para el perfil IPE300, como se muestra en la Figura 41, se procede a definir las modificaciones que se realizarán para adaptar la unión a los perfiles IPE330 e IPE360. Como ya pasó en las uniones sin cartela, hay que modificar la posición del plano límite para la extensión del pilar. Para mantener la proporcionalidad en la unión, se aumenta 15 mm el ancho de la cartela al aumentar el perfil. Por esto, se aumenta el largo proporcionalmente, es decir, 25 mm. Como consecuencia de esto, se modifica la posición de los rigidizadores de los extremos de la cartela en el mismo valor. La placa de testa y la posición de la pareja de tornillos también se desplaza 15

mm hacia abajo. Por último, al aumentar el perfil, se ensancha 10 mm el ala de la cartela. En la Tabla 1, para mayor claridad, se muestran los valores de los parámetros modificados. Los despieces acotados de estas uniones se muestran a partir de la página 77 del Anexo de este documento.

Tabla 1: Parámetros a modificar para la adaptación de la unión con cartela a los perfiles IPE330 e IPE360

Perfil	IPE300	IPE330	IPE360
Plano límite de pilar	180	195	210
Ancho cartela	175	190	205
Profundidad cartela	300	325	350
Rigidizador pilar	510	525	540
Rigidizador dintel	300	325	350
Largo inferior placa	195	210	225
Posición tornillos	115	130	145
Ancho ala cartela	110	120	130

Con la geometría de las uniones ya descrita, y antes de pasar al análisis de rigidez, se comprobará la unión con el perfil más débil ante posibles fallos de pandeo. Al realizar el cálculo con los esfuerzos obtenidos para el pórtico de nudos rígidos, se obtienen los resultados de la Figura 42 para los 6 primeros modos de pandeo. Como se puede ver, ni los perfiles ni la cartela están cerca de sufrir fallos por pandeo.

#### Pandeo local de la unión

	Cargas	Forma	Factor
>	LE1	1	9,07
		2	10,21
		3	14,32
		4	14,39
		5	14,83
		6	15,52

Figura 42: Tabla de coeficientes de pandeo para la unión con cartela con perfil IPE300

Tras crear la geometría de las uniones, y previamente a realizar los cálculos de rigidez, es necesario introducir los esfuerzos que se irán obteniendo en SAP2000. Es necesario tener en cuenta la dirección de estos, pues los ejes locales “y” de las barras en ambos softwares no coinciden. Como se ve en la

Figura 43, en SAP2000 el eje “y” tiene su dirección positiva “hacia fuera del papel” y en IDEAStica “hacia dentro” (Figura 44). En el pilar no es necesaria esta apreciación, pues no se introducen cargas en él.

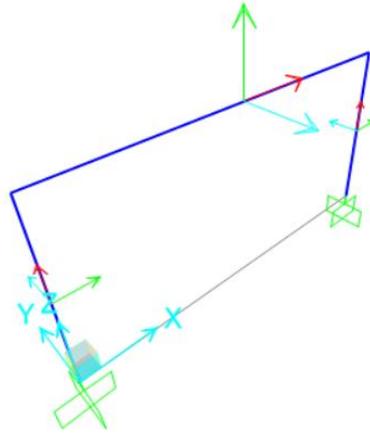


Figura 43: Vista del pórtico con ejes locales

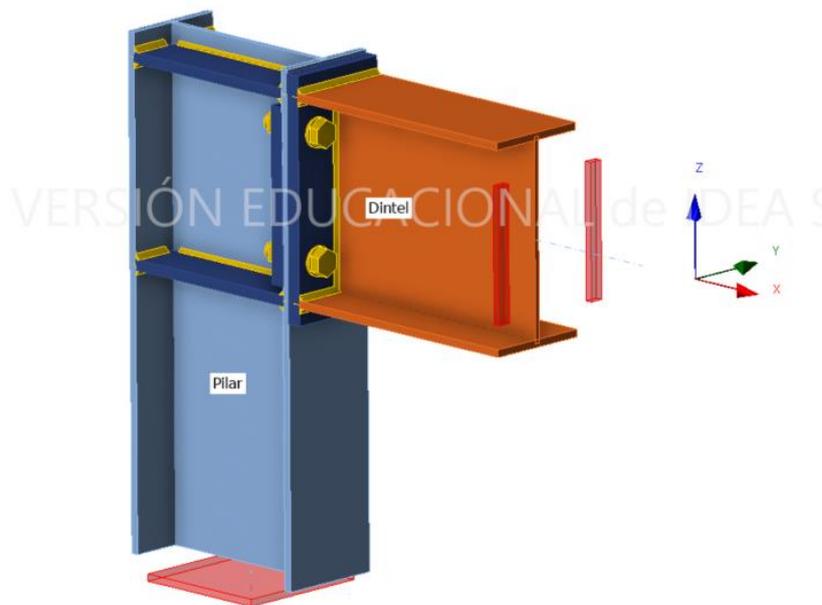


Figura 44: Vista de la unión con ejes locales del dintel

El hecho de que estos ejes no coincidan en su dirección hace que el signo del momento también cambie. A lo largo del trabajo se tomará el sentido positivo como lo hace SAP2000. Al pasar las cargas de SAP2000 a IDEAStica habrá que tener la precaución de cambiar el signo del momento para adecuarlo al sistema de referencia de este último.



## Capítulo 3: Casos de estudio y resultados

Tras describir el proceso de modelado de las diferentes estructuras y uniones que se van a analizar, en este capítulo se describirá el procedimiento de cálculo y obtención de los resultados.

### 3.1. Cálculo de pórticos en SAP2000

En primer lugar, y con el fin de obtener los valores límite de los esfuerzos y, además, tener unos valores iniciales con los que empezar a trabajar en IDEASTatica, se obtienen los esfuerzos internos, así como tensión normal y desplazamientos en los seis pórticos, tres articulados y tres sin articular, en SAP2000.

Al realizar los cálculos, SAP2000 muestra una ventana con los resultados para cada barra, en la que se pueden ver el axil (Figura 45), la tensión normal (Figura 46) y de cortante, momento flector y desplazamiento (Figura 47) en las barras, así como desplazamientos y giros en los nudos (Figura 48).

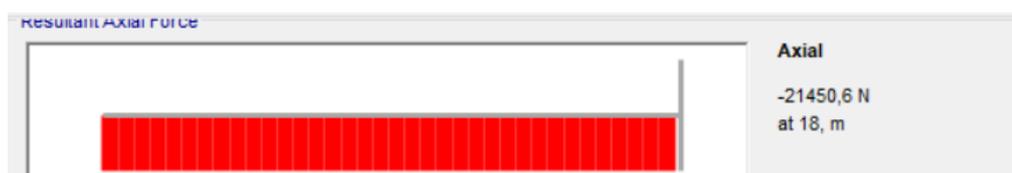


Figura 45: Gráfico de axil en el dintel con perfil IPE300 y nudos rígidos

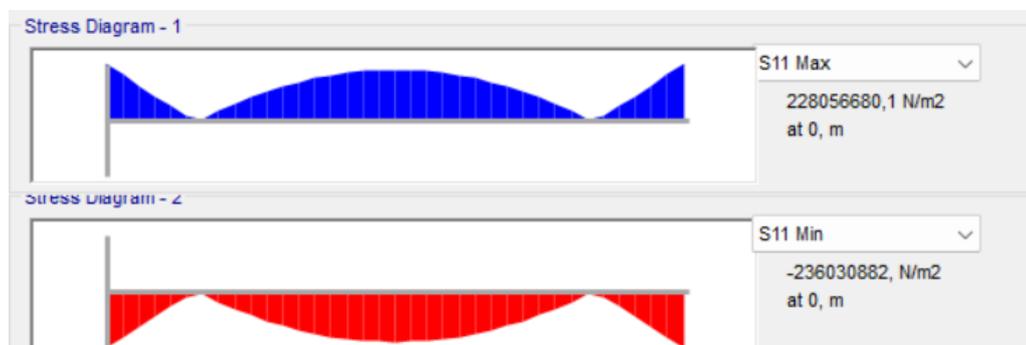


Figura 46: Gráfico de tensiones normales en el dintel con perfil IPE300 y nudos rígidos

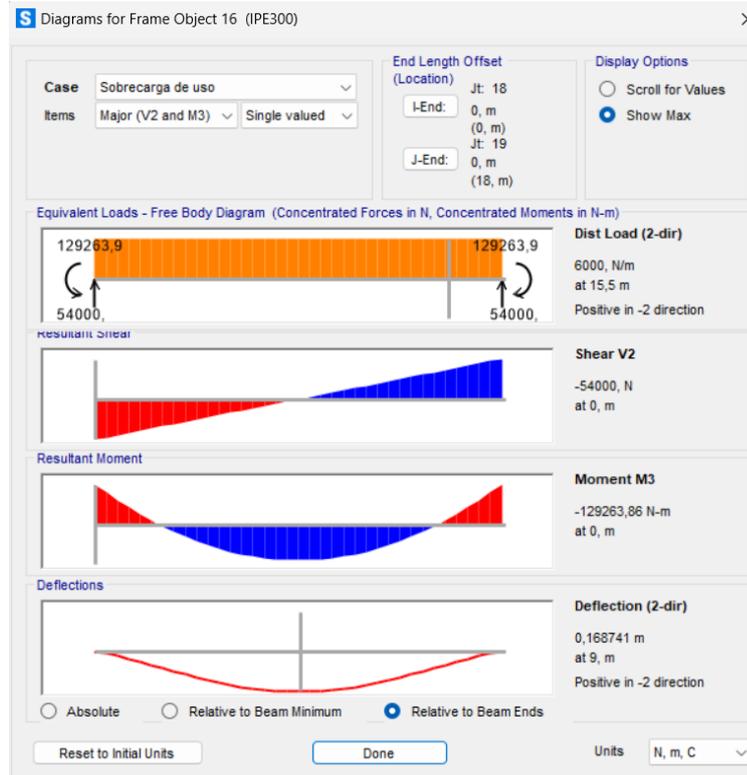


Figura 47: Gráfico de cortante, flector y desplazamiento en el dintel con perfil IPE300 y nudos rígidos

Joint	Object	2	Joint Element	2	3
Trans	1	1,709E-04	2	0,	-4,302E-04
Rotn		0,		0,01679	0,

Figura 48: Desplazamientos y giros en la sección b con perfil IPE300 y nudos rígidos

Recorriendo los seis pórticos, y tomando en cuenta los resultados más relevantes para cada uno se construyen las siguientes tablas resumen. En la Tabla 2 se muestran los resultados para los pórticos con nudos rígidos y en la Tabla 3 los resultados de los pórticos con nudos articulados.

Tabla 2: Resultados de los pórticos con nudos rígidos

Perfil	IPE300	IPE330	IPE360
$M_a$ [kNm]	-63,79	-63,57	-63,35
$M_b$ [kNm]	-129,26	-129,19	-129,11
$M_c$ [kNm]	113,88	113,8	113,73
$\sigma_{\max \text{ dintel}}$ [MPa]	-236,03	-184,53	-145,78
Posición $\sigma_{\max}$	b	b	b
$\Phi_b$ [mrad]	0	0	0
$\delta_c$ [mm]	168,74	119,91	86,83

Tabla 3: Resultados de los pórticos con nudos articulados

Perfil	IPE300	IPE330	IPE360
$M_a$ [kNm]	0,00	0,00	0,00
$M_b$ [kNm]	0,00	0,00	0,00
$M_c$ [kNm]	243,00	243,00	243,00
$\sigma_{\max \text{ dintel}}$ [MPa]	436,21	340,65	268,38
Posición $\sigma_{\max}$	c	c	c
$\Phi_b$ [mrad]	83,09	58,99	42,67
$\delta_c$ [mm]	467,08	331,60	239,88

Estos resultados constituyen los valores límite de los que se esperan obtener al tener en cuenta la rigidez, pues estos son extremos y teóricos, ya que será imposible alcanzar una rigidez de valor cero o infinito.

Los valores de los esfuerzos internos son evidentemente los mismos para la misma configuración de los nudos, dado que estos solo dependen de las cargas y la configuración de las uniones, pero no del perfil. Las tensiones internas sí que dependen del perfil, y disminuyen al aumentar la sección del perfil. Su valor es negativo porque el axil que sufre el dintel es de compresión, haciendo que la tensión normal sea ligeramente mayor en las fibras inferiores de la sección.

También cabe destacar como la posición de la sección con una tensión normal máxima varía entre los pórticos rígidos y articulados. En los pórticos con nudos rígidos la tensión máxima se halla en el nudo (sección "b"), mientras que en los pórticos con nudos articulados el máximo se halla en el centro del dintel (sección "c"). Esto está causado por la diferente distribución de los momentos existente entre las dos configuraciones. Por esto, se espera que al plantear las diferentes rigideces pueda existir una transición entre la ubicación del valor máximo de la tensión normal entre "c", en nudos menos rígidos a "b", al aumentar la rigidez.

Por último, cabe obtener los valores de axil y cortante en los pórticos con uniones rígidas. Si bien la variación de estos valores no se va a estudiar a lo largo del trabajo, sí es necesario conocerlos para el cálculo de la rigidez de las uniones.

### 3.2. Cálculo de rigidez de uniones sin cartela

Aunque la rigidez de las uniones es independiente de las cargas aplicadas, es conveniente antes de proceder al cálculo de rigidez realizar el cálculo de tensión-deformación. Si en la unión apareciese una plastificación significativa, podría no cumplirse la hipótesis de cálculo en régimen elástico, con lo que los resultados obtenidos para la rigidez no serían válidos.

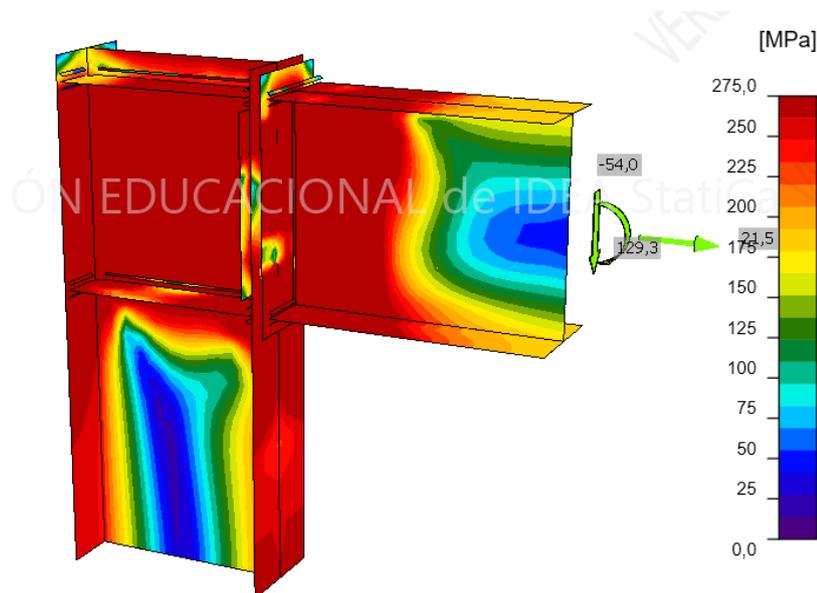


Figura 49: Diagrama de tensiones de la unión con IPE300 sin cartela

Análisis	✓	100,0%
Placas	✗	75,7 > 5,0%
Tornillos	✗	148,3 > 100%
Soldaduras	✗	139,9 > 100%

Figura 50: Valores máximos de utilización de los elementos de la unión de IPE300 sin cartela

Como se puede ver en la Figura 49 las tensiones son muy grandes y muchos elementos superan su límite elástico. Ninguno de los elementos soporta las cargas (Figura 50), y, de hecho, todos estarían sufriendo esfuerzos mucho mayores de los que puede soportar. Esto no es impedimento para realizar el

cálculo de rigidez, pues la curva de rigidez no depende de si la unión es capaz de soportar o no los esfuerzos, pero es de esperar que la unión, al tener muchos elementos plastificados no esté trabajando en régimen elástico.

