



**UNIVERSIDAD DE OVIEDO**

**Escuela de  
Ingeniería de Minas, Energía y Materiales de Oviedo**

**Máster en Ingeniería de Minas**



**Trabajo Fin de Máster**

**Estudio por elementos finitos de uniones ligeras acoplables  
para tubos de montajes estructurales**

**Autor: Iñigo Duque Crespo**

**Tutor: Javier Gracia Rodríguez**

**Cotutor: Carlos López-Colina Pérez**

**Oviedo, Julio de 2023**

# Índice

1	Introducción.....	12
2	Uniones estructurales.....	14
2.1	Factores económicos.....	14
2.2	Diseño y comportamiento.....	16
2.2.1	Unión con remaches.....	19
2.2.2	Unión atornillada.....	20
2.2.3	Fallos en uniones atornilladas.....	22
2.2.4	Propiedades mecánicas de la unión con tornillos.....	30
2.2.5	Unión soldada.....	37
2.2.6	Unión articulada.....	38
3	Método de elementos finitos en Ansys.....	41
3.1	Introducción.....	41
3.2	Conceptos básicos.....	41
3.3	Nodos comunes.....	43
3.4	Elementos comunes.....	43
3.5	Análisis del proyecto con elementos finitos.....	44

---

3.6	Ansys .....	45
4	Precedentes del proyecto .....	47
4.1	Introducción .....	47
4.2	Modelo geométrico .....	49
4.2.1	Unión ortogonal viga-pilar .....	52
4.2.2	Unión de Cumbreira entre Dinteles .....	54
4.3	Ensayos de laboratorio y Momentos resistentes .....	55
4.3.1	Unión ortogonal Viga-Pilar .....	56
4.3.2	Unión de cumbrera entre dinteles .....	57
5	Desarrollo del proyecto en ANSYS .....	60
5.1	Introducción .....	60
5.2	Unión ortogonal Viga-Pilar modelo 1 .....	61
5.2.1	Modelado .....	61
5.2.2	Propiedades físicas .....	66
5.2.3	Mallado .....	67
5.2.4	Condiciones de contorno .....	69
5.3	Unión ortogonal Viga-Pilar modelo 2 .....	70

---

5.3.1	Modelado .....	70
5.3.2	Propiedades físicas .....	75
5.3.3	Mallado .....	76
5.3.4	Condiciones de contorno .....	78
5.4	Unión de cumbrera entre dinteles .....	79
5.4.1	Modelado .....	79
5.4.2	Propiedades físicas .....	83
5.4.3	Mallado .....	83
5.4.4	Condiciones de contorno .....	85
6	Simulaciones.....	87
6.1	Introducción .....	87
6.1.1	Momento resistente máximo .....	87
6.1.2	Rigidez.....	88
6.2	Ángulo de rotación.....	88
6.3	Unión ortogonal Viga-Pilar modelo 1 .....	90
6.4	Unión ortogonal Viga-Pilar modelo 2 .....	94
6.5	Unión de cumbrera entre dinteles .....	98

---

7	Conclusiones.....	103
8	Bibliografía.....	105

## Índice de figuras

Figura 1.- Incremento del precio del acero en los últimos años .....	15
Figura 2.- Ranking mundial de los principales productores de acero en 2021.....	16
Figura 3.- Unión estructural en puente real de Guipúzcoa .....	17
Figura 4.- Uniones estructurales mecánicas .....	18
Figura 5.- Torre Eiffel donde se emplearon más de dos millones y medio de remaches. .....	20
Figura 6.- Unión atornillada solapada .....	21
Figura 7.- Unión atornillada empalmada.....	22
Figura 8.- Fallo por cizallamiento simple en uniones atornilladas.....	23
Figura 9.- Fallo por doble cizallamiento en uniones atornilladas.....	24
Figura 10.- Fallo por aplastamiento en uniones atornilladas.....	25
Figura 11.- Resistencia a la tracción en uniones atornilladas.....	26
Figura 12.- Rotura por cizallamiento de placas en uniones atornilladas .....	28
Figura 13.- Fallo por aplastamiento de placas en uniones atornilladas .....	29

---

Figura 14.- Fallo por tracción de la placa en uniones atornilladas .....	30
Figura 15.- Transferencia de carga a los tornillos .....	32
Figura 16.- Fuerza entre tornillo y placa .....	32
Figura 17.- Unión atornillada con fricción .....	33
Figura 18.- Perno precargado .....	34
Figura 19.- Unión atornillada sometida a cargas de tracción externa y precarga.....	34
Figura 20.- Espacios mínimos y máximos entre tornillos según el Eurocódigo .....	36
Figura 21.- Simbología en el espaciado entre tornillos .....	37
Figura 22.- Tipos de uniones en soldadura.....	38
Figura 23.- Unión articulada en un puente .....	39
Figura 24.- Etapas para llegar a una solución por elementos finitos en Ansys .....	42
Figura 25.- División de un dominio en nodos comunes .....	43
Figura 26.- Representación de elementos.....	44
Figura 27.- Perfil RHS 140x70x6 (izq) y Perfil RHS 140x80x4 (dcha) .....	50
Figura 28.- Dimensiones de los tornillos AUTO.....	51
Figura 29.- Parámetros de instalación de los tornillos AUTO .....	51
Figura 30.- Modelo 1 de la unión ortogonal viga-pilar .....	52

---

Figura 31.- Unión realizada en el laboratorio del modelo 1 de la unión viga-pilar.....	53
Figura 32.- Modelo 2 de la unión ortogonal viga-pilar .....	53
Figura 33.- Unión realizada en el laboratorio del modelo 2 de la unión viga-pilar.....	54
Figura 34.- Geometría de la unión de cumbrera entre dinteles .....	54
Figura 35.- Geometría de los perfiles de la unión de cumbrera entre dinteles .....	55
Figura 36.- Modelo utilizado en el laboratorio de la unión de cumbrera entre dinteles.	55
Figura 37.- Punto de rotación de la unión viga-pilar.....	56
Figura 38.- Fijación unión viga-pilar a la máquina de ensayos.....	57
Figura 39.- Punto de rotación de la unión de cumbrera entre dinteles .....	58
Figura 40.- Fijación y cargas aplicadas a la unión de cumbrera entre dinteles .....	59
Figura 41.- Parámetros del modelo 1 de la unión ortogonal viga-pilar.....	62
Figura 42.- Vista general del modelo 1 de la unión ortogonal Viga-Pilar .....	62
Figura 43.- Vista frontal del modelo 1 de la unión ortogonal Viga-Pilar.....	63
Figura 44.- Vista lateral del modelo 1 de la unión ortogonal Viga-Pilar .....	63
Figura 45.- Vista superior del modelo 1 de la unión ortogonal Viga-Pilar .....	64
Figura 46.- Vista detallada del modelo 1 de la unión ortogonal Viga-Pilar.....	64
Figura 47.- Perfil 140x70x6 del modelo 1 de la unión ortogonal Viga-Pilar.....	65

---

Figura 48.- Perfil 140x80x4 del modelo 1 de la unión ortogonal Viga-Pilar.....	65
Figura 49.- Curva de comportamiento angular del modelo 1 de la unión ortogonal Viga-Pilar.....	67
Figura 50.- Vista general del mallado del modelo 1 de la unión ortogonal Viga-Pilar..	68
Figura 51.- Vista detallada del mallado del modelo 1 de la unión ortogonal Viga-Pilar	69
Figura 52.- Condiciones de contorno del modelo 1 de la unión ortogonal Viga-Pilar...	70
Figura 53.- Parámetros del modelo 2 de la unión ortogonal viga-pilar.....	71
Figura 54.- Vista general del modelo 2 de la unión ortogonal Viga-Pilar .....	71
Figura 55.- Vista lateral del modelo 2 de la unión ortogonal Viga-Pilar .....	72
Figura 56.- Vista frontal del modelo 2 de la unión ortogonal Viga-Pilar.....	72
Figura 57.- Vista superior del modelo 2 de la unión ortogonal Viga-Pilar .....	73
Figura 58.- Vista detallada del modelo 2 de la unión ortogonal Viga-Pilar .....	73
Figura 59.- Perfil 140x80x4 del modelo 2 de la unión ortogonal Viga-Pilar.....	74
Figura 60.- Perfil 140x70x6 del modelo 2 de la unión ortogonal Viga-Pilar.....	74
Figura 61.- Curva de comportamiento angular del modelo 2 de la unión ortogonal Viga-Pilar.....	76
Figura 62.- Vista general del mallado del modelo 2 de la unión ortogonal Viga-Pilar..	77
Figura 63.- Vista detallada del mallado del modelo 2 de la unión ortogonal Viga-Pilar	78



---

Figura 64.- Condiciones de contorno del modelo 2 de la unión ortogonal viga-pilar....	79
Figura 65.- Parámetros de la unión de cumbrera entre dinteles .....	80
Figura 66.- Vista general de la unión de cumbrera entre dinteles .....	80
Figura 67.- Vista lateral de la unión de cumbrera entre dinteles.....	81
Figura 68.- Vista frontal de la unión de cumbrera entre dinteles .....	81
Figura 69.- Vista superior de la unión de cumbrera entre dinteles.....	82
Figura 70.- Perfil 140x70x6 de la unión de cumbrera entre dinteles .....	82
Figura 71.- Perfil 140x80x4 de la unión de cumbrera entre dinteles .....	83
Figura 72.- Vista general del mallado de la unión de cumbrera entre dinteles .....	84
Figura 73.- Vista detallada del mallado de la unión de cumbrera entre dinteles.....	85
Figura 74.- Ángulo de rotación de la unión.....	89
Figura 75.- Deformación total del modelo 1 de la unión ortogonal viga-pilar.....	90
Figura 76.- Tensión total del modelo 1 de la unión ortogonal viga-pilar.....	91
Figura 77.- Momento en los tornillos del modelo 1 de una unión ortogonal viga-pilar.	91
Figura 78.- Deformación superior de la sección del modelo 1 de la unión ortogonal viga-pilar.....	92
Figura 79.- Deformación inferior de la sección del modelo 1 de la unión ortogonal viga-pilar.....	92

---

Figura 80.- Comparación resultados ANSYS con resultados laboratorio del modelo 1 de la unión ortogonal viga-pilar .....	94
Figura 81.- Deformación total del modelo 2 de la unión ortogonal viga-pilar.....	95
Figura 82.- Tensión máxima del modelo 2 de la unión ortogonal viga-pilar .....	95
Figura 83.- Momento en los tornillos del modelo 2 de una unión ortogonal viga-pilar.	96
Figura 84.- Deformación superior de la sección del modelo 2 de la unión ortogonal viga-pilar.....	96
Figura 85.- Deformación inferior de la sección del modelo 2 de la unión ortogonal viga-pilar.....	97
Figura 86.- Comparación resultados ANSYS con resultados laboratorio del modelo 2 de la unión ortogonal viga-pilar .....	98
Figura 87.- Deformación total de la unión de cumbrera entre dinteles .....	99
Figura 88.- Tensión total de la unión de cumbrera entre dinteles .....	99
Figura 89.- Momento en los tornillos de la unión de cumbrera entre dinteles .....	100
Figura 90.- Deformación superior de la sección de la unión de cumbrera entre dinteles .....	100
Figura 91.- Deformación inferior de la sección de la unión de cumbrera entre dinteles .....	101
Figura 92.- Comparación resultados ANSYS con resultados laboratorio de la unión de cumbrera entre dinteles.....	102

---

# Índice de tablas

Tabla 1.- Valores nominales de límite elástico y la resistencia a tracción de los tornillos .....	31
Tabla 2.- Categorías de uniones atornilladas según eurocódigo .....	35
Tabla 3.- Propiedades del modelo 1 de la unión ortogonal Viga-Pilar.....	66
Tabla 4.- Resultados del modelo 1 de la unión ortogonal viga-pilar.....	93
Tabla 5.- Resultados del modelo 2 de la unión ortogonal viga-pilar.....	97
Tabla 6.- Resultados de la unión de cumbrera entre dinteles .....	101

# 1 Introducción

Las estructuras de acero son elementos fundamentales en la industria de la construcción y la ingeniería civil debido a su alta resistencia, versatilidad y durabilidad. El acero, un material compuesto principalmente por hierro y carbono, posee propiedades mecánicas excepcionales que lo convierten en una opción ideal para soportar cargas pesadas y resistir tensiones.