**Rigidez rotacional del componente de la unión**

Ítem	Comp.	Cargas	MEd [kNm]	Mj,Rd [kNm]	Sj,ini [kNm/rad]	Sjs [kNm/rad]	$\phi$ [mrad]	$\phi_c$ [mrad]	L [m]	Sj,R [kNm/rad]	Sj,P [kNm/rad]	Clase	
>	Dintel	My	LE1	129,3	94,1	16395,1	0,0	905,1	14,8	18,0	24371,7	487,4	Semi-rígido

Figura 51: Resultados de rigidez de la primera iteración con IPE300 sin cartela

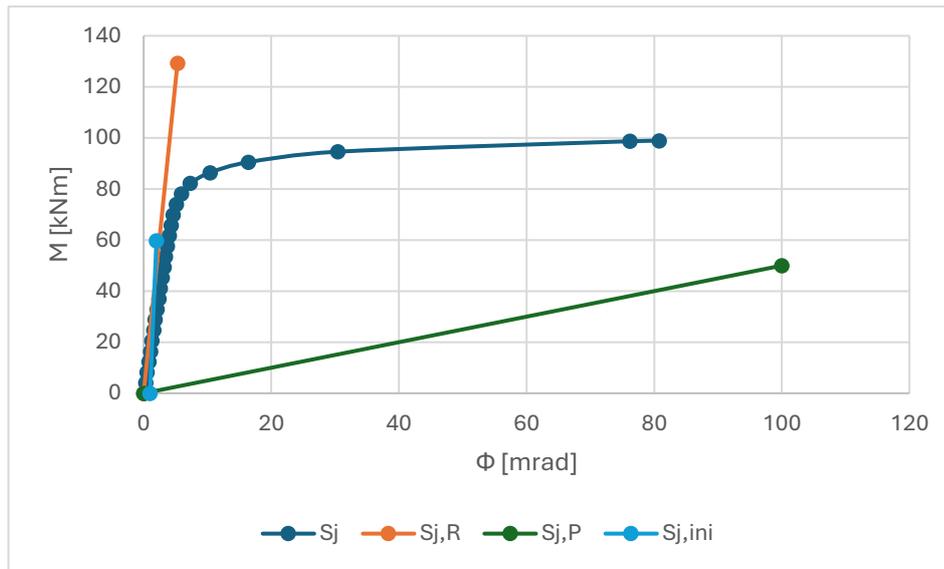


Figura 52: Diagrama de rigidez de la primera iteración con perfil IPE300 sin cartela

El resultado del cálculo de rigidez de la unión muestra como el momento aplicado sobrepasa los 94,1 kNm que suponen el momento máximo que soporta la unión antes de llegar al 5% de plastificación, con lo que el software detiene el cálculo. Como se ve en la Figura 51, la unión está clasificada como semirrígida, pero las cargas son demasiado grandes. Esto causa que no se pueda obtener un valor para la rigidez secante, pues no se llega a cortar la curva de rigidez con el valor del momento sollicitación (Figura 52). Aun así, el software obtiene un valor para el giro relativo de los elementos. Para ofrecer este valor se basa en la posición de la deformada de los elementos. Este giro relativo tiene un valor demasiado grande, con lo que se entiende que la unión ha plastificado significativamente y está formándose una rótula plástica en la sección.

Si bien, cabe destacar que estos esfuerzos se obtuvieron con la suposición de nudos completamente rígidos, con lo que, es posible volver a SAP2000 con este valor de rigidez y recalculer los esfuerzos, sabiendo que se verán reducidos, como ocurrió al reducir la rigidez a 0 en el caso de nudos completamente articulados. Lo habitual en estos casos es comenzar a iterar con el valor de la rigidez secante, que por ser un resultado más próximo al que

finalmente se obtendrá del cálculo iterativo convergerá más rápido al valor final. Como en este caso IDEAStática no ha podido obtener este valor se comenzará iterando con el valor de rigidez inicial.

Tabla 4: Resultado del cálculo iterativo para la unión de IPE300 sin cartela

Nº	$M_b$ [Nm]	$\delta_c$ [mm]	$\sigma_{\max}$ dintel [MPa]	Sección $\sigma_{\max}$	$\Phi$ [mrad]	$S_{j,s}$ [kNm/rad]	Variación rigidez [%]	Variación Momento [%]
0	-129,30	186,74	-236,03	b	905,10	-	-	-
1	-118,16	194,34	-227,73	c	445,40	-	-	8,61

En la Tabla 4 se muestra el resultado del proceso iterativo. Tras el recálculo de los esfuerzos de SAP2000 sigue sin poder obtenerse un valor para la rigidez secante. El nuevo momento obtenido sigue haciendo que la unión sobrepase el límite de deformación plástica y el software detenga el cálculo. A la vista del valor que se obtiene para la tensión normal, no se produce un fallo por plastificación del dintel, sino que falla la unión.

A continuación, y operando del mismo modo, se procederá a realizar el cálculo para la unión de los perfiles IPE330. En este caso, el análisis de tensión-deformación muestra que las soldaduras del dintel a la placa de testa sobrepasan el límite elástico, aunque muy ligeramente, como se ve en la Figura 53.

Análisis	✓	100,0%
Placas	✓	3,0 < 5,0%
Tornillos	✓	92,3 < 100%
Soldaduras	✗	101,7 > 100%

Figura 53: Valores máximos de utilización de los elementos de la unión de IPE330 sin cartela

Pasando al cálculo de rigidez, en este caso a pesar de que algún elemento supera su límite elástico, no es suficiente para poder considerar que la unión ha sufrido plastificación significativa como en el caso anterior y el software sí que puede calcular el valor de la rigidez secante. Además, es de esperar que al recalculer los esfuerzos incluyendo la rigidez, el momento que sufre la unión disminuya y las soldaduras no lleguen a plastificar.

Rigidez rotacional del componente de la unión

	Ítem	Comp.	Cargas	MEd [kNm]	Mj,Rd [kNm]	Sj,ini [kNm/rad]	Sjs [kNm/rad]	$\phi$ [mrad]	$\phi_c$ [mrad]	L [m]	Sj,R [kNm/rad]	Sj,P [kNm/rad]	Clase
>	Dintel	My	LE1	129,3	115,8	20771,0	3031,2	42,6	9,4	18,0	34329,2	686,6	Semi-rígido

Figura 54: Resultados de rigidez de la primera iteración de la unión de IPE330 sin cartela

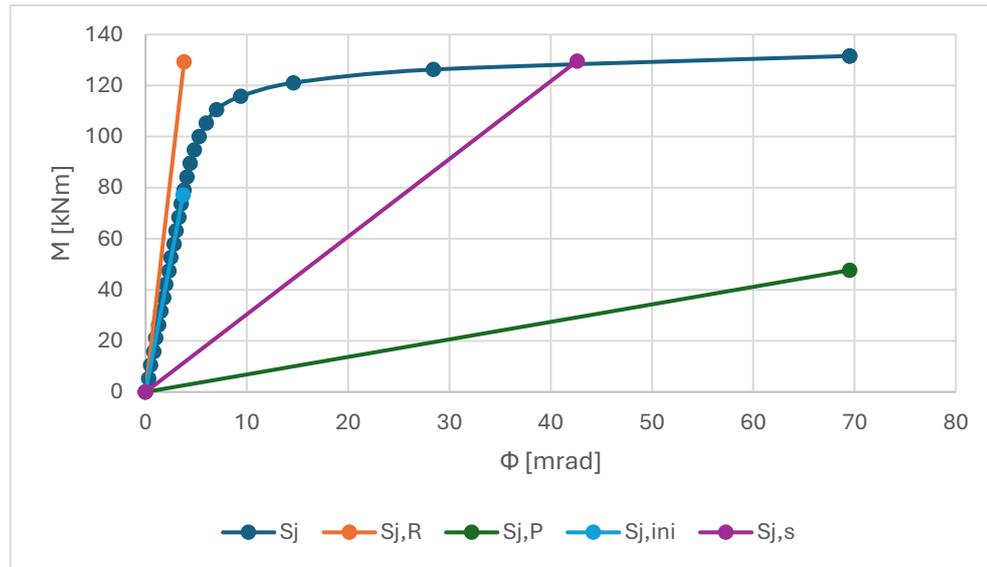


Figura 55: Diagrama de rigidez de la primera iteración con perfil IPE330 sin cartela

De nuevo la unión se clasifica como semirrígida (Figura 54), pero la curva corta al momento solicitación fuera de la zona lineal de la misma, como se ve en la Figura 55. Esto hace que pequeñas variaciones del momento puedan resultar en grandes variaciones en el giro de la unión, además de ser difíciles de prever por no presentar un comportamiento lineal. Para determinar el comportamiento real de la unión se realiza el proceso iterativo entre SAP2000 e IDEAStática.

Tabla 5: Resultados del cálculo iterativo de la unión con IPE330 sin cartela

Nº	$M_b$ [Nm]	$\delta_c$ [mm]	$\sigma_{\max \text{ dintel}}$ [MPa]	Sección $\sigma_{\max}$	$\Phi$ [mrad]	$S_{j,s}$ [kNm/rad]	Variación rigidez [%]	Variación Momento [%]
0	-129,19	119,91	-184,53	b	42,6	3031,2	-	-
1	-75,00	208,70	-237,49	c	3,3	22844,8	86,73	41,94
2	-117,89	138,43	-178,50	c	10,1	11671,7	48,90	57,18
3	-108,78	153,35	-191,03	c	6,2	17503,6	33,31	7,72
4	-114,82	143,45	-182,27	c	8,1	14136,5	19,23	5,55
5	-111,86	148,30	-186,80	c	7,0	16033,9	11,83	2,57
6	-113,66	145,35	-184,31	c	7,6	14894,0	7,10	1,60
7	-112,63	147,05	-185,74	c	7,2	15551,7	4,22	0,90
8	-113,24	146,04	-184,89	c	7,5	15163,9	2,49	0,54
9	-112,88	146,62	-185,38	c	7,3	15393,4	1,49	0,31

En este caso, sí es posible realizar un cálculo iterativo con varias etapas que convergen a un valor final. Se puede ver con facilidad en la Tabla 5 que entre las diferentes iteraciones no se corresponde una variación proporcional entre el momento y la rigidez, debido a que como se ve en el diagrama de rigidez la

unión está trabajando fuera de la zona lineal. A consecuencia de esto, el proceso iterativo para obtener la rigidez se vuelve largo y tedioso.

#### Rigidez rotacional del componente de la unión

Ítem	Comp.	Cargas	MEd [kNm]	Mj,Rd [kNm]	Sj,ini [kNm/rad]	Sjs [kNm/rad]	$\phi$ [mrad]	$\phi_c$ [mrad]	L [m]	Sj,R [kNm/rad]	Sj,P [kNm/rad]	Clase	
>	Dintel	My	LE1	112,9	117,5	21134,4	15393,4	7,3	9,4	18,0	34329,2	686,6	Semi-rígido

Figura 56: Resultado final del cálculo de rigidez de la unión con IPE330 sin cartela

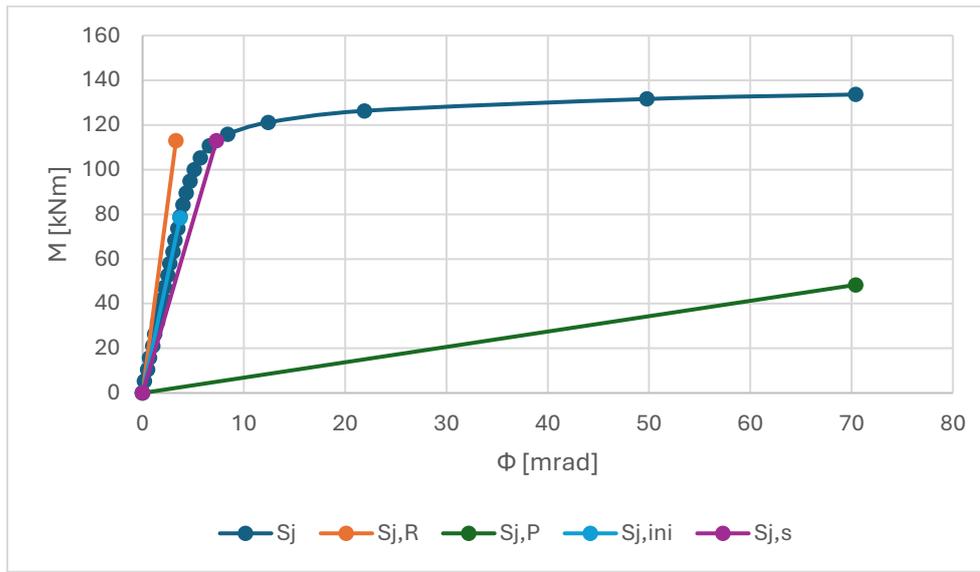


Figura 57: Diagrama de rigidez de la unión con IPE330 sin cartela

La comparativa del diagrama de rigidez inicial (Figura 55) con el obtenido tras el proceso iterativo (Figura 57) refleja un gran cambio en la rigidez secante. El valor ha aumentado muy significativamente, pasando de 3031,2 kNm/rad a 15393,4 kNm/rad, pero sin llegar al valor de la rigidez inicial como se ve en la Figura 56, acercándose a la zona lineal de la curva, aunque sin llegar a alcanzarla. Esto se denota en la Tabla 5, donde, sin llegar a ser proporcional, se puede observar cómo al avanzar las iteraciones cada vez la variación entre momento y rigidez empieza a ser algo más proporcional, por estar en una zona de la curva algo menos no lineal que en la que se comenzó el proceso.

Para terminar el cálculo de esta unión, y para comprobar los resultados, se calculará el giro relativo del nudo utilizando SAP2000. Como ya se describió anteriormente, el giro se obtiene como la diferencia entre el giro absoluto del extremo que llega al nudo de los dos elementos.

Tabla 6: Cálculo del giro relativo con SAP2000 en la unión con IPE330 sin cartela

Elemento	Pilar	Dintel	$\Phi_{rel}$
$\Phi$ [rad]	-0,01046	-0,01781	0,00735

En la Tabla 6, se muestran los valores absolutos de los giros, ambos negativos por ser en sentido horario, como el momento aplicado. Al restar, se obtiene el valor del giro relativo entre los elementos. Este giro es igual al giro que se obtuvo en IDEAStática, lo que confirma que los cálculos correlacionando ambos programas son correctos.

Por último, se realizará el estudio de la unión con IPE360. Se procede de igual modo que en los casos anteriores. Tras ver que la unión con IPE330 no tuvo problemas en el cálculo tensión-deformación no se realizará en esta ocasión. A continuación, se estudiará la rigidez de la unión en una primera aproximación con los esfuerzos obtenidos en SAP2000 con nudos rígidos.

Tabla 7: Resultados del cálculo iterativo de la unión con IPE360 sin cartela

Nº	M <sub>b</sub> [Nm]	δ <sub>c</sub> [mm]	σ <sub>max dintel</sub> [MPa]	Sección σ <sub>max</sub>	Φ [mrad]	S <sub>j,s</sub> [kNm/rad]	Variación rigidez [%]	Variación Momento [%]
0	-129,11	86,83	-145,78	b	6,7	19323,3	-	-
1	-111,63	107,55	-147,87	c	4,8	23391,6	21,05	13,59
2	-114,32	104,36	-144,95	c	5,0	22955,9	1,86	2,40
3	-114,08	104,66	-145,22	c	5,0	23003,1	0,20	0,20

Rigidez rotacional del componente de la unión

Ítem	Comp.	Cargas	MEd [kNm]	Mj,Rd [kNm]	Sj,ini [kNm/rad]	Sjs [kNm/rad]	φ [mrad]	φc [mrad]	L [m]	Sj,R [kNm/rad]	Sj,P [kNm/rad]	Clase	
>	Dintel	My	LE1	114,1	150,5	24237,6	23003,1	5,0	14,8	18,0	47454,2	949,1	Semi-rígido

Figura 58: Resultados finales del cálculo de rigidez de la unión con IPE360 sin cartela

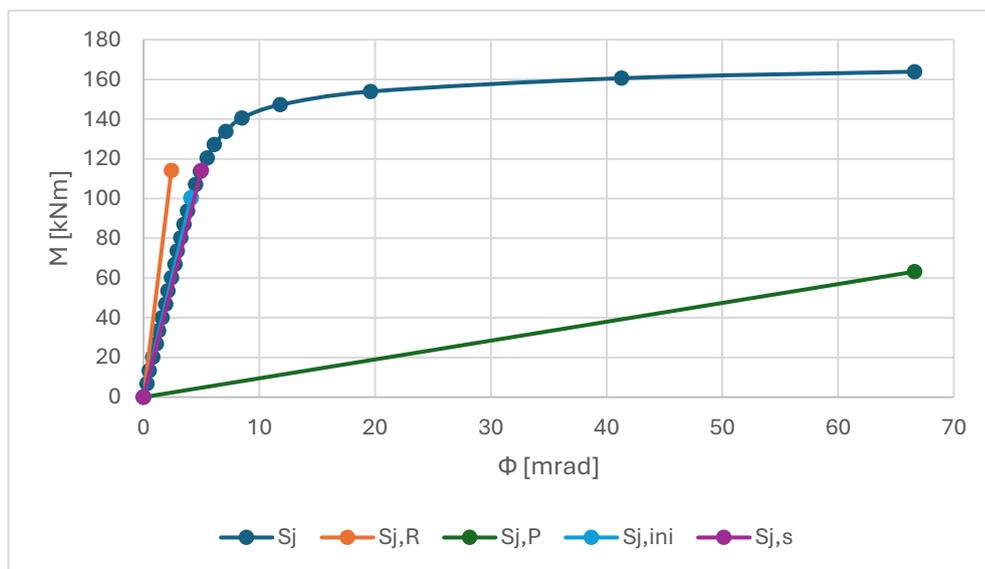


Figura 59: Diagrama de rigidez de la unión con IPE360 sin cartela

En este caso, la convergencia ha sido más rápida, siendo necesarias solo 3 iteraciones (Tabla 7) para estar por debajo del 1% de diferencia entre

momentos y rigideces. Como se aprecia en la Figura 59 y en los valores de rigidez inicial y secante (Figura 58) estos valores son muy similares, estando prácticamente superpuestos en el gráfico, por estar trabajando la unión en una zona muy próxima a la lineal.

Hay que destacar como los valores de variación de rigidez y momento entre iteraciones consecutivas es bastante proporcional. Se debe esto a que ahora la unión está en una zona en la que la curva de rigidez está muy cerca de ser lineal, con lo que la relación entre ambas está muy cerca de ser lineal.

Como ya se hizo en el caso anterior, se verifica en la Tabla 8 que los giros relativos que se obtienen en IDEASTatica se corresponden con los que se pueden obtener con SAP2000. Siguiendo el mismo procedimiento se llega a que de nuevo ambos valores coinciden, salvo por el redondeo de IDEASTatica.

Tabla 8: Cálculo del giro relativo con SAP2000 en la unión con IPE360 sin cartela

Elemento	Pilar	Dintel	$\Phi_{rel}$
$\Phi$ [rad]	-0,00765	-0,01262	0,00497

### 3.3. Cálculo de rigidez uniones con cartela

Tras el cálculo de rigidez de las uniones simplemente atornilladas, se pasa al cálculo de rigidez de las uniones reforzadas con una cartela, que se espera presenten una mayor rigidez que las anteriores. Para estudiar su comportamiento, se procederá del mismo modo que para las uniones sin cartela. En primer lugar, se comienza con la unión realizada para los pórticos IPE300. De nuevo, previamente al cálculo de la rigidez se realiza el cálculo de tensión-deformación para esta unión.

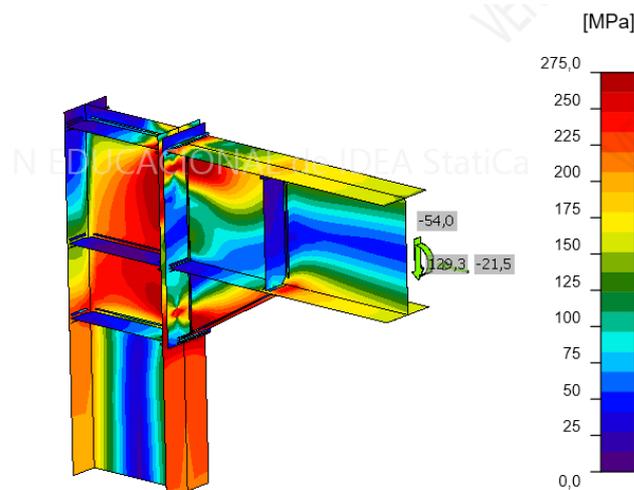


Figura 60: Diagrama de tensiones de la unión de IPE300 con cartela

Análisis	✓	100,0%
Placas	✓	2,6 < 5,0%
Tornillos	✓	91,7 < 100%
Soldaduras	✓	99,2 < 100%

Figura 61: Valores máximos de utilización de los elementos de la unión de IPE300 con cartela

Como se puede ver, la unión resiste las cargas (Figura 61), teniendo tan solo algunas pequeñas zonas plastificadas en la placa de testa y en las almas de pilar y dintel en las zonas cercanas a la unión (Figura 60), pero no supondrán problemas para el cálculo de rigidez. Sin más, se pasará a realizar el primer cálculo de rigidez para esta unión.

**Rigidez rotacional del componente de la unión**

	Ítem	Comp.	Cargas	MEd [kNm]	Mj,Rd [kNm]	Sj,ini [kNm/rad]	Sjs [kNm/rad]	$\phi$ [mrad]	$\phi_c$ [mrad]	L [m]	Sj,R [kNm/rad]	Sj,P [kNm/rad]	Clase
>	Dintel	My	LE1	129,3	131,8	84579,5	26030,6	5,0	6,8	18,0	24371,7	487,4	Rígido

Figura 62: Resultados de rigidez de la primera iteración de la unión de IPE300 con cartela

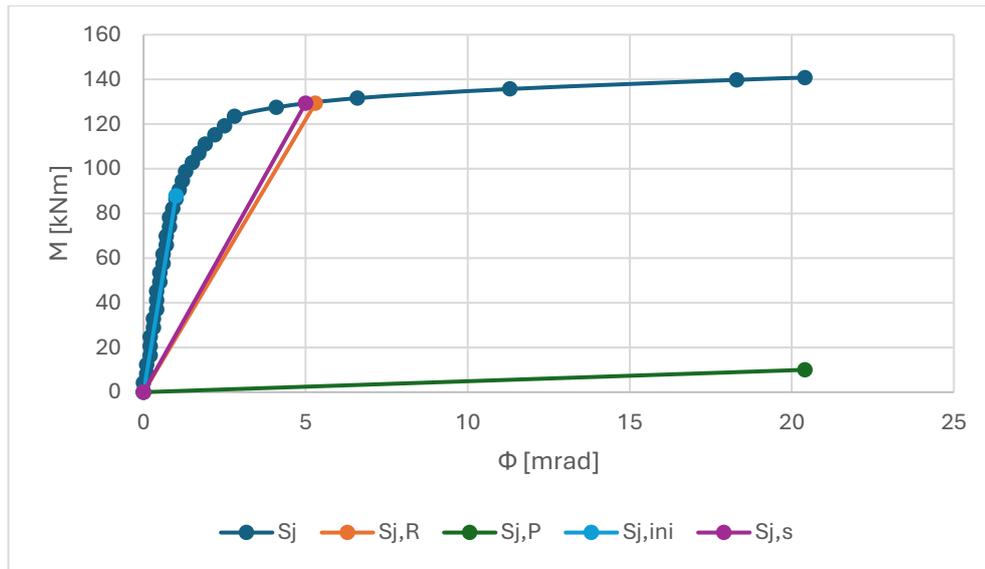


Figura 63: Diagrama de rigidez de la primera iteración de la unión de IPE300 con cartela

En este caso, la rigidez inicial de la unión es ya rígida (Figura 62), como era esperable por la adición de la cartela, aunque el punto de trabajo del primer cálculo dista de esta zona. Como se puede apreciar en el resultado de los cálculos, el valor de la rigidez es pequeño, y dista mucho del valor de la rigidez inicial. Este hecho se ve claramente en la Figura 63, donde la rigidez secante está en una zona de la curva con una fuerte no linealidad. Una vez se ha hecho este primer cálculo, se realiza el proceso iterativo para encontrar la rigidez real de la unión.

Tabla 9: Resultados del cálculo iterativo de la unión con IPE300 con cartela

Nº	$M_b$ [Nm]	$\delta_c$ [mm]	$\sigma_{\max}$ dintel [MPa]	Sección $\sigma_{\max}$	$\Phi$ [mrad]	$S_{j,s}$ [kNm/rad]	Variación rigidez [%]	Variación Momento [%]
0	-129,26	168,74	-236,03	b	5,0	26030,6	-	-
1	-121,97	185,55	-222,71	b	2,6	46163,3	43,61	5,63
2	-125,05	178,44	-228,35	b	3,2	39144,3	15,20	2,52
3	-124,32	180,14	-227,00	b	3,0	41452,5	5,56	0,58
4	-124,58	179,53	-227,49	b	3,1	40632,3	1,97	0,20
5	-124,49	179,74	-227,32	b	3,0	40912,6	0,68	0,07

## Rigidez rotacional del componente de la unión

Ítem	Comp.	Cargas	MEd [kNm]	Mj,Rd [kNm]	Sj,ini [kNm/rad]	Sjs [kNm/rad]	$\phi$ [mrad]	$\phi_c$ [mrad]	L [m]	Sj,R [kNm/rad]	Sj,P [kNm/rad]	Clase	
>	Dintel	My	LE1	124,5	132,4	85248,6	40912,6	3,0	6,9	18,0	24371,7	487,4	Rígido

Figura 64: Resultados finales del cálculo de rigidez de la unión con IPE300 con cartela

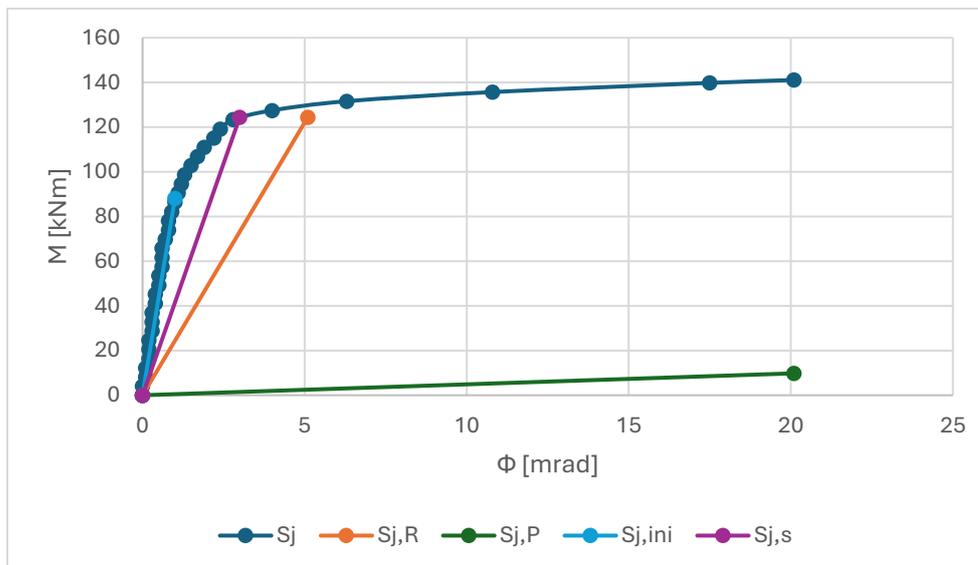


Figura 65: Diagrama de rigidez de la unión de IPE300 con cartela

Si comparamos la Figura 63 con la Figura 64, se ve como la recta de rigidez secante está ya bastante más cerca de la recta de rigidez inicial, aunque su valor sigue estando lejos de la rigidez inicial. Por último, se obtiene el valor del giro relativo a partir de los giros absolutos de pilar y dintel en SAP2000, donde de nuevo se vuelve a verificar que los giros coinciden entre ambos softwares (Tabla 10).

Tabla 10: Cálculo del giro relativo con SAP2000 en la unión de IPE300 con cartela

Elemento	Pilar	Dintel	$\Phi_{rel}$
$\Phi$ [rad]	-0,01617	-0,01922	0,00305

A continuación, se pasa a realizar el cálculo de rigidez para la unión con perfiles IPE330. En este caso no se realiza el cálculo de tensión-deformación, puesto que ya el perfil anterior no presentaba problemas ante las cargas impuestas, y al tener esta una mayor sección, es evidente que esta unión tampoco presentará problemas. Los resultados del cálculo se presentan a continuación.