La eficiencia de una estructura de acero depende en gran medida de la calidad y la resistencia de sus uniones. Las uniones son los puntos de conexión entre los diferentes elementos estructurales, como vigas, columnas, cerchas y placas, que componen la estructura en su conjunto. Estas uniones transmiten las cargas y fuerzas de una parte de la estructura a otra, asegurando la estabilidad y la integridad del sistema.

La importancia de las uniones en las estructuras de acero radica en varios aspectos fundamentales:

**Transferencia de cargas:** Las uniones deben ser capaces de transmitir las cargas verticales, horizontales y de torsión entre los elementos de la estructura. Esto implica que las uniones deben ser lo suficientemente fuertes y rígidas para soportar las fuerzas que actúan sobre ellas y evitar desplazamientos o deformaciones excesivas.

**Seguridad estructural:** Las uniones adecuadamente diseñadas y construidas garantizan la seguridad de la estructura y de las personas que la utilizan. Una unión deficiente o débil podría provocar fallas catastróficas, como colapsos estructurales, lo cual puede tener consecuencias devastadoras. Por lo tanto, la correcta selección y ejecución de las uniones es esencial para asegurar la estabilidad y confiabilidad de la estructura.

**Eficiencia y economía:** Las uniones bien diseñadas permiten optimizar el uso de los materiales y reducir los costos de construcción. Al utilizar uniones eficientes, es posible minimizar la cantidad de acero requerido, reducir los tiempos de montaje y simplificar

los procesos de fabricación, lo cual se traduce en un ahorro significativo en términos de tiempo y dinero.

**Flexibilidad y adaptabilidad:** Las uniones en las estructuras de acero ofrecen flexibilidad y adaptabilidad para realizar modificaciones, ampliaciones o rehabilitaciones en el futuro. Estas modificaciones pueden ser necesarias debido a cambios en la carga de diseño, requerimientos funcionales o normativas. Las uniones adecuadas permiten desmontar y reconfigurar los elementos estructurales sin comprometer la estabilidad y la integridad de la estructura.

Para lograr uniones efectivas, se utilizan diversos métodos y técnicas de conexión en las estructuras de acero. Algunos de los métodos comunes incluyen soldadura, atornillado, remachado y conexionado mediante placas y pernos de alta resistencia. La elección del método de unión depende de varios factores, como las cargas aplicadas, la geometría de los elementos y las consideraciones estéticas.

## 2 Uniones estructurales

### 2.1 Factores económicos

Las uniones constituyen un elevado porcentaje del coste de una estructura, por ello deben ser sencillas, evitando usar elementos innecesarios.

Durante las últimas décadas el precio del acero ha aumentado, pero considerablemente menos que el precio de la mano de obra. Esta tendencia, junto con los desarrollos en la tecnología de fabricación, significa que los proyectos estructurales que eran óptimos hace 10 años puede que actualmente no sean competitivos.

Gran parte de los costes de mano de obra presentan una relación directa con el cálculo y fabricación de las uniones. A menudo es preferible ahorrar mano de obra aunque haya que utilizar más material.

La subida del precio del acero los últimos meses (Figura 1) no tiene un único motivo, sino que se trata de un encarecimiento por múltiples factores, que se entiende mejor si analizamos su importancia en el mercado global.

## Price of steel continues to soar

Hot-Rolled Coil Steel Futures Continuous Contract

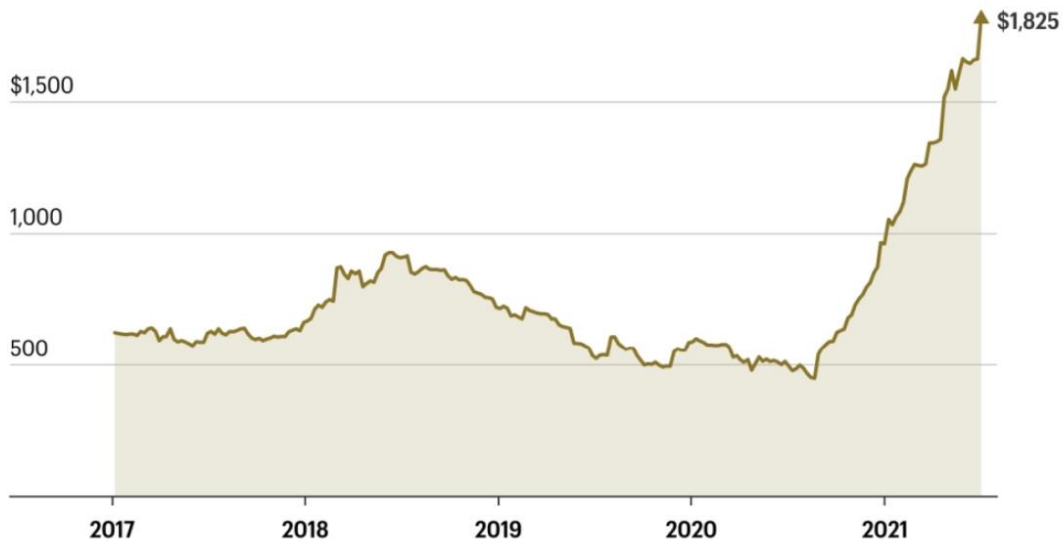


CHART: LANCE LAMBERT • SOURCE: MARKETWATCH

FORTUNE

Figura 1.- Incremento del precio del acero en los últimos años

El acero es una de las aleaciones (mezcla de metales) más innovadoras y flexibles, utilizadas en el sector de la construcción, el transporte (tanto tierra, mar o aire), las infraestructuras, el hogar, la investigación, etc. No se puede entender el desarrollo de los siglos XIX, XX y XXI sin este metal que, además, como explicamos en el post dedicado a ello, se puede reutilizar y reciclar fácilmente, por lo que se amolda a los requisitos de sostenibilidad que nos tenemos que exigir para los años venideros.

El uso generalizado de este metal resultante de añadir entre un 1 y un 2% de carbono al hierro (y un 10% de cromo si se trata de acero inoxidable) radica en su dureza, resistencia a las fracturas y a la corrosión, además de su coste relativamente bajo. No hay sector que no use acero. En la Figura 2 se puede ver el ranking mundial de los principales productores de acero bruto en 2021 para poder hacerse a la idea de las dimensiones de producción y lo importante que es el acero para la sociedad actual.