Tabla 11: Resultados del cálculo iterativo de la unión de perfil IPE330 con cartela

Nº	M <sub>b</sub> [Nm]	δ <sub>c</sub> [mm]	σ <sub>max dintel</sub> [MPa]	Sección σ <sub>max</sub>	Φ [mrad]	S <sub>j,s</sub> [kNm/rad]	Variación rigidez [%]	Variación Momento [%]
0	-129,19	119,91	-184,53	b	1,8	72467,0	-	-
1	-125,40	126,12	-179,11	b	1,6	77808,5	6,86	2,93
2	-125,66	125,70	-179,41	b	1,6	77438,2	0,47	0,20

Rigidez rotacional del componente de la unión

Ítem	Comp.	Cargas	MEd [kNm]	Mj,Rd [kNm]	Sj,ini [kNm/rad]	Sjs [kNm/rad]	φ [mrad]	φc [mrad]	L [m]	Sj,R [kNm/rad]	Sj,P [kNm/rad]	Clase	
>	Dintel	My	LE1	125,7	154,6	98946,4	77438,2	1,6	5,4	18,0	34329,2	686,6	Rígido

Figura 66: Resultados de rigidez de la unión de perfil IPE330 con cartela

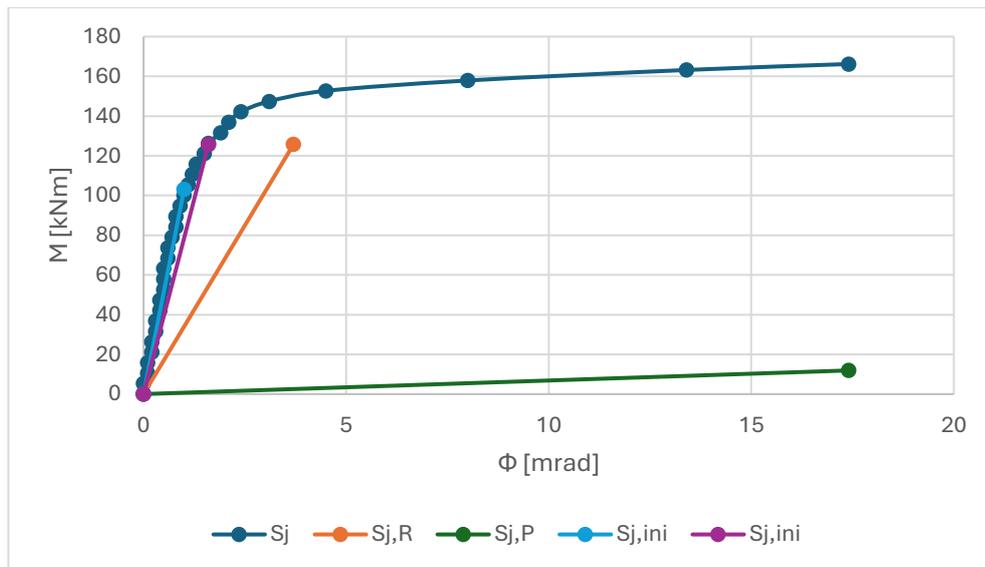


Figura 67: Diagrama de rigidez de la unión de IPE330 con cartela

Al estar la rigidez secante muy próxima a la rigidez inicial los resultados varían muy poco entre las iteraciones y son necesarias apenas dos iteraciones para alcanzar la convergencia (Tabla 11). Esto es lógico a la vista de la Figura 67, en la que la recta de rigidez secante está muy cercana a la recta de rigidez inicial. Los demás valores obtenidos se muestran en la Figura 66. Para concluir con esta unión se comprueba el giro relativo en SAP2000 (Tabla 12).

Tabla 12: Cálculo del giro relativo con SAP2000 en la unión de IPE330 con cartela

Elemento	Pilar	Dintel	$\Phi_{rel}$
$\Phi$ [rad]	-0,01162	-0,01324	0,00162

Por último, se calculará la rigidez de la unión con IPE360. De nuevo no será necesario realizar el cálculo de tensión-deformación. Se realiza el cálculo iterativo para los esfuerzos y se obtiene la Tabla 13.

Tabla 13: Resultados del cálculo iterativo para la unión de IPE360 con cartela

Nº	$M_b$ [Nm]	$\delta_c$ [mm]	$\sigma_{max}$ dintel [MPa]	Sección $\sigma_{max}$	$\Phi$ [mrad]	$S_{j,s}$ [kNm/rad]	Variación rigidez [%]	Variación Momento [%]
0	-129,11	86,83	-145,78	b	1,2	112235,4	-	-
1	-125,72	90,85	-141,96	b	1,1	115753,5	3,0393	2,6257
2	-125,82	90,73	-142,07	b	1,1	115661,5	0,0795	0,0795

Rigidez rotacional del componente de la unión

Ítem	Comp.	Cargas	MEd [kNm]	Mj,Rd [kNm]	Sj,ini [kNm/rad]	Sjs [kNm/rad]	$\phi$ [mrad]	$\phi_c$ [mrad]	L [m]	Sj,R [kNm/rad]	Sj,P [kNm/rad]	Clase	
>	Dintel	My	LE1	125,8	184,8	117363,1	115661,5	1,1	5,1	18,0	47454,2	949,1	Rígido

Figura 68: Resultados de rigidez de la unión de perfil IPE360 con cartela

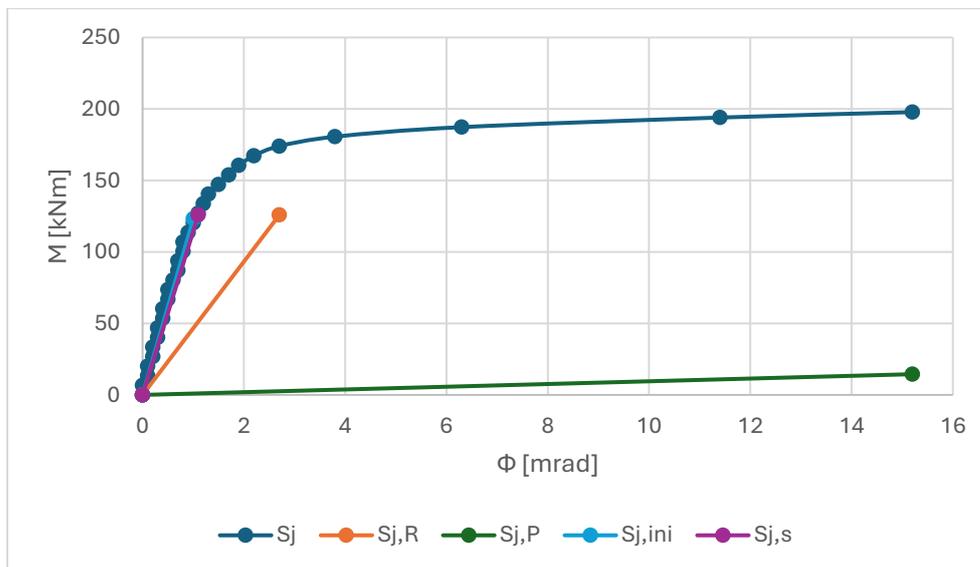


Figura 69: Diagrama de rigidez de la unión de IPE360 con cartela

En este caso, es importante apreciar que, como la unión trabaja en la zona lineal de la curva de rigidez, el momento y la rigidez varían en la misma proporción. En la Figura 69 se puede ver como se superponen las rectas de rigidez secante. En la Figura 68 se muestran los demás valores de interés sobre la rigidez de la unión. Como en las anteriores uniones, se calcula el giro relativo con SAP2000 en la Tabla 14.

Tabla 14: Cálculo del giro relativo con SAP2000 en la unión de IPE360 con cartela

Elemento	Pilar	Dintel	$\Phi_{rel}$
$\Phi$ [rad]	-0,00844	-0,00953	0,00109

### 3.4. Resultados

Tras obtener los resultados de las seis uniones, los valores más relevantes se recogen en las siguientes tablas, para facilitar su visualización. Primero se compararán los resultados de los distintos perfiles con el mismo tipo de unión, para, posteriormente, pasar a comparar los resultados entre las mismas uniones y con distintos perfiles.

Tabla 15: Resumen de los resultados de rigidez en las uniones sin cartela

Perfil	IPE300	IPE330	IPE360
$M_a$ [kNm]	-	-55,55	-55,97
$M_b$ [kNm]	-	-112,88	-114,08
$M_c$ [kNm]	-	130,11	128,89
$\sigma_{max\ dintel}$ [MPa]	-	-184,53	-145,78
Posición $\sigma_{max}$	c	c	c
$\Phi_b$ [mrad]	-	7,3	5,0
$\delta_c$ [mm]	-	146,62	104,66
$S_{j,s}$ [kNm/rad]	-	15393,4	23003,1

Tabla 16: Resumen de los resultados de rigidez en las uniones con cartela

Perfil	IPE300	IPE330	IPE360
$M_a$ [kNm]	-61,43	-61,83	-61,73
$M_b$ [kNm]	-124,49	-125,66	-125,82
$M_c$ [kNm]	118,50	117,34	117,17
$\sigma_{max\ dintel}$ [MPa]	-227,32	-179,41	-142,07
Posición $\sigma_{max}$	b	b	b
$\Phi_b$ [mrad]	3,0	1,6	1,1
$\delta_c$ [mm]	179,74	125,70	90,73
$S_{j,s}$ [kNm/rad]	40912,6	77438,2	115661,5

En la Tabla 15 se recogen los resultados de las uniones sin cartela. En este caso solo se pueden comparar dos uniones, pues de la unión con IPE300 no

---

ha sido posible obtener un valor de rigidez. En la Tabla 16 se tienen los resultados de las uniones con cartela.

A la vista de ambas tablas, antes de comparar cuantitativamente los resultados, es inmediato notar como en las uniones sin cartela, en las cuales la rigidez es menor, la tensión normal máxima está en la sección “c”, mientras que, en las uniones más rígidas, las que tienen cartela, la tensión máxima ha pasado a estar en la sección “b”. Esto se corresponde con los resultados obtenidos para los pórticos rígidos y articulados (Tabla 2 y Tabla 3)-

Pasando a comparar los valores de los diferentes pórticos, los momentos que llegan a las tres secciones no varían apenas entre los distintos pórticos, a pesar de la gran diferencia de tensiones y desplazamientos. Estas grandes diferencias están ocasionadas porque cada pórtico tiene una sección diferente. Las uniones están modeladas de un modo semejante en ambos casos y la carga es la misma también, con lo que esta diferencia solo se puede deber a las diferencias de sección.

Para evitar las diferencias que introducen en los resultados las diferentes secciones, se pasa a comparar los resultados obtenidos para cada sección. Así, se presentarán los valores de los cuatro casos (nudos articulados, uniones sin cartela y con cartela y nudos rígidos) para cada perfil.

En el caso de los pórticos de IPE300, al plastificar la unión no se tienen resultados para la unión sin cartela, lo que dificulta la comparación en este caso. Una parte importante de la unión plastificó, empezando a formarse en la sección una rótula plástica, que, aunque no se formase en su totalidad, sí que hizo que el giro relativo de pilar y dintel fuese muy grande, imposibilitando la obtención de la rigidez secante.

En las Tabla 17, Tabla 18 y Tabla 19, se muestran valores de rigidez, esfuerzos internos, tensiones normales, giros y carga crítica de pandeo. La nomenclatura de las secciones se muestra en la Figura 20 Para no alargarlas de un modo innecesario, se han omitido valores repetidos.

Así, como solo se ha liberado el momento en el nudo “b”, los esfuerzos axil y cortante se transmiten completamente a través de él. Como se ve en la Figura 70, el cortante en el pilar y el axil en el dintel son constantes, y como ambos son los únicos esfuerzos que llegan a la unión en dirección horizontal, su valor será el mismo, y por ello solo se muestra su valor en “a”. Algo similar ocurre con el cortante a lo largo del pilar, que es constante. Es el único esfuerzo horizontal en llegar a “b”, con lo que el valor del cortante en esta sección será el mismo. El cortante en el dintel varía linealmente hasta llegar a “c”, donde su valor es nulo en todos los casos. También se omite escribir explícitamente las

reacciones en los apoyos, pues su valor es el mismo que el de los esfuerzos en “a”.

Tabla 17: Esfuerzos, tensiones y desplazamientos en pórticos con IPE300

Unión	Rígida	Con cartela	Sin cartela	Articulada
$S_{i,s}$ [kNm/rad]	$\infty$	40912,60	-	0,00
Clasificación	Rígida	Rígida	Semirrígida	Articulada
$N_a$ [kN]	-54,00	-54,00	-	-54,00
$V_a$ [kN]	-21,45	-20,66	-	0,00
$M_a$ [kNm]	-63,79	-61,45	-	0,00
$M_b$ [kNm]	-129,26	-124,52	-	0,00
$M_c$ [kNm]	113,73	118,47	-	243,00
$\sigma_{b,dintel}$ [MPa]	-236,23	-227,60	-	0,00
$\sigma_c$ [MPa]	-208,15	-216,51	-	-431,21
$\delta_c$ [mm]	168,74	179,74	-	467,08
$\Phi_b$ [mrad]	0,00	7,30	-	83,09
$\lambda_{cri}$	22,60	21,82	-	9,86
Variación $\lambda_{cri}$ [%]	0,00	3,45	-	56,37

Tabla 18: Esfuerzos, tensiones y desplazamientos en pórticos con IPE330

Unión	Rígida	Con cartela	Sin cartela	Articulada
$S_{i,s}$ [kNm/rad]	$\infty$	77438,20	15393,40	0,00
Clasificación	Rígida	Rígida	Semirrígida	Articulada
$N_a$ [kN]	-54,00	-54,00	-54,00	-54,00
$V_a$ [kN]	-21,41	-20,83	-18,75	0,00
$M_a$ [kNm]	-63,57	-61,83	-55,66	0,00
$M_b$ [kNm]	-129,19	-125,63	-113,10	0,00
$M_c$ [kNm]	113,80	117,36	129,89	243,00
$\sigma_{b,dintel}$ [MPa]	-184,53	-179,45	-161,54	0,00
$\sigma_c$ [MPa]	-162,96	-167,85	-185,09	-340,65
$\delta_c$ [mm]	119,91	125,73	146,27	331,60
$\Phi_b$ [mrad]	0,00	1,60	7,30	119,91
$\lambda_{cri}$	31,79	30,96	28,20	13,89
Variación $\lambda_{cri}$ [%]	0,00	2,61	11,29	56,30

Tabla 19: Esfuerzos, tensiones y desplazamientos en pórticos con IPE360

Unión	Rígida	Con cartela	Sin cartela	Articulada
$S_{j,s}$ [kNm/rad]	$\infty$	115661,50	23003,10	0,00
Clasificación	Rígida	Rígida	Semirrígida	Articulada
$N_a$ [kN]	-54,00	-54,00	-54,00	-54,00
$V_a$ [kN]	-21,38	-20,84	-18,89	0,00
$M_a$ [kNm]	-63,35	-61,73	-55,98	0,00
$M_b$ [kNm]	-129,11	-125,82	-114,10	0,00
$M_c$ [kNm]	113,88	117,17	128,89	243,00
$\sigma_{b,dintel}$ [MPa]	-145,78	-142,07	-128,84	0,00
$\sigma_c$ [MPa]	-128,93	-132,50	-145,19	-268,83
$\delta_c$ [mm]	86,83	90,73	104,62	239,88
$\Phi_b$ [mrad]	0,00	1,10	5,00	42,67
$\lambda_{cri}$	43,87	42,81	39,23	19,18
Variación $\lambda_{cri}$ [%]	0,00	2,41	10,57	56,27

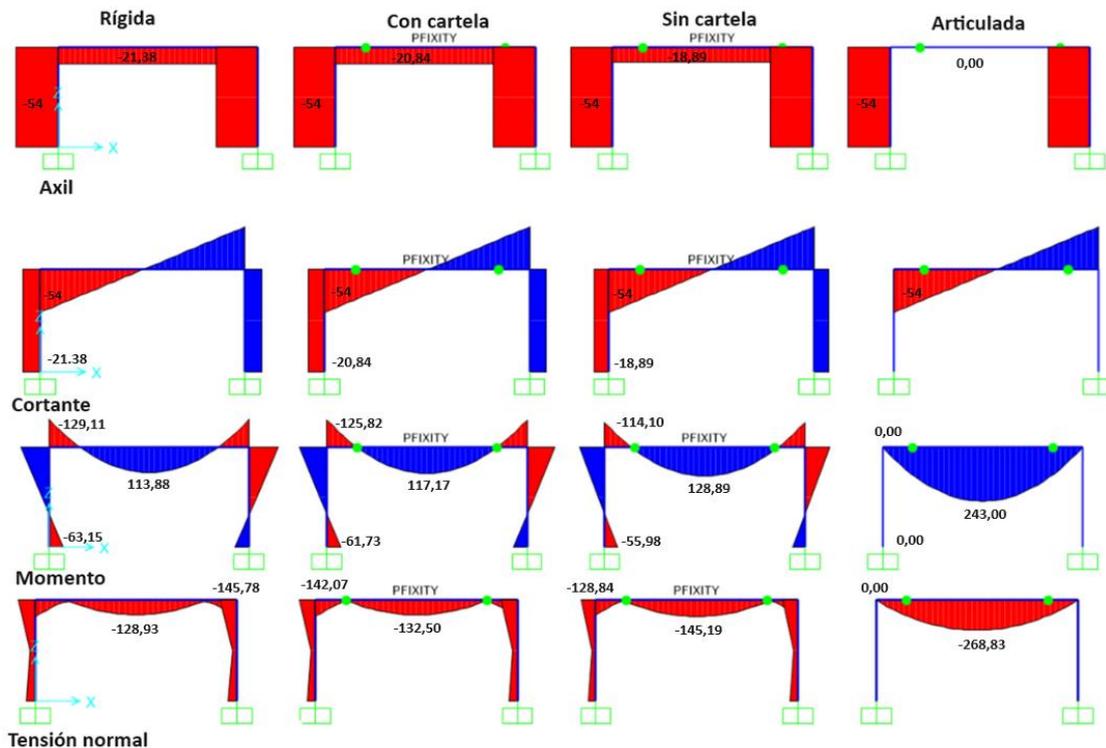


Figura 70: Diagramas de axil, cortante, momento y tensión normal en pórticos con IPE360

En la Figura 70 se puede apreciar como los diagramas apenas varían entre las uniones rígidas y las uniones con cartela y sin cartela, pero sin embargo la diferencia es notable con respecto al diagrama del pórtico articulado. El

comportamiento es completamente distinto en este último caso, hecho lógico teniendo en cuenta que, en las distintas uniones, en ningún caso buscan permitir completamente el giro, sino todo lo contrario. A la vista del diagrama es evidente afirmar que el comportamiento de las uniones analizadas es muy similar, en cuanto a los esfuerzos en la estructura, a una unión idealmente rígida y muy diferente a la unión articulada.

Pasando a un análisis más cuantitativo, hay que recurrir a los valores de las tablas. Para realizar la comparación, se analizarán las variaciones de los distintos parámetros de la estructura con la variación de la rigidez. Como es evidente, solo se podrá obtener una variación porcentual de rigidez entre las uniones modeladas en IDEASTatica, dado que no es matemáticamente posible calcular una variación en la que uno de los valores sea cero o infinito. Este cálculo no es posible realizarlo para los pórticos con IPE300 (Tabla 17), al no disponer de información de rigidez para la unión sin cartela.

En primer lugar, se obtendrá la variación de la rigidez entre los casos de uniones con y sin cartela. Para los pórticos construidos con IPE330 el incremento de rigidez al añadir la cartela es de un 403,06% y para los casos con IPE360 es de un 402,80%. Al ser prácticamente proporcional es esperable que las variaciones sean también proporcionales en el resto de los valores que se van a estudiar.

El primer esfuerzo por estudiar será el axil en el pilar. El axil es constante en los pilares de todos los pórticos. Al no existir discontinuidades en la transmisión de esfuerzos en dirección vertical, toda la carga aplicada en el dintel se distribuye en los pilares, y estos la transmiten en los apoyos.

En cuanto al cortante en el pilar, y, como se explicó anteriormente, al axil en el dintel se produce una ligera variación, al disminuir la rigidez también disminuye este cortante, y el momento que llega a "b" también disminuye. Estos dos esfuerzos están interrelacionados, al ser menor el momento que llega al nudo por disminuir la rigidez, también tiene que disminuir el cortante, para mantener el equilibrio del diagrama de sólido libre en el pilar (Figura 71).

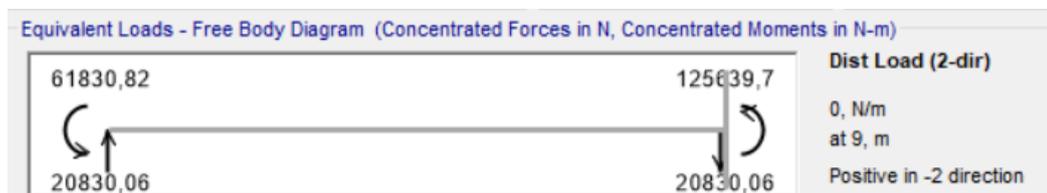


Figura 71: Diagrama de sólido libre de un pilar del pórtico de perfiles IPE330 con uniones acarteladas

Analizando cuantitativamente los cambios en el cortante, la variación es de 11,09% en el caso de IPE330 y de 10,32% para el IPE360. En el caso de la variación entre el pórtico con nudos rígidos y el pórtico de nudos acartelados

es de 3,82% para perfil IPE300, 2,78% para IPE330 y de 2,59% para IPE360. Para el momento, los cambios entre los pórticos con y sin cartela serán los mismos, pues para verificar el equilibrio en el diagrama del sólido libre, la variación ha de ser lineal. A partir de la Figura 71, es inmediato establecer que el equilibrio se mantendrá si se verifica la ecuación 4, donde  $x$  es la distancia desde “b” a un punto cualquiera del pilar.

$$M_b = V_b * x \quad (4)$$

Lo mismo ocurre para el momento en el apoyo, pues no es más que la particularización de la ecuación 4 para el caso en el que  $x=9$  m.

Pasando a estudiar los momentos en el centro del dintel, cabe destacar que, en este caso, el momento aumenta al disminuir la rigidez. La variación de éste entre los pórticos con y sin cartela será de 10,67% para el IPE330 y de 10,00% para el IPE360. Entre los pórticos con nudos con cartela y los rígidos la variación es bastante inferior, estando en 4,16% para el IPE300, 3,12% para IPE330 y 2,88% para IPE360.

El siguiente punto para comparar, tras los esfuerzos internos, es la tensión normal que soporta la estructura. Para estudiar la variación de esta tensión con la rigidez se han elegido dos secciones, el centro del dintel y la unión por el lado del dintel.  $\sigma_{b,dintel}$ , disminuye al aumentar la rigidez, mientras que  $\sigma_c$  aumenta con la rigidez. Ambos valores son función del momento y del axil, por tanto, el cambio dependerá de estos dos valores.

En el caso de la diferencia entre los pórticos de uniones con cartela y sin cartela  $\sigma_{b,dintel}$  disminuye en un 11,08% para el IPE330 y 10,26% para el IPE360. La variación entre los casos con uniones completamente rígidas y con cartela es menor, siendo esta de 3,79% en el IPE300, 2,83% en el IPE330 y 2,61% en IPE360. Los cambios en  $\sigma_c$ , en los que aumenta al aumentar la rigidez, son de 10,27% para el IPE330 y de 9,57% para IPE360, entre los pórticos con uniones con y sin cartela. De nuevo, entre los pórticos con uniones acarteladas y con nudos rígidos, los aumentos son menores, siendo estos de 4,01% para IPE300, 3,00% para IPE330 y 2,76% para IPE360.

Pasando a los cambios en los desplazamientos, se han estudiado en la sección “c”, donde encuentran su valor máximo. En todos los casos, el desplazamiento se va haciendo más pequeño al aumentar la rigidez. Entre los pórticos con y sin cartela esta disminución es de 16,33% para IPE330 y de 15,30% para IPE360. Entre los pórticos rígidos y con cartela la disminución en el desplazamiento es menor, 6,51% para IPE300, 4,85% para IPE330 y de 4,49% para IPE360.

En cuanto al giro relativo entre pilar y dintel, un aumento de la rigidez disminuye el giro entre los elementos, estando este cambio muy relacionado con la rigidez, como se describió con anterioridad en este trabajo. La disminución del giro

relativo entre los elementos es de 356,25% para el IPE330 y de 354,54% para IPE360.

Por último, se tratará la variación de la carga crítica de pandeo. Si se compara el valor del factor de carga de pandeo de las uniones que se obtuvo tras el modelado (Figura 36 y Figura 42) con los obtenidos para la estructura completa, se puede ver como el factor es menor en las uniones. Al ser todos los factores de pandeo suficientemente grandes, no habrá fallos por pandeo, pero de ocurrir, sucedería antes en las alas de los perfiles en la unión que en cualquier otra zona de la estructura.

En cuanto a la variación del factor de pandeo entre los distintos pórticos se puede ver como en todos los casos se verifica que en las uniones clasificadas como rígidas la reducción del factor de carga es menor de un 5% respecto a los pórticos con nudos idealmente rígidos, mientras que en las uniones clasificadas como semirrígidas la diferencia es superior al 5%. En las uniones semirrígidas, a pesar de que la reducción del factor de carga es mayor, sigue teniendo un valor más cercano a los pórticos con uniones rígidas que a los pórticos con uniones articuladas.



## Capítulo 4: Conclusiones y líneas futuras

En este último capítulo, tras haber obtenido los resultados más relevantes para todas las configuraciones de pórtico y uniones, se comentarán los resultados más relevantes observados, así como posibles continuaciones a partir de este trabajo.

A lo largo de este trabajo se ha descrito el modelado de las estructuras y uniones con las que se ha realizado el estudio. Se ha detallado el proceso de cálculo de rigidez para los distintos casos a estudiar y la evolución de los resultados en función de los cambios en la rigidez.

### 4.1. Conclusiones

A partir de los resultados anteriores, se pueden destacar varios hechos con relación a los cambios en el comportamiento de los pórticos.

- Los resultados obtenidos entre SAP2000 e IDEASstatica se correlacionan correctamente entre ellos. Los giros relativos coinciden al calcularlos por separado entre ambos softwares, además de responder perfectamente a lo esperado teóricamente.
- Las uniones simples que solo tenían placa de testa se clasificaron todas como semirrígidas, mientras que las uniones reforzadas con la cartela se clasificaron todas como rígidas.
- El primer resultado que se obtiene de rigidez en IDEASstatica no puede utilizarse como definitivo si está fuera de la zona lineal de la curva de rigidez, independientemente de si la unión es rígida o articulada. Será necesario recalcular los esfuerzos en el programa de cálculo global en un proceso iterativo. La convergencia de este proceso requerirá de un mayor número de iteraciones cuando la rigidez secante se encuentre en una zona menos lineal de la curva de rigidez.
- En los pórticos con uniones clasificadas como semirrígidas y articuladas, la tensión normal máxima se encuentra en el centro del dintel. Mientras

que en los pórticos clasificados como rígidos la tensión máxima en el dintel pasaba a estar en el nudo, al igual que en los pórticos con nudos idealmente rígidos.

- Para poder obtener un valor de rigidez secante es necesario que la unión no haya plastificado significativamente, aunque la curva de rigidez se genere independientemente del valor de estas cargas. Aunque no se haya formado completamente una rótula plástica, si la plastificación es suficiente con pequeños incrementos en el momento el giro aumenta muy significativamente.
- A excepción del giro relativo, el resto de los parámetros de la unión han sufrido cambios muy poco relevantes, siendo del orden del 10% frente al 400% que cambió la rigidez de las uniones. A la vista de esto, es posible concluir que la rigidez no influye en gran medida en el comportamiento de la estructura, siempre y cuando la rigidez se mantenga en zonas cercanas a los límites para considerar una unión rígida. Aunque se clasifique una unión como semirrígida, puede satisfacer los requerimientos en cuanto a tensiones y desplazamientos.
- Al utilizar uniones semirrígidas se simplifica la ejecución de las uniones, como se ha visto a lo largo de este trabajo. Al ser necesarios menos elementos para fabricarlas es posible reducir los costes materiales, así como de mano de obra, pudiendo abaratar significativamente el coste de ejecución de una estructura.

## 4.2. Líneas futuras

Tomando como punto de partida este trabajo, en el que se ha estudiado la influencia de uniones rígidas y semirrígidas, aunque éstas con un comportamiento similar a las uniones rígidas, se proponen algunos temas en los que no se ha profundizado en este trabajo.

- Estudiar, de un modo semejante al presentado a lo largo este trabajo, la influencia de uniones articuladas o semirrígidas con un comportamiento semejante a las uniones articuladas en la estructura en la que estén incluidas.
- A partir de los resultados de rigidez que ofrece IDEAStica, obtener un método para aproximar la zona no lineal de la curva de rigidez mediante una o dos rectas.

De este modo, el proceso del cálculo iterativo de rigidez en uniones cuya rigidez secante se encuentre en esta zona de la curva se acortaría significativamente al tener caracterizada la curva de rigidez con rectas cuya ecuación será conocida. Al tener una ecuación para la curva de rigidez, al introducir el momento se obtiene el giro relativo y el valor de la semi-rigidez.

- A partir del uso de IDEASTatica, cuantificar la variación en la rigidez de distintas uniones por el uso de distintos elementos, tales como rigidizadores o cartelas.

### 4.3. Consideraciones adicionales

Por último, y antes de dar por concluido el trabajo, se quiere dar cuenta de una función de IDEASTatica. El software proporciona una aproximación del precio de fabricar una unión, en función de los materiales, tornillería o soldaduras. Cabe resaltar que este valor es solo una aproximación, pero aun así se puede tomar como referencia a la hora de tener una estimación. En el cálculo no se tiene en cuenta el precio de las vigas usadas para conformar los pórticos.

Tabla 20: Precio aproximado de las uniones

Unión	IPE300 s/cartela	IPE330 s/cartela	IPE360 s/cartela	IPE300 c/cartela	IPE330 c/cartela	IPE360 c/cartela
Precio [€]	87	101	114	130	152	179

En la Tabla 20 se tienen los precios que ofrece IDEASTatica para las seis uniones estudiadas. A la vista del incremento de precios en las uniones más rígidas, se pone de manifiesto la importancia de obtener con precisión la rigidez de las uniones a la hora de realizar un proyecto, pudiéndose reducir significativamente su coste sin afectar en exceso a su desempeño.