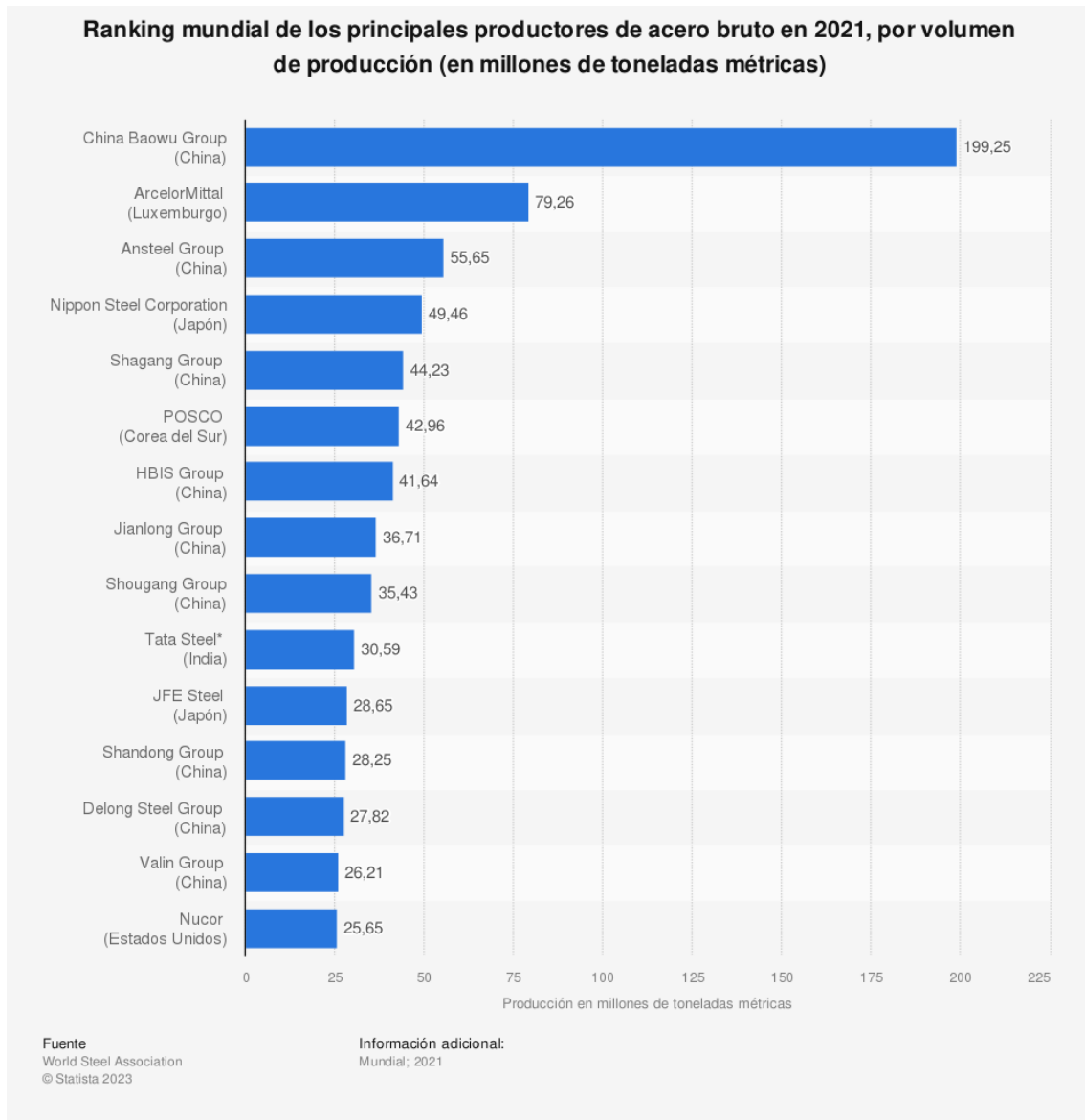


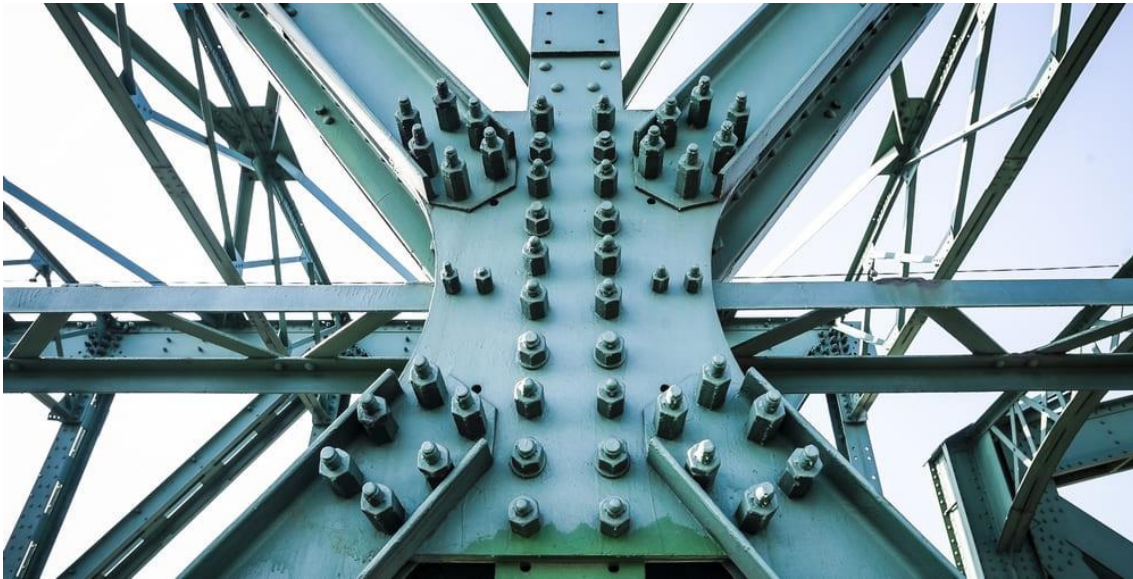
Figura 2.- Ranking mundial de los principales productores de acero en 2021

## 2.2 Diseño y comportamiento

Las uniones estructurales mecánicas son ampliamente empleadas en sectores como la construcción y la ingeniería industrial. Estas uniones se utilizan para conectar dos componentes resistentes con el propósito de transmitir cargas elevadas de uno a otro de



manera eficiente y segura. Dependiendo del sistema utilizado y las características específicas, existen diversos tipos de uniones que se pueden mencionar.



*Figura 3.- Unión estructural en puente real de Guipúzcoa*

Algunos ejemplos de uniones estructurales mecánicas comunes incluyen las soldaduras, los pernos y las tuercas, los remaches y los adhesivos estructurales (Figura 4). La soldadura implica fundir y fusionar los materiales de los componentes para crear una unión sólida y continua. Los pernos y las tuercas, por otro lado, se utilizan para asegurar las piezas juntas mediante la aplicación de fuerza de compresión. Los remaches, por su parte, consisten en clavar un pasador de metal a través de los componentes y deformar los extremos para crear una conexión resistente. Los adhesivos estructurales, por último, utilizan sustancias adhesivas de alta resistencia para unir los materiales y proporcionar una conexión duradera.



*Figura 4.- Uniones estructurales mecánicas*

Es importante tener en cuenta que cada tipo de unión estructural mecánica tiene sus propias ventajas y consideraciones específicas en términos de fuerza, durabilidad, costo y facilidad de instalación. La elección de la unión adecuada depende del diseño y los requisitos de resistencia de la estructura, así como de otros factores como el entorno en el que se utilizará y las cargas que se espera que soporte.

Además, el avance de la tecnología ha llevado al desarrollo de nuevas técnicas y materiales para las uniones estructurales mecánicas. Por ejemplo, se han desarrollado adhesivos estructurales de alta resistencia que ofrecen propiedades mecánicas superiores y una mayor durabilidad. También se han creado sistemas de unión más eficientes y fiables, como las uniones atornilladas de alta resistencia y los sistemas de unión basados en materiales compuestos.

Las uniones estructurales mecánicas pueden clasificarse en diferentes tipos según el giro o movimiento que permiten en la estructura. Algunos de estos tipos son:

**Uniones rígidas:** Estas uniones no permiten ningún tipo de movimiento relativo entre los componentes unidos. Son altamente resistentes y se utilizan en estructuras que requieren una conexión sólida y estable. Ejemplos de uniones rígidas son las soldaduras de alta resistencia y las uniones adhesivas de curado rápido.

**Uniones articuladas:** Estas uniones permiten un movimiento de rotación limitado entre los componentes conectados. Son utilizadas en estructuras que necesitan cierta flexibilidad y capacidad de adaptación ante cargas variables. Un ejemplo común de unión

articulada es el uso de pernos y tuercas con arandelas de fricción, que permiten el movimiento giratorio controlado.

Uniones deslizantes: Estas uniones permiten un deslizamiento lineal o desplazamiento lateral entre los componentes conectados. Son útiles en estructuras que están sujetas a movimientos sísmicos, vibraciones o cambios térmicos, ya que permiten la expansión y contracción de los materiales. Un ejemplo de unión deslizante es el uso de juntas de dilatación en puentes para permitir el movimiento horizontal.

Uniones flexibles: Estas uniones permiten un amplio rango de movimientos, incluyendo rotación, deslizamiento y deformación, entre los componentes conectados. Son utilizadas en estructuras que requieren una alta capacidad de absorción de energía y resistencia a cargas dinámicas. Un ejemplo de unión flexible es el uso de resortes o elementos elastoméricos en sistemas antisísmicos.

Además, según el método utilizado para unir dos piezas de acero se pueden clasificar en:

### **2.2.1 Unión con remaches**

Esta conexión se consigue remachando una placa o un componente angular a los dos elementos de conexión. Un remache está formado por una barra redonda de acero dúctil que se denomina "vástago" y que tiene una cabeza en un extremo. Está hecho de acero templado o de acero de alta resistencia a la tracción. Se perforan contra las chapas para que el extremo quede redondo después de insertarlos en los orificios deseados. Un ejemplo de estructura con uniones remachadas es la torre Eiffel (Figura 5).



*Figura 5.- Torre Eiffel donde se emplearon más de dos millones y medio de remaches.*

Los remaches se utilizan en una amplia variedad de industrias en el espacio de fabricación. Esto se debe a que pueden soportar cargas de tensión y son los más adecuados para soportar cargas de corte que son perpendiculares a sus ejes. Como se mencionó anteriormente, son ideales en una situación en la que los trabajadores no pueden acceder al otro lado del material. Esto es evidente en la fijación de paredes y tuberías. Esto es evidente en la fijación de paredes y tuberías.

### **2.2.2 Unión atornillada**

Estas uniones se consiguen atornillando los elementos estructurales entre sí con la ayuda de tornillos de tuerca y placas de soporte. Los tornillos de tuerca están disponibles en tamaños estándar y se hacen los agujeros correspondientes en cada elemento. A continuación, las placas de soporte y los pernos se insertan en el orificio y se aprietan con tuercas con la ayuda de llaves.

Existen dos tipos principales de uniones atornilladas: las uniones solapadas y las uniones empalmadas. Existen subtipos dentro de estos dos tipos, es decir, uniones excéntricas, uniones de momento puro, etc., pero quedan fuera del alcance de este proyecto.

En una unión solapada (Figura 6), los elementos principales que se van a unir se colocan uno sobre otro para formar un solapamiento entre los elementos y, a continuación, el atornillado se realiza en la parte solapada. Debido a la propia naturaleza de la unión, se produce una excentricidad.

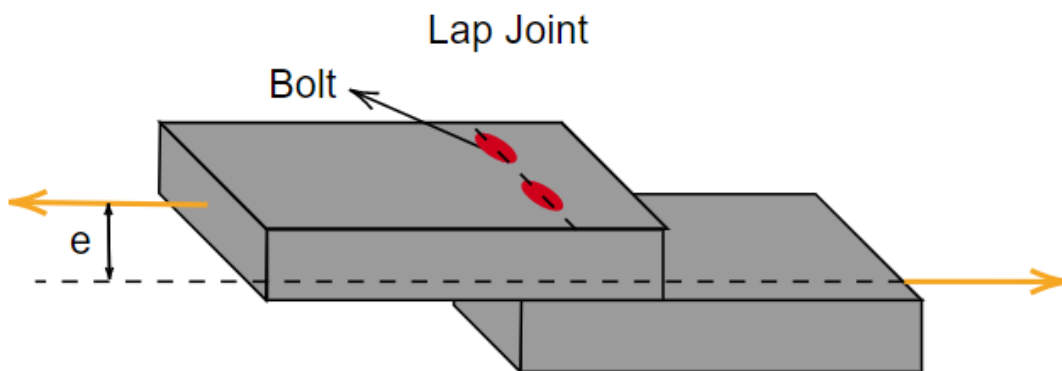


Figura 6.- Unión atornillada solapada

En la unión empalmada (Figura 7), se utiliza una placa de cubierta para unir dos miembros. En función del número de placas de cubierta, existen dos tipos de juntas empalmadas: la junta empalmada de cubierta simple y la junta empalmada de cubierta doble.

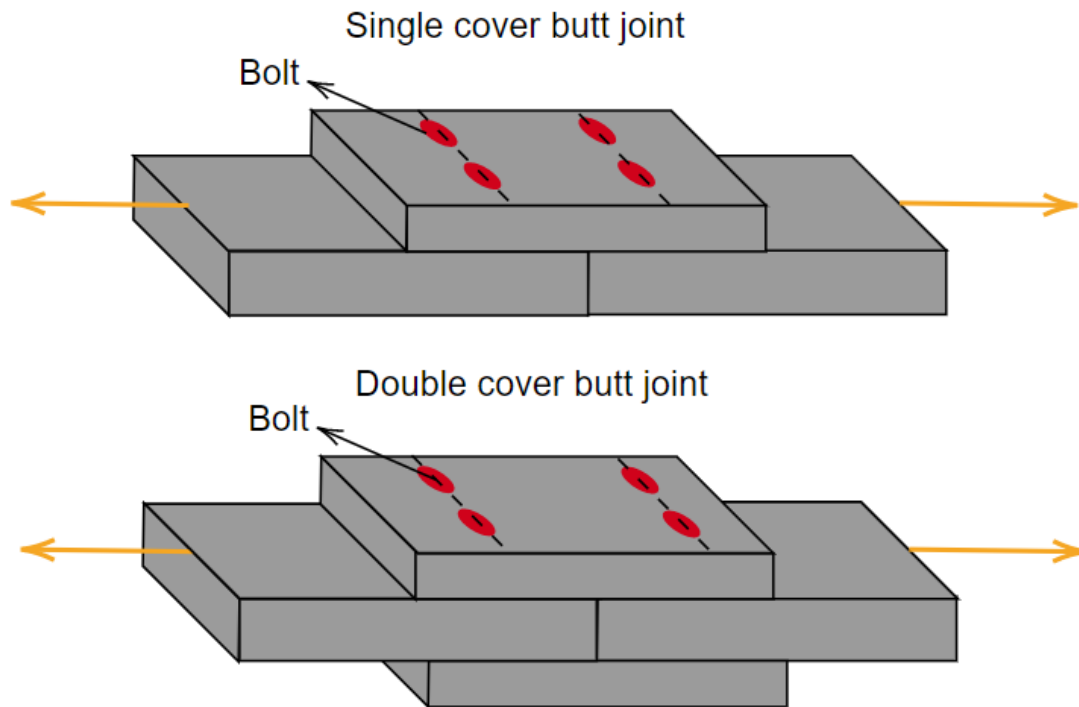


Figura 7.- Unión atornillada empalmada

En una unión atornillada, puede fallar la placa de conexión o el tornillo. Por lo tanto, es importante tener en cuenta los "estados límite" o modos de fallo tanto del tornillo como de la placa. A continuación, se mencionan los posibles estados límite por los que puede fallar una unión atornillada.