# Referencias

- [1] ITEA (Instituto Técnico de la Estructura en Acero). Diseño de uniones, edición española del European Steel Development Educational Program (ESDEP), 2000.
- [2] Díaz Gómez, C. *Diseño óptimo de uniones semirrígidas mediante simulación numérica y modelos kriging*. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cartagena, Murcia, 2010.
- [3] Guardiola, A. *Comportamiento de los Nudos Semi-Rígidos en Estructuras Metálicas de Edificación*, Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Valencia, 2006.
- [4] Monfort Leonart, J. *Estructuras metálicas para edificación*, Tomo I, 2006
- [5] Foces Mediavilla, A., & Garrido Hernández, A. (2007). «Análisis de uniones atornilladas viga-pilar realizadas con chapa frontal a tope», *Revista internacional de métodos numéricos para cálculo y diseño en ingeniería*, 23(1), 33-53.
- [6] Cabrero Ballarín, J.M. *Nuevas propuestas para el diseño de pórticos y uniones semirrígidas de cero*. Tesis doctoral, Universidad de Navarra, 2006.
- [7] Van Keulen, D. C., Nethercot, D. A., Snijder, H. H., & Bakker, M. C. M. (2003). «Frame analysis incorporating semi-rigid joint action: Applicability of the half initial secant stiffness approach», *Journal of Constructional Steel Research*, 59(9), 1083-1100.
- [8] EN 1993-1-8:2005 (EC3-1-8:2005) Eurocode 3. Design of Steel Structures. Part 1.8: Design of Joints, CEN, European Committee for Standardization, Brussels, 2005.
- [9] Código Técnico de la Edificación (CTE), 2006.
- [10] Prontuario de perfiles metálicos – Perfiles IPE, [En línea]. Available <https://ingemecanica.com/utilidades/prontuario-de-perfiles-metalicos.html#ipe> [Último acceso 27 mayo 2024]



# Índice de figuras

<i>Figura 1: Límites para la clasificación por resistencia [2].....</i>	<i>3</i>
<i>Figura 2: Clasificación de las uniones según su rigidez [4].....</i>	<i>4</i>
<i>Figura 3: Curva momento-rotación [5] .....</i>	<i>4</i>
<i>Figura 4: Representación de distintos tipos de aproximaciones [6] .....</i>	<i>5</i>
<i>Figura 5: Límites para considerar una unión rígida en función de si la estructura es o no traslacional [6].....</i>	<i>7</i>
<i>Figura 6: Uniones sin cartela y con cartela.....</i>	<i>9</i>
<i>Figura 7: Pórtico acotado .....</i>	<i>10</i>
<i>Figura 8: Propiedades de perfiles [10].....</i>	<i>10</i>
<i>Figura 9: Creación de rejilla .....</i>	<i>12</i>
<i>Figura 10: Propiedades de sección IPE300.....</i>	<i>13</i>
<i>Figura 11: Creación del patrón de carga .....</i>	<i>13</i>
<i>Figura 12: Creación de caso de carga .....</i>	<i>14</i>
<i>Figura 13: Creación de la carga.....</i>	<i>14</i>
<i>Figura 14: Pórticos rígidos con IPE300, IPE330 e IPE360.....</i>	<i>15</i>
<i>Figura 15: Menú de creación de extremos articulados .....</i>	<i>15</i>
<i>Figura 16: Pórtico articulado con rótulas en los pilares .....</i>	<i>15</i>
<i>Figura 17: Menú para la división de elementos en SAP2000.....</i>	<i>16</i>
<i>Figura 18: Comparación de pórtico con nudos rígidos, articulados y semirrígidos.....</i>	<i>17</i>
<i>Figura 19: Comparación entre ubicar las rótulas en los extremos de los pilares o en los dos extremos del dintel .....</i>	<i>17</i>
<i>Figura 20: Pórtico con el nombre de las secciones .....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 21: Normas de las diferentes zonas geográficas .....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 22: Tabla de resultados cálculo de rigidez.....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 23: Diagrama de rigidez .....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 24: Longitud teórica del dintel .....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 25: Menú de configuración de la verificación.....</i>	<i>22</i>

---

<i>Figura 26: Menú de configuración de modelo y malla .....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 27: Unión modelada correctamente visualizada con esquema unifilar .....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 28: Unión modelada incorrectamente visualizada con esquema unifilar .....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 29: Parámetros para la creación del dintel con IPE300 .....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 30: Parámetros para la creación del pilar con IPE300 .....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 31: Operación de extensión del pilar .....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 32: Parámetros de creación de la placa de testa .....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 33: Dibujo acotado de la placa de testa de la unión con perfiles IPE300 .....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 34: Parámetros de creación de los rigidizadores.....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 35: Vista de la unión sin cartelas con perfil IPE300.....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 36: Tabla de coeficientes de pandeo de la unión sin cartela con IPE300 .....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 37: Parámetros de creación de la cartela con IPE300.....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 38: Parámetros de creación de rigidizadores en el dintel en la unión con perfiles IPE300 .....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 39: Parámetros de creación de rigidizadores en el pilar en la unión con perfiles IPE300 .....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 40: Parámetros de la modificación de la placa de testa en la unión de perfiles IPE300 .....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 41: Vista de la unión con cartela con perfil IPE300.....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 42: Tabla de coeficientes de pandeo para la unión con cartela con perfil IPE300.....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 43: Vista del pórtico con ejes locales.....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 44: Vista de la unión con ejes locales del dintel .....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 45: Gráfico de axil en el dintel con perfil IPE300 y nudos rígidos .....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 46: Gráfico de tensiones normales en el dintel con perfil IPE300 y nudos rígidos.....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 47: Gráfico de cortante, flector y desplazamiento en el dintel con perfil IPE300 y nudos rígidos .....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 48: Desplazamientos y giros en la sección b con perfil IPE300 y nudos rígidos.....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 49: Diagrama de tensiones de la unión con IPE300 sin cartela .....</i>	<i>38</i>

---

<i>Figura 50: Valores máximos de utilización de los elementos de la unión de IPE300 sin cartela.....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 51: Resultados de rigidez de la primera iteración con IPE300 sin cartela .....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 52: Diagrama de rigidez de la primera iteración con perfil IPE300 sin cartela .....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 53: Valores máximos de utilización de los elementos de la unión de IPE330 sin cartela.....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 54: Resultados de rigidez de la primera iteración de la unión de IPE330 sin cartela .....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 55: Diagrama de rigidez de la primera iteración con perfil IPE330 sin cartela .....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 56: Resultado final del cálculo de rigidez de la unión con IPE330 sin cartela .....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 57: Diagrama de rigidez de la unión con IPE330 sin cartela .....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 58: Resultados finales del cálculo de rigidez de la unión con IPE360 sin cartela .....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 59: Diagrama de rigidez de la unión con IPE360 sin cartela .....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 60: Diagrama de tensiones de la unión de IPE300 con cartela.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 61: Valores máximos de utilización de los elementos de la unión de IPE300 con cartela .....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 62: Resultados de rigidez de la primera iteración de la unión de IPE300 con cartela.....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 63: Diagrama de rigidez de la primera iteración de la unión de IPE300 con cartela.....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 64: Resultados finales del cálculo de rigidez de la unión con IPE300 con cartela.....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 65: Diagrama de rigidez de la unión de IPE300 con cartela .....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 66: Resultados de rigidez de la unión de perfil IPE330 con cartela ....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 67: Diagrama de rigidez de la unión de IPE330 con cartela .....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 68: Resultados de rigidez de la unión de perfil IPE360 con cartela ....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 69: Diagrama de rigidez de la unión de IPE360 con cartela .....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 70: Diagramas de axil, cortante, momento y tensión normal en pórticos con IPE360.....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 71: Diagrama de sólido libre de un pilar del pórtico de perfiles IPE330 con uniones acarteladas .....</i>	<i>53</i>

---

<i>Figura 72: Vista isométrica de la unión de IPE300 sin cartela.....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 73: Placa de testa de la unión de IPE300 sin cartela .....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 74: Placa de refuerzo de la unión de IPE300 sin cartela .....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 75: Rigidizador para IPE300.....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 76: Pilar para unión de IPE300 sin cartela.....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 77: Vista isométrica de la unión de IPE330 sin cartela.....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 78: Placa de testa de la unión de IPE330 sin cartela .....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 79: Placa de refuerzo de la unión de IPE330 sin cartela .....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 80: Rigidizador para IPE330.....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 81: Pilar para unión de IPE330 sin cartela.....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 82: Vista isométrica de la unión de IPE360 sin cartela.....</i>	<i>75</i>
<i>Figura 83: Placa de testa de la unión de IPE360 sin cartela .....</i>	<i>75</i>
<i>Figura 84: Placa de refuerzo de la unión de IPE360 sin cartela .....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 85: Rigidizador para IPE360.....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 86: Pilar para unión de IPE360 sin cartela.....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 87: Vista isométrica de la unión de IPE300 con cartela .....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 88: Placa de testa de la unión de IPE300 con cartela .....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 89: Rigidizador para IPE300.....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 90: Cartela para IPE300 .....</i>	<i>78</i>
<i>Figura 91: Refuerzo de cartela para IPE300 .....</i>	<i>78</i>
<i>Figura 92: Pilar para unión de IPE300 con cartela .....</i>	<i>78</i>
<i>Figura 93: Vista isométrica de la unión de IPE330 con cartela .....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 94: Placa de testa de la unión de IPE330 con cartela .....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 95: Rigidizador para IPE330.....</i>	<i>80</i>
<i>Figura 96: Cartela para IPE330 .....</i>	<i>80</i>
<i>Figura 97: Refuerzo de cartela para IPE330 .....</i>	<i>80</i>
<i>Figura 98: Pilar para unión de IPE330 con cartela .....</i>	<i>81</i>
<i>Figura 99: Vista isométrica de la unión de IPE360 sin cartela.....</i>	<i>82</i>
<i>Figura 100: Placa de testa de la unión de IPE360 con cartela .....</i>	<i>82</i>
<i>Figura 101: Rigidizador para IPE360 .....</i>	<i>83</i>
<i>Figura 102: Cartela para IPE360 .....</i>	<i>83</i>
<i>Figura 103: Refuerzo de cartela para IPE360 .....</i>	<i>83</i>

---

*Figura 104: Pilar para unión de IPE360 con cartela.....84*



# Índice de tablas

<i>Tabla 1: Parámetros a modificar para la adaptación de la unión con cartela a los perfiles IPE330 e IPE360 .....</i>	<i>32</i>
<i>Tabla 2: Resultados de los pórticos con nudos rígidos.....</i>	<i>37</i>
<i>Tabla 3: Resultados de los pórticos con nudos articulados.....</i>	<i>37</i>
<i>Tabla 4: Resultado del cálculo iterativo para la unión de IPE300 sin cartela</i>	<i>40</i>
<i>Tabla 5: Resultados del cálculo iterativo de la unión con IPE330 sin cartela</i>	<i>41</i>
<i>Tabla 6: Cálculo del giro relativo con SAP2000 en la unión con IPE330 sin cartela.....</i>	<i>42</i>
<i>Tabla 7: Resultados del cálculo iterativo de la unión con IPE360 sin cartela</i>	<i>43</i>
<i>Tabla 8: Cálculo del giro relativo con SAP2000 en la unión con IPE360 sin cartela.....</i>	<i>44</i>
<i>Tabla 9: Resultados del cálculo iterativo de la unión con IPE300 con cartela .....</i>	<i>46</i>
<i>Tabla 10: Cálculo del giro relativo con SAP2000 en la unión de IPE300 con cartela.....</i>	<i>46</i>
<i>Tabla 11: Resultados del cálculo iterativo de la unión de perfil IPE330 con cartela.....</i>	<i>47</i>
<i>Tabla 12: Cálculo del giro relativo con SAP2000 en la unión de IPE330 con cartela.....</i>	<i>48</i>
<i>Tabla 13: Resultados del cálculo iterativo para la unión de IPE360 con cartela .....</i>	<i>48</i>
<i>Tabla 14: Cálculo del giro relativo con SAP2000 en la unión de IPE360 con cartela.....</i>	<i>49</i>
<i>Tabla 15: Resumen de los resultados de rigidez en las uniones sin cartela..</i>	<i>49</i>
<i>Tabla 16: Resumen de los resultados de rigidez en las uniones con cartela.</i>	<i>49</i>
<i>Tabla 17: Esfuerzos, tensiones y desplazamientos en pórticos con IPE300..</i>	<i>51</i>
<i>Tabla 18: Esfuerzos, tensiones y desplazamientos en pórticos con IPE330..</i>	<i>51</i>
<i>Tabla 19: Esfuerzos, tensiones y desplazamientos en pórticos con IPE360..</i>	<i>52</i>
<i>Tabla 20: Precio aproximado de las uniones.....</i>	<i>59</i>



## Anexo: Despiece de las uniones

A continuación, se muestran los despieces de los elementos necesarios para la fabricación de las uniones estudiadas a lo largo del trabajo. En los Anejos del documento se encuentran los modelos de las uniones en 3D.