### 2.2.3 Fallos en uniones atornilladas

#### I. Fallo por cizallamiento de los pernos

Como su nombre indica, este fallo se produce debido a la fuerza de cizallamiento en la interfaz de las superficies de una unión. Dependiendo del número de superficies de cizallamiento, existen dos tipos de fallo por cizallamiento que pueden producirse en una unión atornillada, que son, el fallo por cizallamiento simple y el fallo por cizallamiento doble.

##### a) Fallo por cizallamiento simple

En este caso, el perno está sometido a una única fuerza de cizallamiento que podría provocar el fallo del perno. Este tipo de fallo se produce en las uniones de empalme de tapa única y en las uniones solapadas.

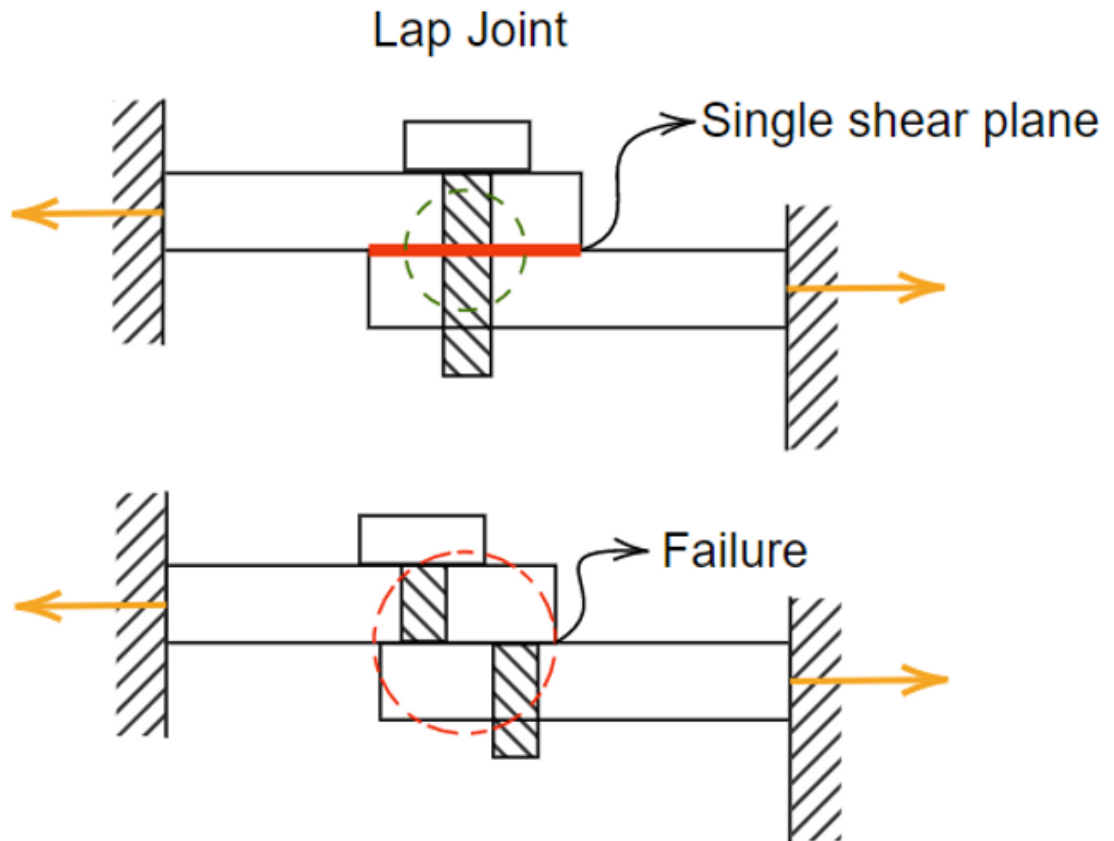


Figura 8.- Fallo por cizallamiento simple en uniones atornilladas

El fallo por cizallamiento simple en uniones atornilladas ocurre cuando las fuerzas cortantes aplicadas a la unión superan la capacidad de resistencia del material y las conexiones. En este tipo de fallo, la falla se produce en una superficie de corte que atraviesa el material de forma paralela a la dirección de las fuerzas aplicadas (Figura 8).

Cuando se aplica una carga de cizallamiento a una unión atornillada, las fuerzas cortantes se distribuyen entre los tornillos que mantienen unidos los elementos estructurales. Estos tornillos se someten a esfuerzos de corte a lo largo de sus secciones transversales, lo que genera tensiones tangenciales en el material.

A medida que la carga de cizallamiento aumenta, las tensiones en los tornillos también aumentan. Si la carga supera la resistencia del material o la capacidad de los tornillos para resistir esas tensiones, se producirá el fallo por cizallamiento simple. En esta situación, los tornillos pueden romperse o el material circundante puede experimentar deformaciones plásticas significativas, lo que resulta en una pérdida de integridad estructural.

b) Fallo por doble cizallamiento

En este caso, el perno está sometido a dos fuerzas de cizallamiento en dos planos de cizallamiento separados (Figura 9). Este tipo de fallo se produce en la unión empalmada de doble tapa.

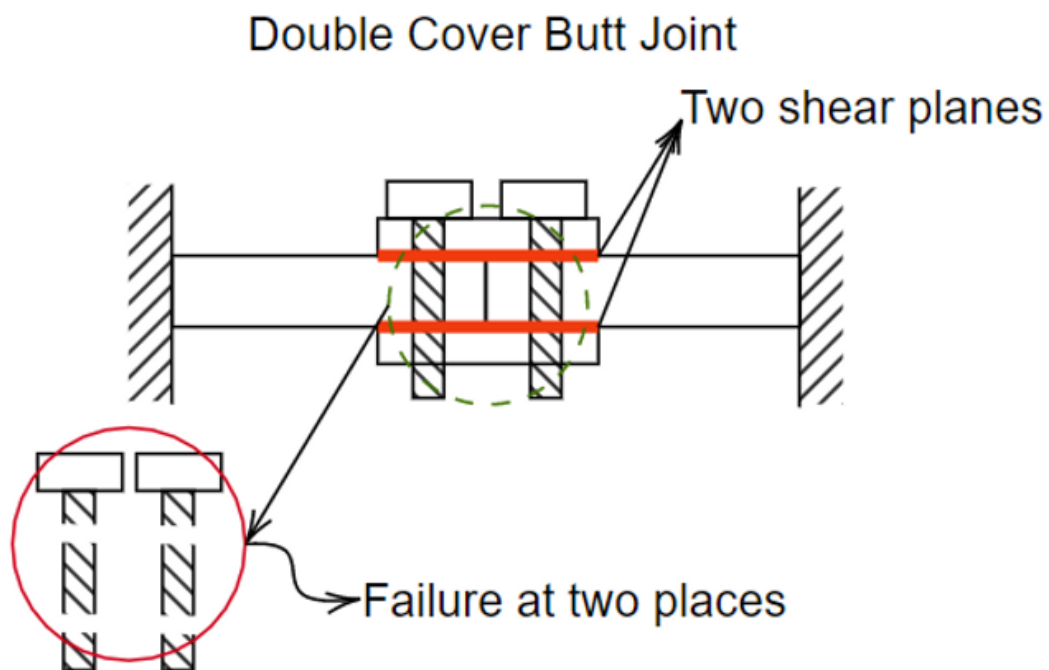


Figura 9.- Fallo por doble cizallamiento en uniones atornilladas

El fallo por doble cizallamiento en uniones atornilladas ocurre cuando las fuerzas cortantes aplicadas a la unión superan la capacidad de resistencia del material y las conexiones, resultando en una falla a lo largo de dos planos de corte paralelos. Este tipo de fallo es más crítico que el fallo por cizallamiento simple, ya que se produce una mayor



separación de las placas de unión y se requiere una mayor resistencia para soportar la carga aplicada.

Cuando se aplica una carga de cizallamiento a una unión atornillada, las fuerzas cortantes se distribuyen entre los tornillos que conectan las placas de unión. En una unión atornillada sometida a un doble cizallamiento, la carga de cizallamiento actúa en direcciones opuestas, generando tensiones en las secciones transversales de los tornillos y las placas de unión.

A medida que la carga de cizallamiento aumenta, las tensiones en los tornillos también aumentan. Si la carga supera la resistencia del material o la capacidad de los tornillos para resistir esas tensiones, se produce el fallo por doble cizallamiento. En este fallo, los tornillos y las placas de unión se separan a lo largo de dos planos de corte paralelos, resultando en una pérdida de integridad estructural.

## II. Fallo por aplastamiento de los pernos

En este fallo, el perno falla debido al contacto con las placas. Este tipo de fallo se produce en los casos en que se utiliza un perno de baja resistencia con una placa de grado muy alto, lo que no suele ocurrir en la práctica.

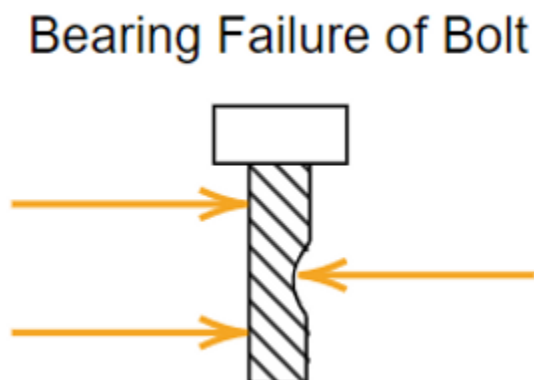


Figura 10.- Fallo por aplastamiento en uniones atornilladas

La falla por aplastamiento de un perno ocurre cuando la carga aplicada provoca un estrés compresivo excesivo en el área de contacto entre el perno y el material conectado, lo que lleva al fallo del perno o del propio material (Figura 10). Este tipo de fallo se caracteriza principalmente por la trituración o deformación del material bajo la cabeza o la tuerca del perno.

Cuando se carga un perno en aplastamiento, la fuerza aplicada se transmite a través del perno y se distribuye sobre un área limitada de contacto entre la cabeza o la tuerca del perno y el material conectado. A medida que aumenta la carga, la presión entre el perno y el material también aumenta. Si esta presión supera la capacidad de carga del material, ocurre la falla por aplastamiento.

### III. Resistencia a la tracción de los pernos

La resistencia a la tracción de un tornillo es la fuerza que éste puede soportar en dirección perpendicular al plano de carga. Si la tracción en este eje perpendicular supera la resistencia a la tracción del tornillo, éste fallará por tracción (Figura 11).

#### Tensile Failure of Bolts

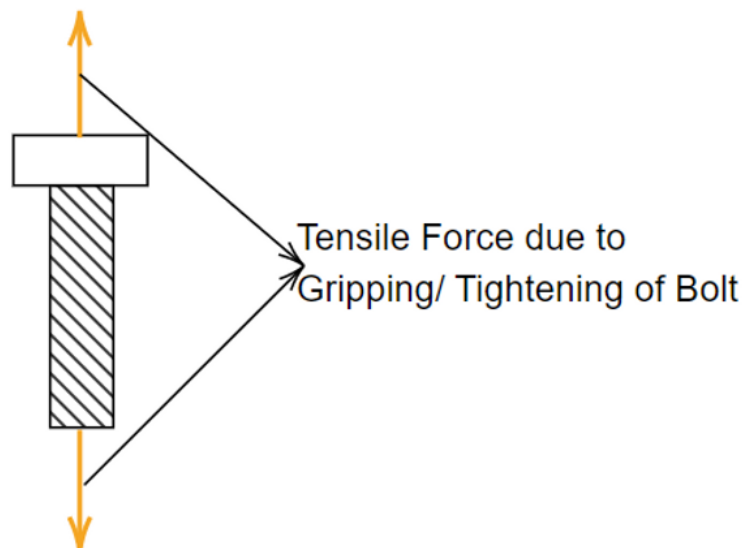


Figura 11.- Resistencia a la tracción en uniones atornilladas

El fallo en la resistencia a la tracción de los pernos ocurre cuando la carga aplicada al perno supera su capacidad para resistir fuerzas de tracción. En este tipo de fallo, el perno se rompe o fractura debido a la tensión excesiva a la que se ve sometido.

Cuando se aplica una carga de tracción a un perno, este se estira y se somete a esfuerzos de tensión a lo largo de su longitud. A medida que aumenta la carga, las fuerzas de tracción en el perno también aumentan. Si la carga aplicada supera la resistencia del perno a la tracción, se produce el fallo.

El fallo en la resistencia a la tracción de un perno puede ocurrir de diferentes maneras:

**Fractura dúctil:** En este tipo de fallo, el perno se estira hasta que alcanza su límite elástico y luego se deforma plásticamente. Finalmente, el perno se rompe de manera gradual y presenta una superficie de fractura característica con deformaciones y estrías.

**Fractura frágil:** En algunos casos, especialmente en pernos de alta resistencia, la fractura puede ocurrir de manera súbita y sin deformación plástica significativa. Esto se conoce como fractura frágil, y la superficie de fractura es lisa y presenta un aspecto cristalino.

#### IV. Rotura por cizallamiento de placas

La rotura por cizallamiento de placas unidas mediante tornillos ocurre cuando las fuerzas de corte aplicadas a la unión superan la capacidad de resistencia del material y de los tornillos, lo que resulta en una separación o deslizamiento de las placas a lo largo de la superficie de contacto. Este tipo de fallo se caracteriza por una ruptura o desgarró en la zona de unión entre las placas (Figura 12).

Cuando se aplica una carga de corte a una unión atornillada, las fuerzas de cizallamiento se transmiten a través de los tornillos y se distribuyen a lo largo de la superficie de contacto entre las placas. A medida que aumenta la carga, las fuerzas de corte también aumentan. Si estas fuerzas superan la resistencia del material y la capacidad de agarre de los tornillos, se produce la rotura por cizallamiento.

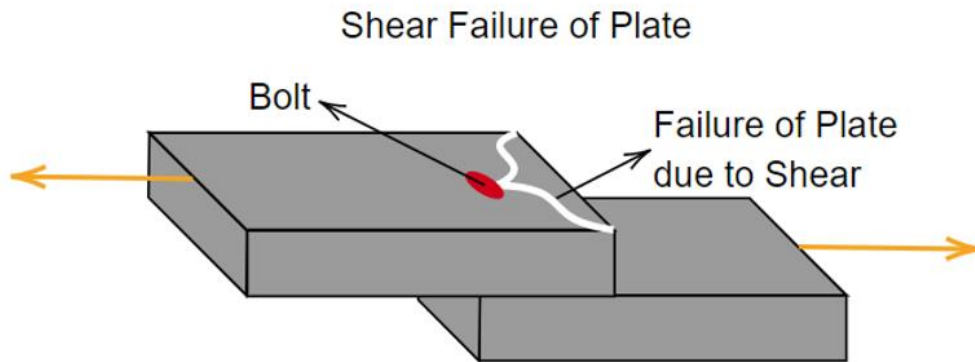


Figura 12.-Rotura por cizallamiento de placas en uniones atornilladas

La rotura por cizallamiento de placas unidas mediante tornillos puede ocurrir de diferentes maneras:

Deslizamiento de las placas: Bajo cargas de corte elevadas, las placas pueden deslizarse o separarse entre sí a lo largo de la superficie de contacto. Esto puede deberse a un agarre insuficiente de los tornillos o a un material con baja resistencia al cizallamiento.

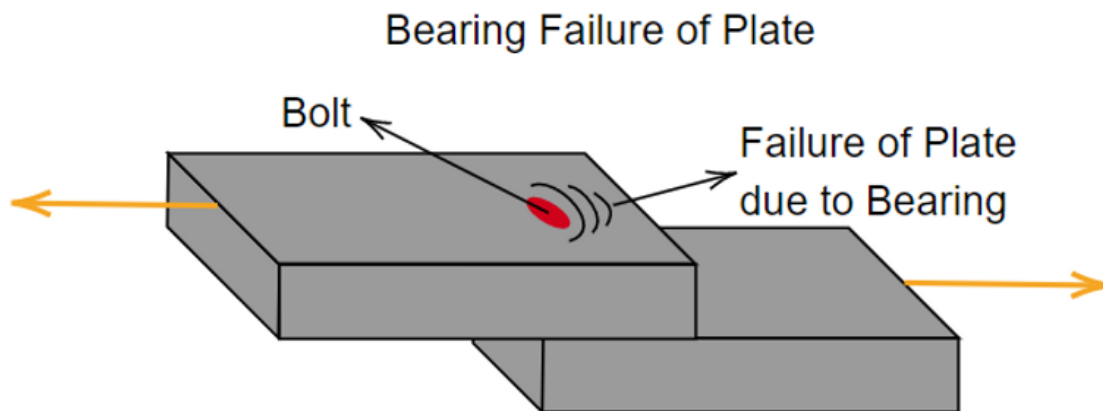
Ruptura de los tornillos: Si las fuerzas de corte son excesivas, los tornillos pueden romperse debido a la carga aplicada. Esto puede ocurrir por fractura dúctil o frágil, dependiendo de las características del material y el diseño del tornillo.

#### V. Fallo por aplastamiento de placas

El fallo por aplastamiento en una unión de placas con pernos ocurre cuando la carga aplicada excede la capacidad de carga del material de las placas o de los propios pernos. Este tipo de fallo se caracteriza principalmente por la deformación o el fallo del material bajo la cabeza del perno o la tuerca debido a un estrés compresivo excesivo.

En una unión de placas con pernos, la carga aplicada se transfiere a través de los pernos y se distribuye a las placas en contacto (Figura 13). El área de contacto entre la cabeza del perno o la tuerca y la placa está sujeta a fuerzas compresivas elevadas. Si el estrés

compresivo supera la capacidad de carga del material, puede ocurrir un fallo por aplastamiento.



*Figura 13.-Fallo por aplastamiento de placas en uniones atornilladas*

Tanto el fallo por cizallamiento como el fallo por aplastamiento de la placa pueden evitarse proporcionando suficientes distancias de centro a centro entre los pernos, tal como se menciona en la sección 10 de la IS 800 (2007).

#### VI. Fallo por tracción de la placa

Debido a una reducción en el área neta (es decir, debido a los agujeros de los pernos) de la placa a lo largo de la línea de pernos, la resistencia a la tracción de la placa será menor que el valor real en esta sección. Debido a esto, la placa podría fallar bajo tensión. Por lo tanto, es importante calcular el área neta mínima entre las diferentes líneas de pernos para encontrar la resistencia a la tracción mínima de la placa y comprobar su seguridad para la carga aplicada.

Si el área neta calculada es mayor o igual que la resistencia a la tracción mínima requerida, la placa cumple con los criterios de seguridad para la carga aplicada. Sin embargo, si el área neta es menor que la resistencia a la tracción mínima requerida será necesario reconsiderar el diseño y tomar medidas para fortalecer la unión, como aumentar el número o el tamaño de los pernos o utilizar una placa más gruesa.

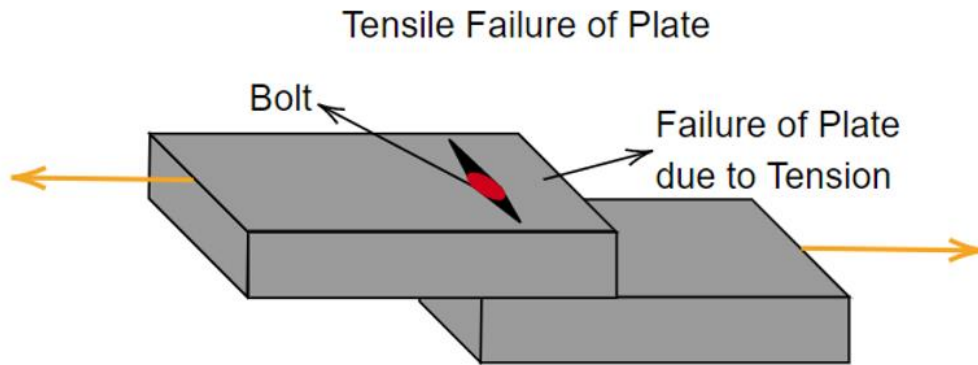


Figura 14.- Fallo por tracción de la placa en uniones atornilladas

El fallo por tracción de placas unidas mediante tornillos ocurre cuando la carga aplicada a la unión excede la capacidad de resistencia de los materiales y los tornillos utilizados. En este tipo de fallo, la carga de tracción genera fuerzas que tienden a separar las placas, lo que puede resultar en la fractura o separación de la unión.

Cuando se aplica una carga de tracción a una unión de placas, las fuerzas se transmiten a través de los tornillos y se distribuyen a lo largo de la superficie de contacto entre las placas (Figura 14). A medida que la carga aumenta, también lo hacen las fuerzas de tracción en los tornillos. Si estas fuerzas superan la capacidad de resistencia de los materiales o la capacidad de carga de los tornillos, se produce el fallo por tracción.

#### 2.2.4 Propiedades mecánicas de la unión con tornillos

Las propiedades mecánicas básicas de los tornillos (pernos) estructurales típicos son las siguientes:

Eurocódigo y español; ISO 898-1:2013 (Propiedades mecánicas de los elementos de fijación de acero al carbono y acero aleado - Parte 1: Pernos, tornillos con clases de propiedades especificadas - Rosca gruesa y rosca de paso fino).

En la siguiente Tabla 1 se muestran los valores nominales del límite elástico  $f_{yb}$  y de la resistencia última a tracción  $f_{ub}$ , para adoptar como valores característicos en los cálculos

<b>Bolt grade</b>	<b>4.6</b>	<b>5.6</b>	<b>6.8</b>	<b>8.8</b>	<b>10.9</b>
$f_{yb}(N/mm^2)$	240	300	480	640	900
$f_{ub}(N/mm^2)$	400	500	600	800	1000

Tabla 1.- Valores nominales de límite elástico y la resistencia a tracción de los tornillos

Los materiales de los tornillos utilizados en las uniones atornilladas pueden dividirse en los dos grupos siguientes (en los que la principal diferencia es el material y el tratamiento):

- Pernos ordinarios (4,6, 5,6 y 6,8)
- Pernos de alta resistencia (8.8 y 10.9)

Considerando la transferencia de carga a través de la junta, los pernos pueden comportarse como:

- NO CARGADOS - Pernos portantes (soportan esfuerzo cortante y tracción)
- PRECARGADOS - Pernos de fricción (soportan sólo la tensión, el cizallamiento es soportado por la fricción)

Hay que tener en cuenta que el uso de tornillos de alta resistencia no significa que sea obligatorio precargarlos. Los pernos de alta resistencia pueden utilizarse como pernos no precargados, es decir, funcionando como pernos ordinarios. Tenga en cuenta también que los tornillos ordinarios no pueden precargarse.