### Unión con IPE300 sin cartela

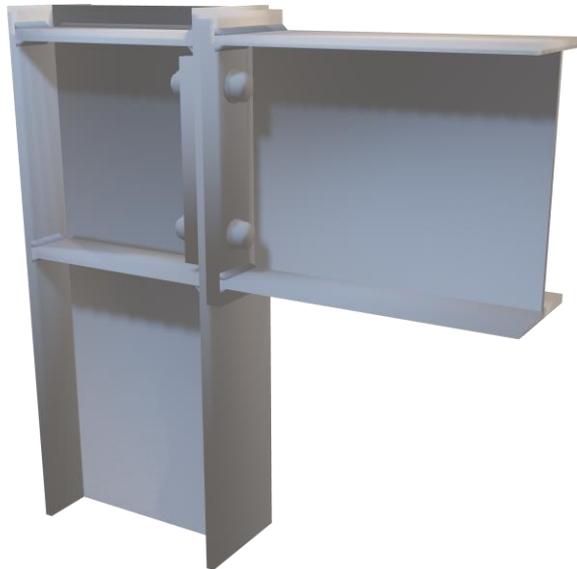


Figura 72: Vista isométrica de la unión de IPE300 sin cartela

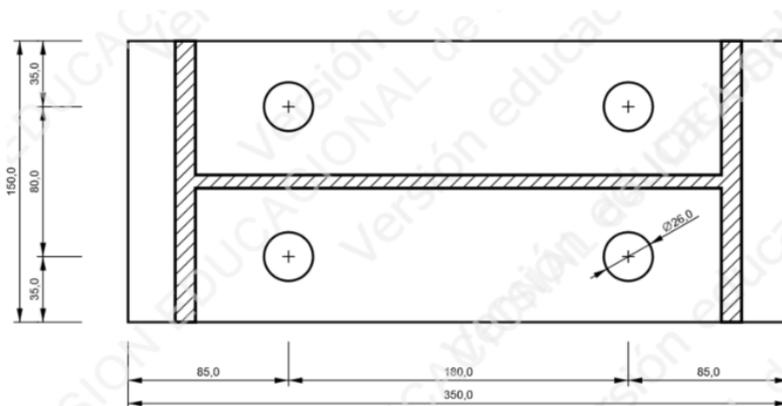


Figura 73: Placa de testa de la unión de IPE300 sin cartela

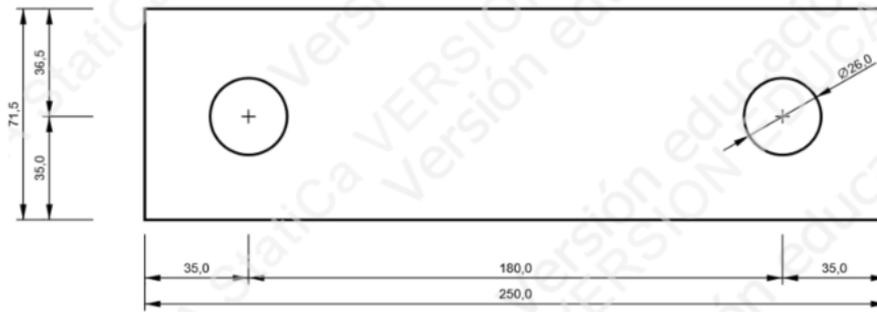


Figura 74: Placa de refuerzo de la unión de IPE300 sin cartela

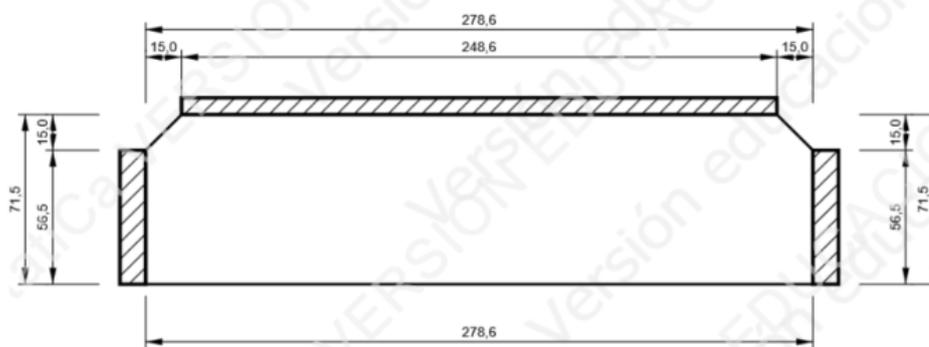


Figura 75: Rigidizador para IPE300

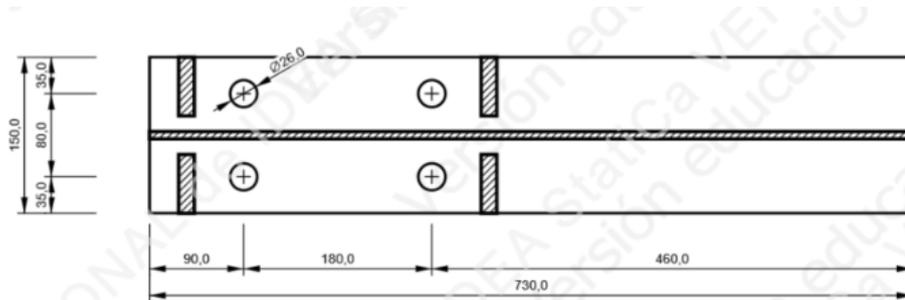


Figura 76: Pilar para unión de IPE300 sin cartela

## Unión con IPE330 sin cartela



Figura 77: Vista isométrica de la unión de IPE330 sin cartela

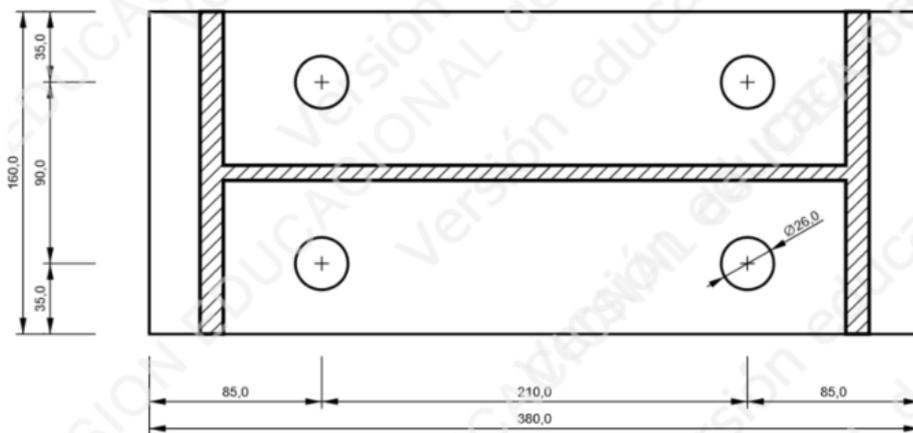


Figura 78: Placa de testa de la unión de IPE330 sin cartela

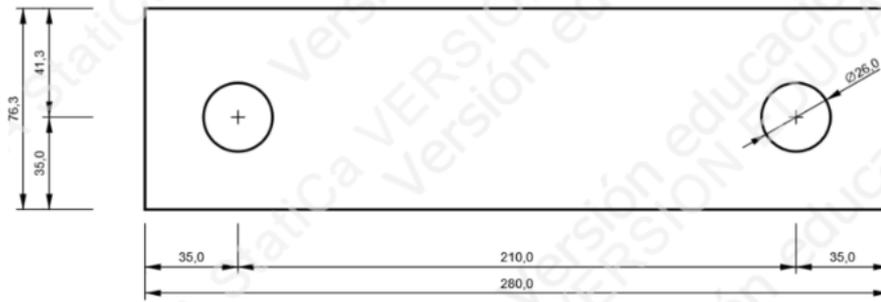


Figura 79: Placa de refuerzo de la unión de IPE330 sin cartela

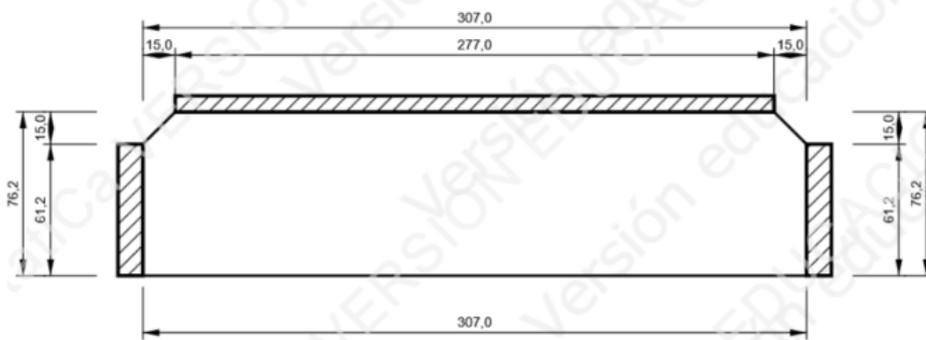


Figura 80: Rigidizador para IPE330

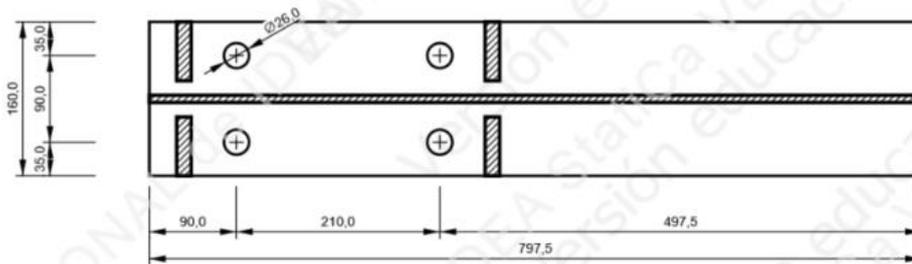


Figura 81: Pilar para unión de IPE330 sin cartela

## Unión con IPE360 sin cartela



Figura 82: Vista isométrica de la unión de IPE360 sin cartela

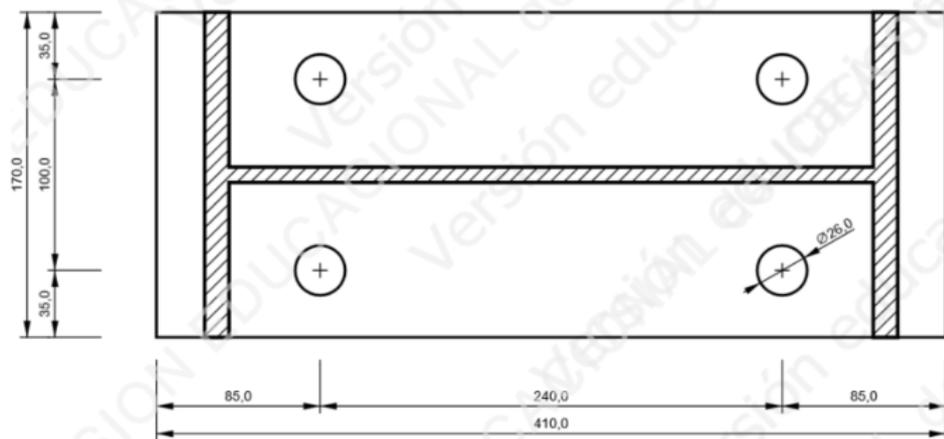


Figura 83: Placa de testa de la unión de IPE360 sin cartela

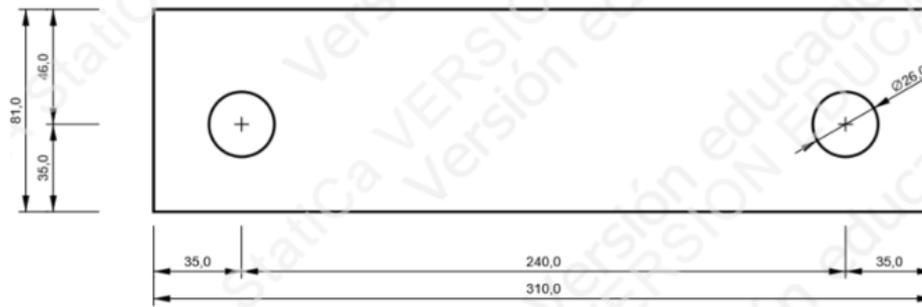


Figura 84: Placa de refuerzo de la unión de IPE360 sin cartela

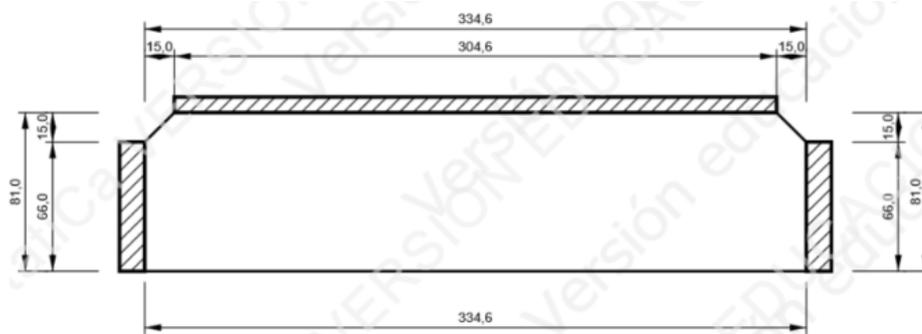


Figura 85: Rigidizador para IPE360

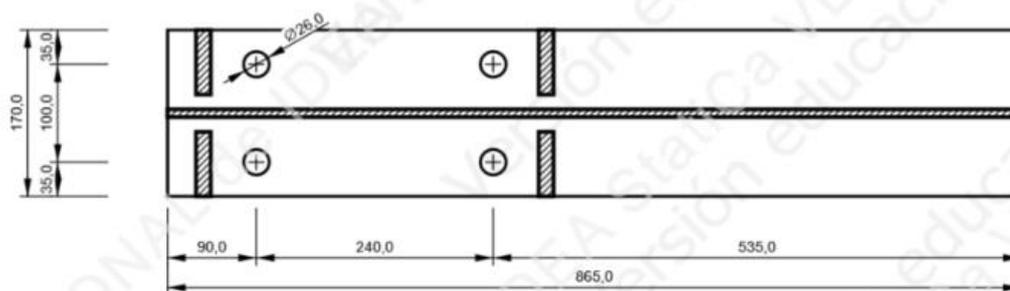


Figura 86: Pilar para unión de IPE360 sin cartela

Unión con IPE300 con cartela



Figura 87: Vista isométrica de la unión de IPE300 con cartela