- Pernos de apoyo sin cargar (los pernos pueden ser de alta resistencia u ordinarios)

Cuando una conexión funciona como tipo portante, la transferencia de carga a los miembros conectados es la siguiente (Figura 15):

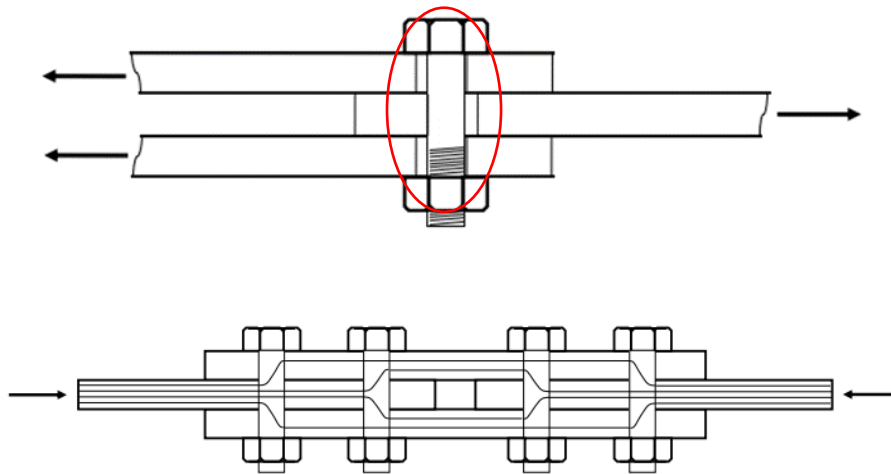


Figura 15.- Transferencia de carga a los tornillos

Un perno de apoyo está sometido a cizallamiento porque no hay suficiente fricción entre las placas para evitar el deslizamiento (las superficies de contacto no están preparadas). Además, aparece una fuerza de apoyo entre el perno y la placa.

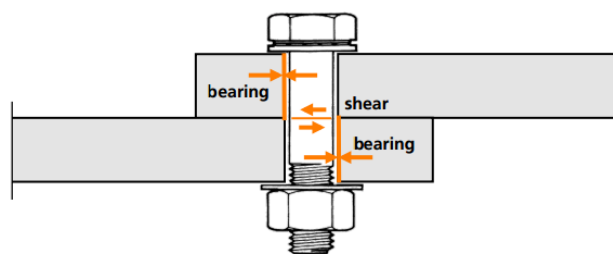


Figura 16.- Fuerza entre tornillo y placa

Además de la resistencia al cortante ( $F_{v,Rd}$ ) y la resistencia al apoyo ( $F_{b,Rd}$ ), debe comprobarse la resistencia a la tracción ( $F_{t,Rd}$ ).

Resistencia a la tracción ( $F_{t,Rd}$ ) según EC03:

$$F_{t,Rd} = \frac{k_2 f_{ub} A_s}{\gamma_{M2}}$$



Debido a la combinación del cortante y tracción, debe realizarse la siguiente comprobación.

$$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1,4F_{t,Rd}} \leq 1,0$$

- Pernos precargados/de fricción (Sólo pueden ser pernos de alta resistencia)

Si una conexión funciona como tipo de fricción, la transferencia de carga a los miembros conectados es la siguiente:

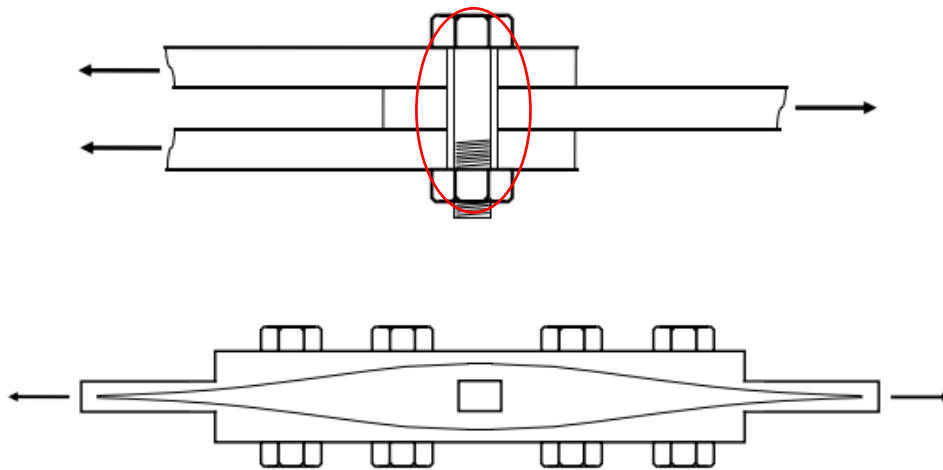


Figura 17.- Unión atornillada con fricción

Cuando el perno está precargado, si la precarga es suficiente, una fricción entre placas soporta los esfuerzos cortantes (las superficies de contacto están preparadas). El perno soporta únicamente la tensión debida a la precarga.

Hay que tener en cuenta que si no se añade una preparación adecuada de la superficie (por ejemplo, (clase A,  $\mu=0,5$  y B,  $\mu=0,4$ ) no merece la pena utilizar pernos precargados.

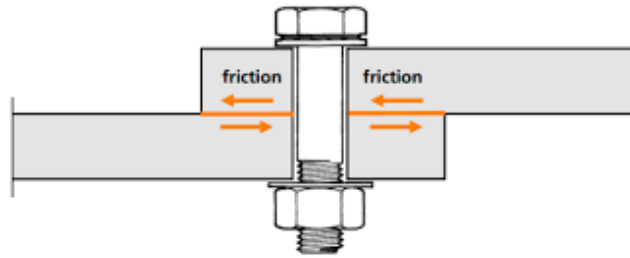


Figura 18.- Perno precargado

Debe comprobarse la resistencia a la fricción ( $F_{S,Rd}$ ) la resistencia a la precarga ( $F_{p,C}$ ).

$$F_{S,Rd} = \frac{k_s n \mu}{\gamma_{M3}} F_{p,C}$$

$$F_{p,C} = 0,7 \cdot f_{ub} \cdot A_s$$

Si además de la precarga, se aplica una carga de tracción externa, podrían darse dos situaciones posibles:

- La carga de tracción externa aplicada debe ser inferior a la precarga (situación de diseño).

La compresión entre placas disminuye y el perno sólo está bajo la tensión debida a la precarga. Debe comprobarse la resistencia a la fricción ( $F_{S,Rd}$ ) y la resistencia a la precarga ( $F_{p,C}$ ).

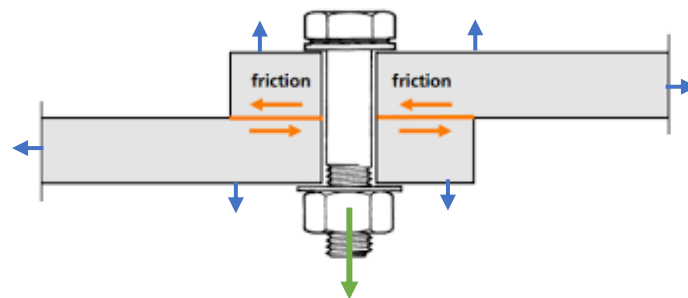


Figura 19.- Unión atornillada sometida a cargas de tracción externa y precarga

$$F_{s,Rd} = \frac{k_s n \mu (F_{p,C} - 0,8 F_{t,Ed})}{\gamma_{M3}}$$

$$F_{p,C} = 0,7 \cdot f_{ub} \cdot A_s$$

- La carga de tracción externa aplicada es superior a la precarga (NO permitido y NO recomendado)

Categorías de uniones atornilladas según eurocódigo:

Type	Category	Criteria	Remarks
Shear connections	<b>A</b> bearing type	$F_{v,Ed} \leq F_{v,Rd}$ $F_{v,Ed} \leq F_{b,Rd}$	<u>No preloading required.</u> Bolt classes from 4.6 to 10.9 may be used.
	<b>B</b> slip-resistant at serviceability	$F_{v,Ed,ser} \leq F_{s,Rd,ser}$ $F_{v,Ed} \leq F_{v,Rd}$ $F_{v,Ed} \leq F_{b,Rd}$	<u>Preloaded 8.8 or 10.9 bolts should be used.</u> For slip resistance at serviceability
	<b>C</b> slip-resistant at ultimate	$F_{v,Ed} \leq F_{s,Rd}$ $F_{v,Ed} \leq F_{b,Rd}$ $\sum F_{v,Ed} \leq N_{net,Rd}$	<u>Preloaded 8.8 or 10.9 bolts should be used.</u> For slip resistance at ultimate
Tension connections	<b>D</b> non-preloaded	$F_{t,Ed} \leq F_{t,Rd}$ $F_{t,Ed} \leq B_{p,Rd}$	<u>No preloading required.</u> Bolt classes from 4.6 to 10.9 may be used.
	<b>E</b> preloaded	$F_{t,Ed} \leq F_{t,Rd}$ $F_{t,Ed} \leq B_{p,Rd}$	<u>Preloaded 8.8 or 10.9 bolts should be used.</u>

Tabla 2.- Categorías de uniones atornilladas según eurocódigo

Es importante tener en cuenta, en todas las uniones atornilladas, la separación mínima y máxima y las distancias entre extremos y bordes de los tornillos.