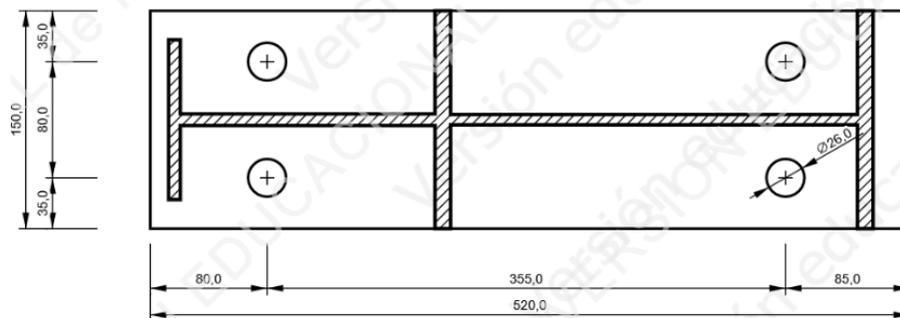


Figura 88: Placa de testa de la unión de IPE300 con cartela

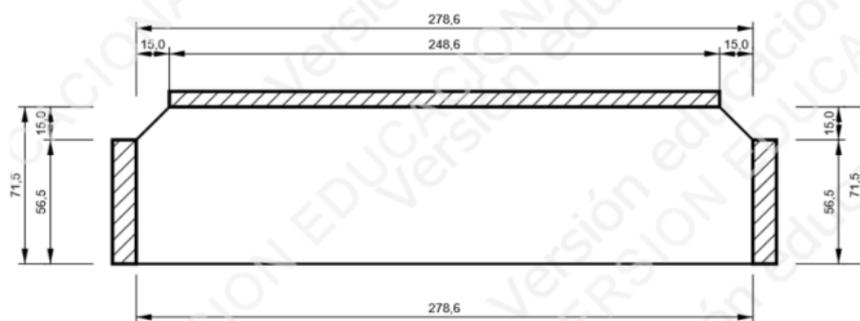


Figura 89: Rigidizador para IPE300

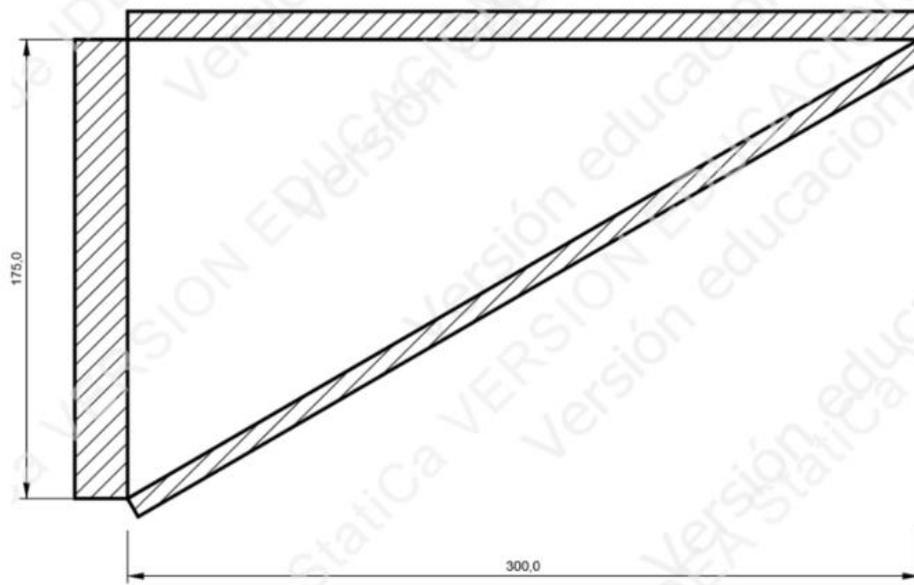


Figura 90: Cartela para IPE300

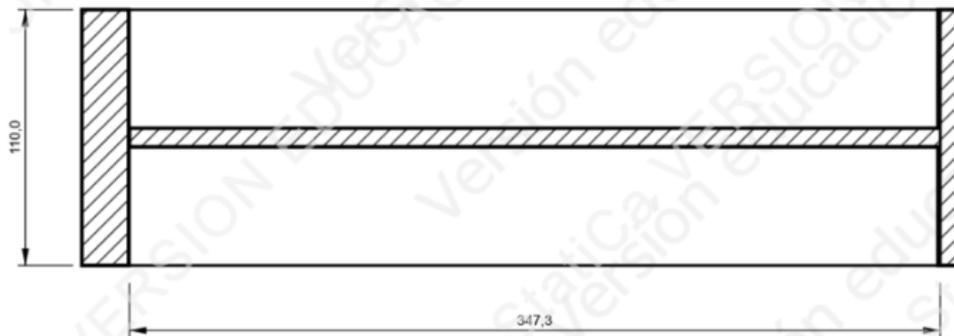


Figura 91: Refuerzo de cartela para IPE300

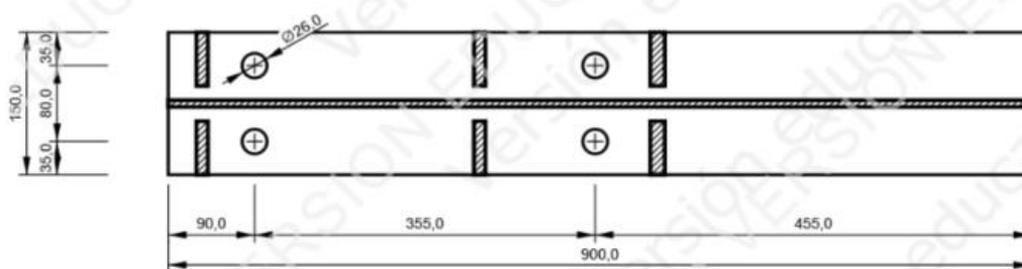


Figura 92: Pilar para unión de IPE300 con cartela

## Unión con IPE330 con cartela

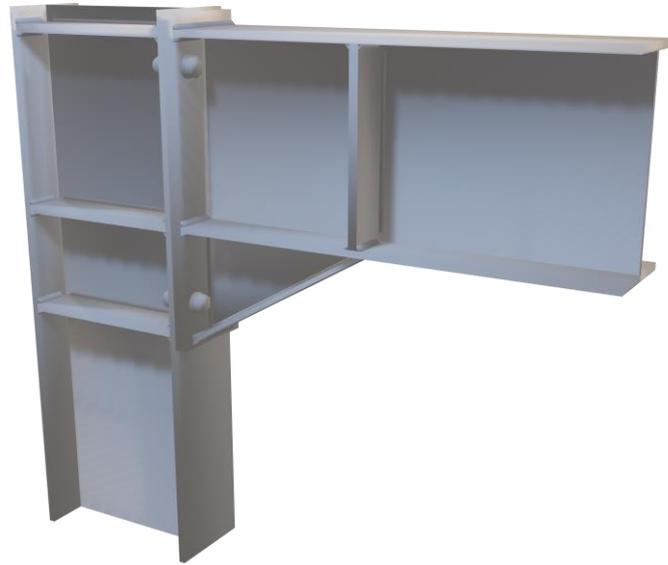


Figura 93: Vista isométrica de la unión de IPE330 con cartela

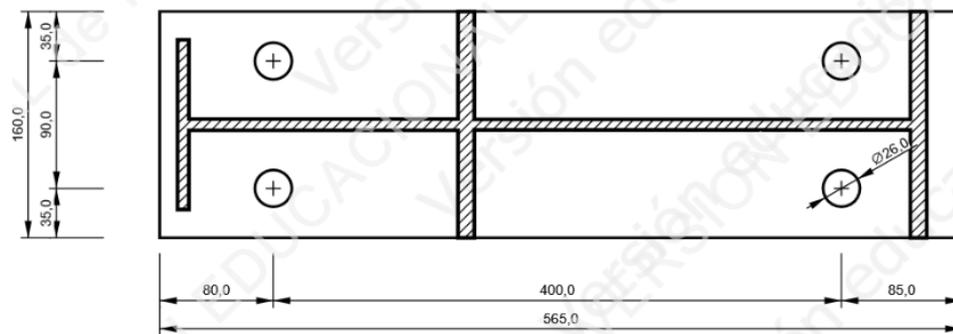


Figura 94: Placa de testa de la unión de IPE330 con cartela

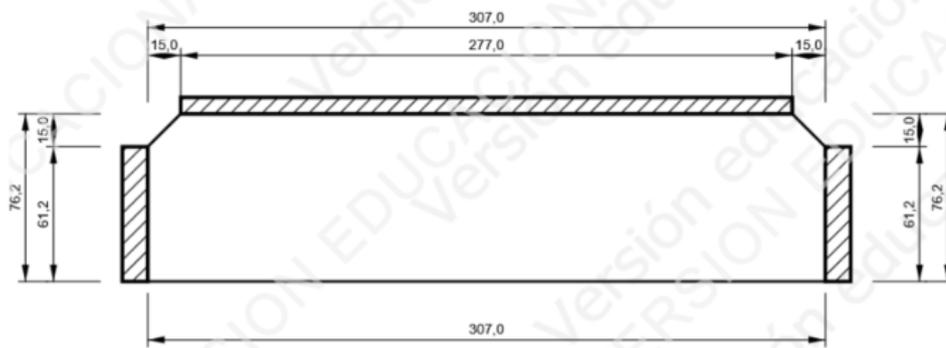


Figura 95: Rigidizador para IPE330

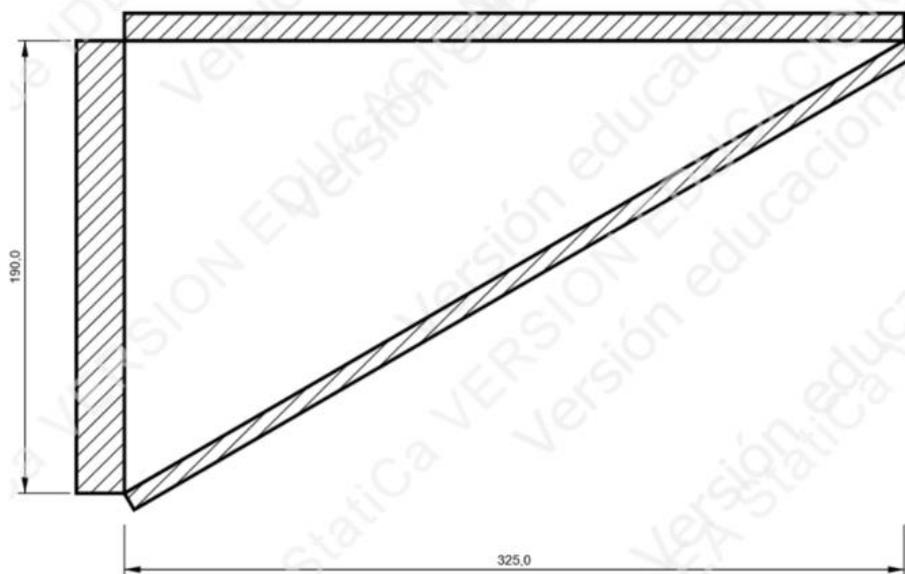


Figura 96: Cartela para IPE330

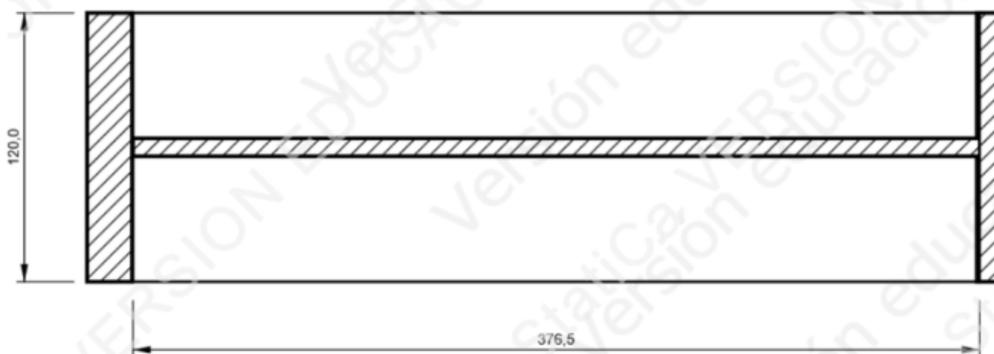


Figura 97: Refuerzo de cartela para IPE330

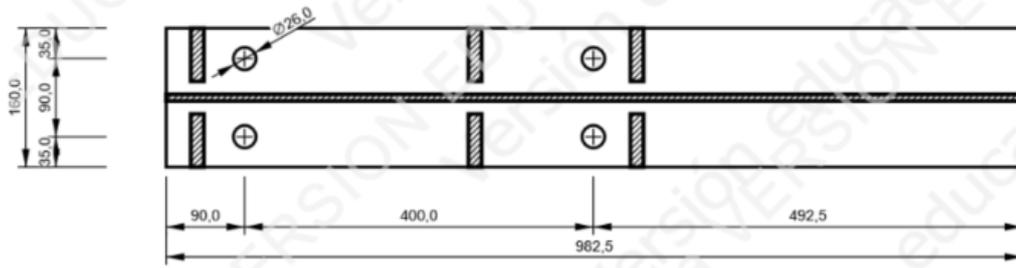


Figura 98: Pilar para unión de IPE330 con cartela

Unión con IPE360 con cartela



Figura 99: Vista isométrica de la unión de IPE360 sin cartela

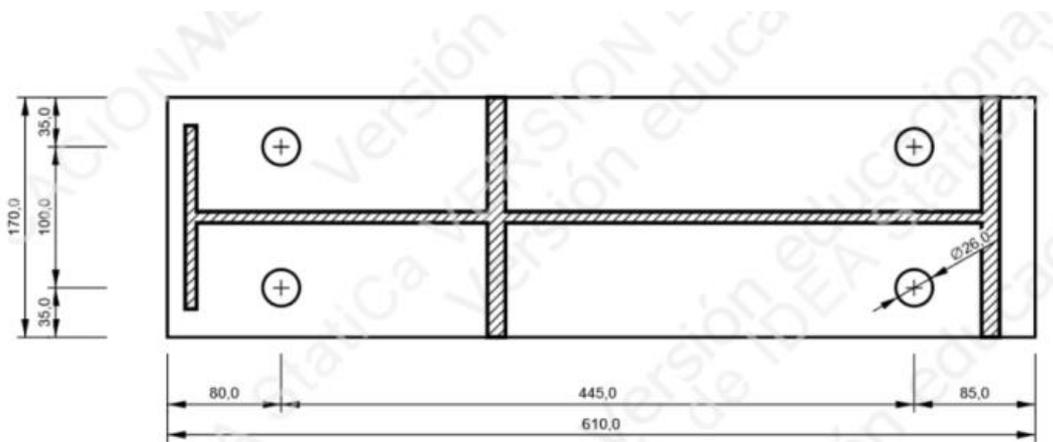


Figura 100: Placa de testa de la unión de IPE360 con cartela

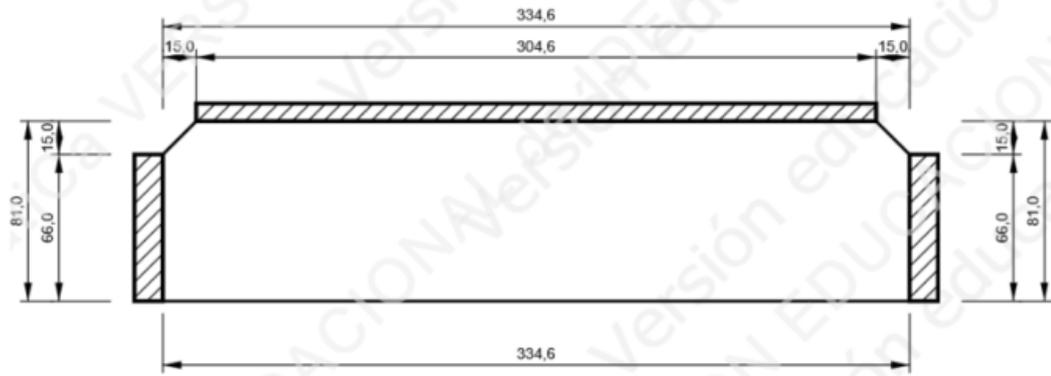


Figura 101: Rigidizador para IPE360

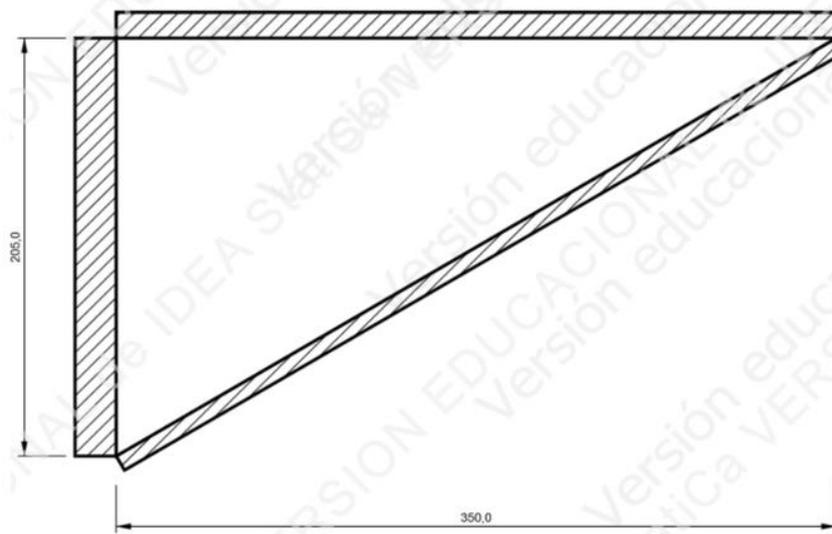


Figura 102: Cartela para IPE360

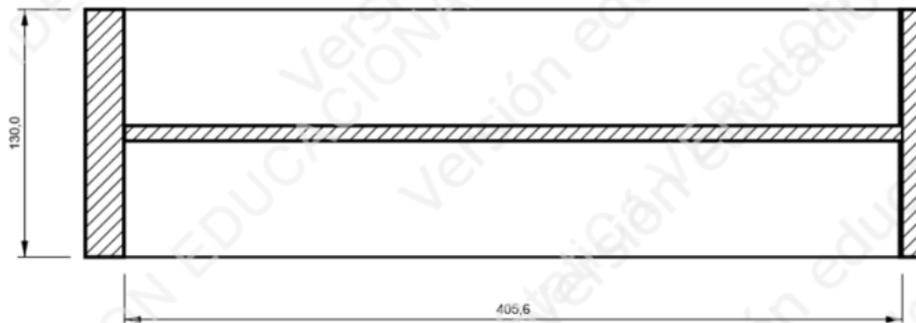


Figura 103: Refuerzo de cartela para IPE360

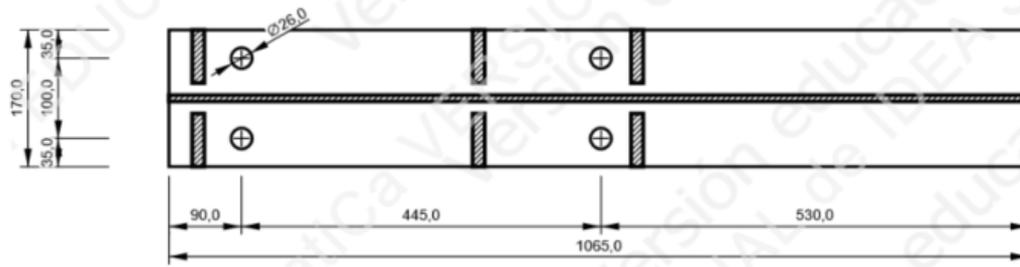


Figura 104: Pilar para unión de IPE360 con cartela