**Table 3.3: Minimum and maximum spacing, end and edge distances**

Distances and spacings, see Figure 3.1	Minimum	Maximum <sup>1) 2) 3)</sup>		
		Structures made from steels conforming to EN 10025 except steels conforming to EN 10025-5		Structures made from steels conforming to EN 10025-5
		Steel exposed to the weather or other corrosive influences	Steel not exposed to the weather or other corrosive influences	Steel used unprotected
End distance $e_1$	$1,2d_0$	$4t + 40$ mm		The larger of $8t$ or 125 mm
Edge distance $e_2$	$1,2d_0$	$4t + 40$ mm		The larger of $8t$ or 125 mm
Distance $e_3$ in slotted holes	$1,5d_0$ <sup>4)</sup>			
Distance $e_4$ in slotted holes	$1,5d_0$ <sup>4)</sup>			
Spacing $p_1$	$2,2d_0$	The smaller of $14t$ or 200 mm	The smaller of $14t$ or 200 mm	The smaller of $14t_{min}$ or 175 mm
Spacing $p_{1,0}$		The smaller of $14t$ or 200 mm		
Spacing $p_{1,i}$		The smaller of $28t$ or 400 mm		
Spacing $p_2$ <sup>5)</sup>	$2,4d_0$	The smaller of $14t$ or 200 mm	The smaller of $14t$ or 200 mm	The smaller of $14t_{min}$ or 175 mm
<p>1) Maximum values for spacings, edge and end distances are unlimited, except in the following cases:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- for compression members in order to avoid local buckling and to prevent corrosion in <math>\square_{AC}</math> exposed members (the limiting values are given in the table) and; <math>\langle AC \rangle</math></li> <li>- for exposed tension members <math>\square_{AC}</math> to prevent corrosion (the limiting values are given in the table). <math>\langle AC \rangle</math></li> </ul> <p>2) The local buckling resistance of the plate in compression between the fasteners should be calculated according to EN 1993-1-1 using <math>0,6 p_1</math> as buckling length. Local buckling between the fasteners need not to be checked if <math>p_1/t</math> is smaller than <math>9 \epsilon</math>. The edge distance should not exceed the local buckling requirements for an outstand element in the compression members, see EN 1993-1-1. The end distance is not affected by this requirement.</p> <p>3) <math>t</math> is the thickness of the thinner outer connected part.</p> <p>4) The dimensional limits for slotted holes are given in 1.2.7 Reference Standards: Group 7.</p> <p>5) For staggered rows of fasteners a minimum line spacing of <math>p_2 = 1,2d_0</math> may be used, provided that the minimum distance, <math>L</math>, between any two fasteners is greater or equal than <math>2,4d_0</math>, see Figure 3.1b).</p>				

Figura 20.- Espacios mínimos y máximos entre tornillos según el Eurocódigo

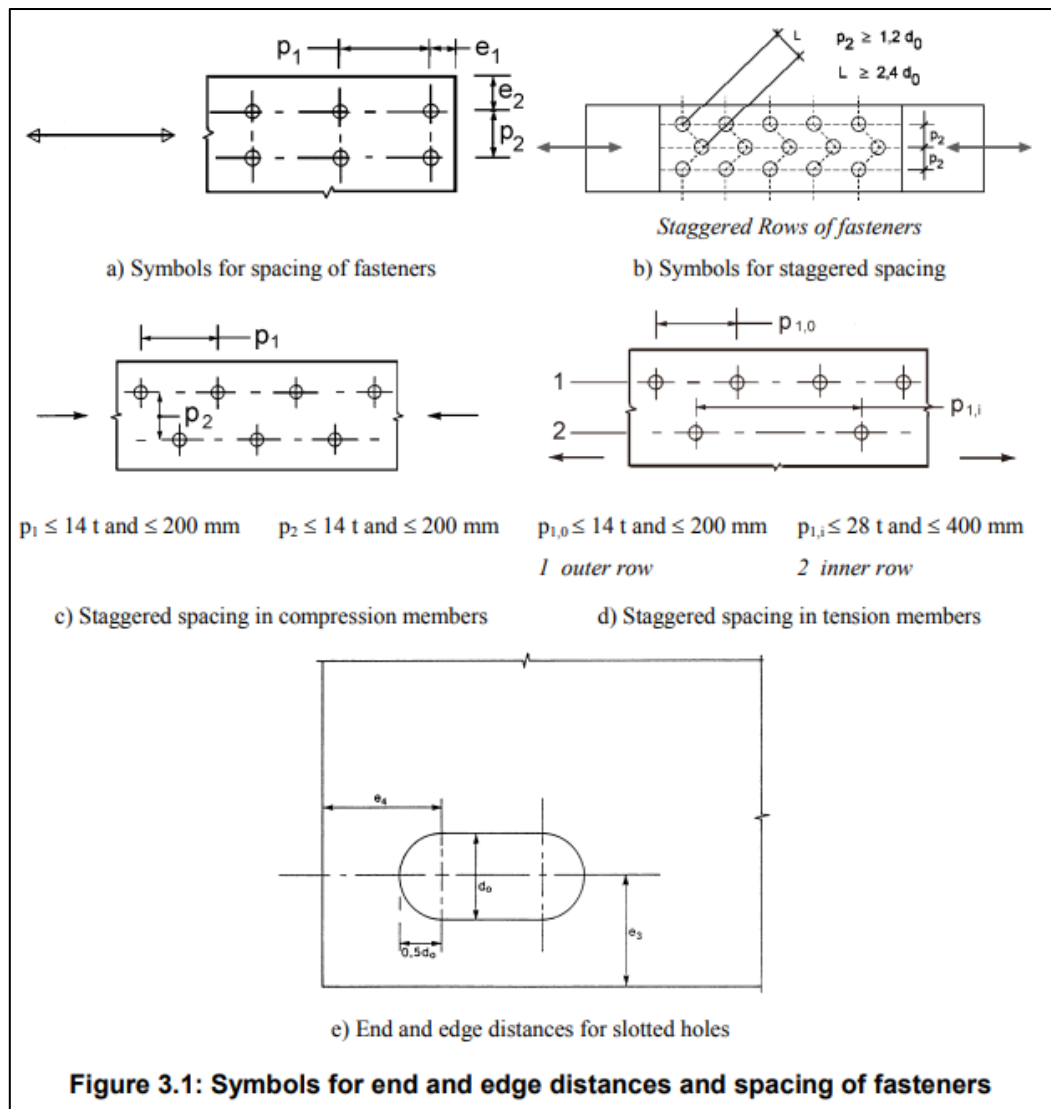


Figura 21.- Simbología en el espaciado entre tornillos

## 2.2.5 Unión soldada

La soldadura estructural es un proceso mediante el cual las piezas que se van a unir se calientan y se funden, con metal fundido adicional en la unión. Una profundidad relativamente pequeña de material se fundirá y, al enfriarse, el acero estructural y el metal de soldadura actuarán como una pieza continua en el lugar donde se unan.

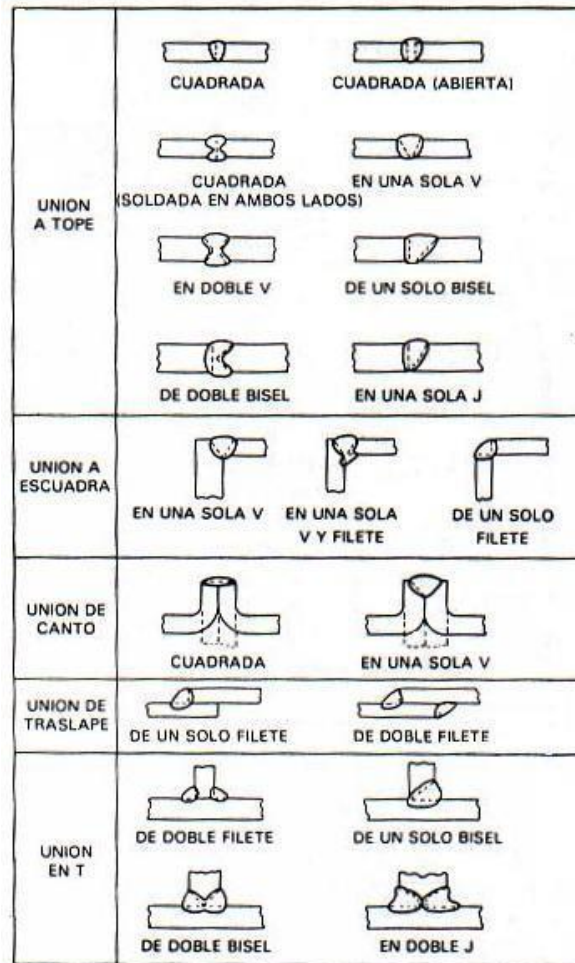


Figura 22.- Tipos de uniones en soldadura

La energía térmica para fusionar dos miembros de acero puede ser eléctrica, mecánica o química, pero normalmente se utiliza energía eléctrica para soldar acero estructural. En la Figura 22, se pueden observar los tipos de uniones en soldadura más comunes.

### 2.2.6 Unión articulada

Las uniones articuladas se utilizan para transmitir únicamente fuerzas axiales y no momentos de flexión entre dos elementos. Se utilizan para la construcción de cerchas y otros mecanismos en los que se requiere una conexión articulada para el movimiento.

Las uniones articuladas en estructuras de acero permiten la conexión entre diferentes miembros estructurales de manera que puedan tener movimientos relativos o rotaciones en ciertos planos específicos. Estas uniones se diseñan para permitir la libre rotación o articulación en una o más direcciones, lo que brinda flexibilidad a la estructura y permite adaptarse a las cargas y deformaciones a las que esté expuesta.

Físicamente, una unión articulada se logra al permitir que los miembros estructurales estén conectados de manera que puedan girar o pivotar alrededor de un punto o eje específico. Esto se logra mediante el uso de elementos de conexión, como pernos o pasadores, que permiten el movimiento relativo entre los miembros (Figura 23).



*Figura 23.- Unión articulada en un puente*

Cuando se carga una estructura con uniones articuladas, las fuerzas y momentos se transmiten a través de los miembros estructurales hacia las uniones. Debido a la naturaleza articulada de estas conexiones, los momentos y las cargas son redistribuidos y se producen reacciones que permiten el movimiento rotacional.

En una unión articulada, los momentos de flexión y las fuerzas axiales se transmiten principalmente a través de los miembros estructurales, mientras que los momentos de torsión se transmiten a través de los elementos de conexión. Esto significa que los miembros conectados pueden girar o moverse en respuesta a las cargas aplicadas, lo que proporciona una mayor capacidad de adaptación de la estructura.

Las uniones articuladas se utilizan en diversas aplicaciones estructurales, como pórticos o estructuras de celosía, donde se requiere una mayor flexibilidad para permitir movimientos y deformaciones debido a cargas variables, cambios térmicos o asentamientos diferenciales.

Es importante destacar que las uniones articuladas deben diseñarse cuidadosamente para garantizar su adecuado funcionamiento y resistencia. Se deben considerar factores como las cargas esperadas, la resistencia de los materiales, la estabilidad de la estructura y las normas de diseño aplicables.



## 3 Método de elementos finitos en Ansys

### 3.1 Introducción

Los fenómenos tratados en la ciencia y la ingeniería se describen a menudo en términos de ecuaciones diferenciales formuladas utilizando sus modelos de mecánica del continuo. La resolución de ecuaciones diferenciales bajo diversas condiciones, como las condiciones iniciales o de contorno, permite comprender los fenómenos y predecir su futuro. Sin embargo, las soluciones exactas de las ecuaciones diferenciales suelen ser difíciles de obtener. Se adoptan métodos numéricos para obtener soluciones aproximadas de las ecuaciones diferenciales. Entre estos métodos numéricos, los que aproximan continuos con grado de libertad infinito mediante un cuerpo discreto con grado de libertad finito se denominan análisis discretos. Los análisis discretos más conocidos son el método de las diferencias finitas, el método de los residuos ponderados y el método de Rayleigh-Ritz. Mediante estos métodos de análisis discreto, las ecuaciones diferenciales se reducen a ecuaciones algebraicas lineales simultáneas y, por tanto, pueden resolverse numéricamente.

### 3.2 Conceptos básicos

Ansys es un paquete de modelado de elementos finitos para resolver numéricamente una amplia variedad de problemas mecánicos. Estos problemas incluyen el análisis estático/dinámico, estructural (tanto lineal como no lineal), la transferencia de calor y los problemas de fluidos, así como los problemas acústicos y electromagnéticos. En general, una solución de elementos finitos puede dividirse en tres etapas:

- Preprocesamiento: definición del problema, los principales pasos del preprocesamiento consisten en definir los puntos/líneas/áreas/volúmenes clave, definir el tipo de elemento y las propiedades geométricas/materiales, así como las líneas/áreas/volúmenes de malla necesarios. La cantidad de detalles necesarios dependerá de la dimensionalidad del análisis, 1D, 2D, axisimétrico y 3D.

- Solución: asignación de cargas, restricciones y resolución. Aquí es necesario especificar las cargas (puntuales o de presión), las restricciones (traslacionales y rotacionales) y, por último, resolver el conjunto de ecuaciones resultante.

- Postprocesado: tratamiento posterior y visualización de los resultados. En esta etapa podemos obtener listas de desplazamientos nodales, fuerzas y momentos de los elementos, gráficos de deflexión y diagramas de contorno de tensiones o mapas de temperatura.

Es decir, después de la creación de la geometría y la generación de la malla, vienen las etapas que se pueden ver en la Figura 24.

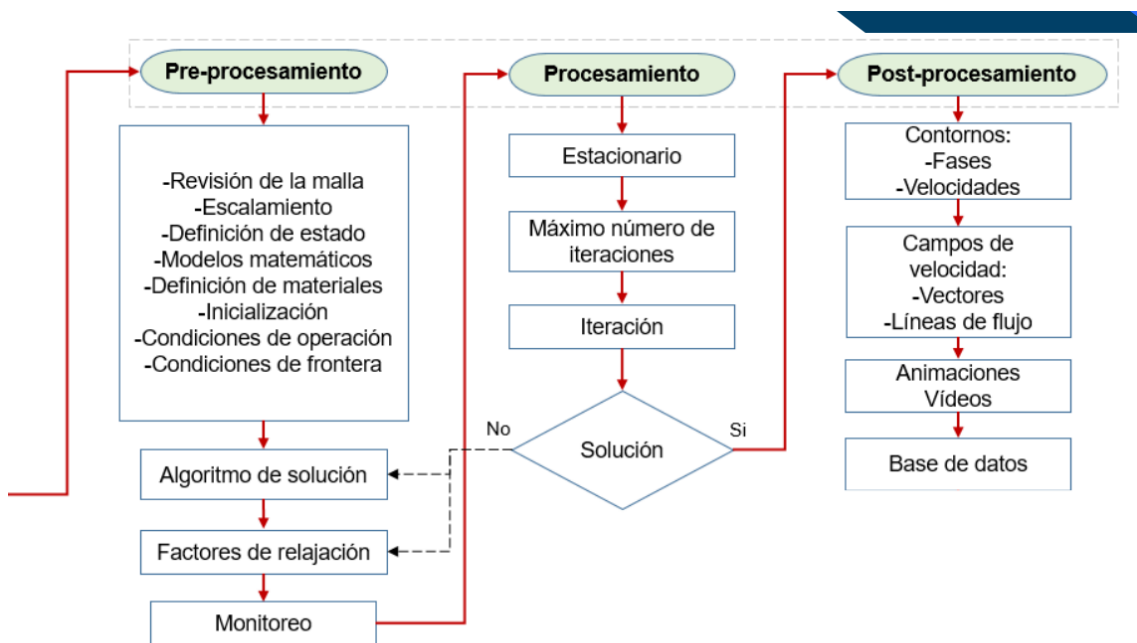


Figura 24.- Etapas para llegar a una solución por elementos finitos en Ansys

### 3.3 Nodos comunes

La transformación del problema práctico de ingeniería en una representación matemática se consigue discretizando el dominio de interés en elementos, conocidos como subdominios, como se muestra en la Figura 25. Estos elementos están conectados entre sí por sus nodos comunes. Un nodo especifica la localización de coordenadas en el espacio donde existen los grados de libertad y las acciones del problema físico. La incógnita nodal en el sistema matricial de ecuaciones representa una (o más) de las variables de campo primarias. Las variables nodales asignadas a un elemento se denominan grados de libertad del elemento. Los nodos comunes mostrados en la figura anterior proporcionan continuidad para las variables nodales. Los grados de libertad de un nodo vienen dictados por la naturaleza física del problema y el tipo de elemento.

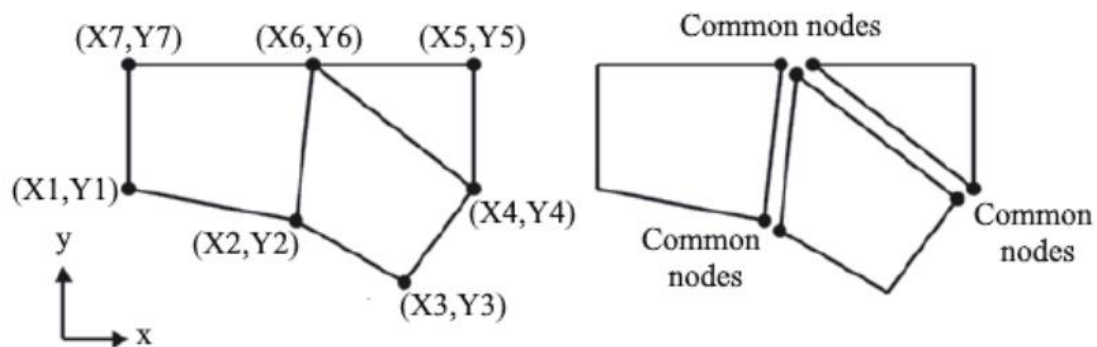


Figura 25.- División de un dominio en nodos comunes

### 3.4 Elementos comunes

Dependiendo de la geometría y de la naturaleza física del problema, el dominio de interés puede discretizarse empleando elementos de línea, área o volumen. En la Figura 26 se muestran algunos de los elementos más comunes en el AEF (análisis de elementos finitos).

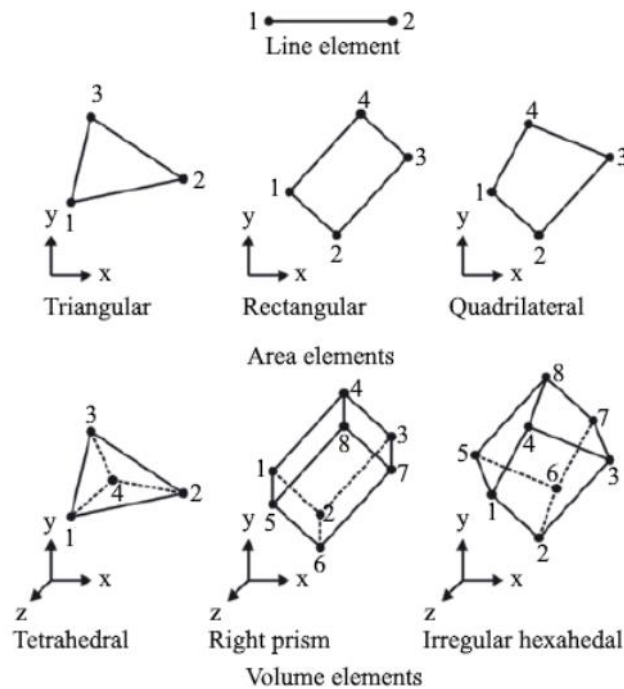


Figura 26.- Representación de elementos

Cada elemento, identificado por un número de elemento, se define por una secuencia específica de números de nodos globales. La secuencia específica (normalmente en sentido contrario a las agujas del reloj) se basa en la numeración de nodos a nivel de elemento.

### 3.5 Análisis del proyecto con elementos finitos

Las piezas que diseñamos funcionan en diversas condiciones reales de trabajo, como bajo presión, a alta temperatura, sometidas a fuerza o a vibraciones. Declaramos estas condiciones como condiciones de contorno en el método de los elementos finitos. Por eso debemos definir correctamente las condiciones de contorno para obtener resultados correctos de nuestro análisis. Algunas de las ventajas del método de elementos finitos se definen, como la posibilidad de probar nuestro sistema para las condiciones de trabajo con los datos de diseño, antes de la producción y podemos ver los resultados, otra ventaja es que podemos hacer la optimización de los datos de diseño para la creación de un mejor producto antes de la producción de acuerdo con los resultados del análisis y podemos

hacer diferentes pruebas de condiciones de trabajo en nuestro producto antes de la producción. Este método de análisis se utiliza en numerosos sectores industriales, como la industria espacial y aeronáutica, la automoción, la biomedicina y la construcción. El método de los elementos finitos es un método de ingeniería real y requiere una buena planificación, un modelado cuidadoso, un enfoque correcto que debe establecerse para las condiciones de contorno y otras definiciones, y los resultados deben evaluarse e interpretarse correctamente. Un análisis por elementos finitos consta de los siguientes pasos: determinación del tipo de análisis, determinación de las propiedades de los materiales, preparación del modelo numérico del modelo de diseño, definición de cargas y condiciones evaluación y optimización.

### **3.6 Ansys**

ANSYS es un software de simulación que se utiliza para predecir el comportamiento y la respuesta de un producto específico en un entorno real. Proporciona soluciones a problemas de ingeniería utilizando la teoría de elementos finitos para estructuras y volúmenes finitos para fluidos. En nuestro estudio, nos centraremos en la funcionalidad de ANSYS relacionada con los elementos finitos para estructuras, que se encuentra en la opción de análisis de Estático Estructural. Esta herramienta nos permite realizar análisis estáticos para evaluar la resistencia, deformación y estabilidad de las estructuras, lo que nos ayuda a comprender cómo se comportarán bajo diferentes condiciones de carga y a encontrar soluciones efectivas para los desafíos de ingeniería.

ANSYS es una plataforma utilizada para realizar cálculos estáticos y resolver problemas lineales y no lineales en diversas áreas, como estructuras, transferencia de calor, dinámica de fluidos, acústica y electromagnetismo. Una de las ventajas de ANSYS es su capacidad para integrar diferentes tecnologías en el desarrollo de un producto, sin la necesidad de cambiar de plataforma. Además, puede asociarse con software avanzado de diseño asistido por computadora (CAD), lo que facilita la importación de modelos creados en otros programas para su análisis en ANSYS.

Los primeros programas comerciales de elementos finitos surgieron en la década de 1970 y requerían el uso de grandes computadoras centrales o mainframes. Estos programas estaban dirigidos principalmente a las industrias aeroespacial, automotriz, defensa y nuclear. En la actualidad, los programas de elementos finitos se ejecutan en computadoras de escritorio y ofrecen una amplia gama de capacidades de análisis para simular el comportamiento de estructuras y sistemas en diversas condiciones y entornos.

## 4 Precedentes del proyecto

### 4.1 Introducción

El Eurocódigo 3, en su parte 1.8, ofrece una metodología para evaluar la resistencia y rigidez de las uniones entre perfiles en I o en H. Esta metodología divide la unión en diferentes partes, asignando una resistencia y rigidez específica a cada una, para luego ensamblarlas como un conjunto de muelles en serie y en paralelo. De esta manera, se puede determinar la resistencia última de la unión y su rigidez rotacional inicial.

Sin embargo, es importante destacar que el código solo contempla esta metodología para perfiles abiertos, y para las uniones con perfiles huecos solo se presentan fórmulas de resistencia en algunos casos específicos de uniones soldadas. Los códigos de diseño no ofrecen indicaciones sobre la evaluación de la rigidez de estas uniones, ni tampoco consideran su posible clasificación como uniones semirrígidas. Esto es especialmente relevante en el caso de uniones atornilladas, ya que ni siquiera se proporciona una estimación de su resistencia.

Las uniones atornilladas que involucran perfiles tubulares han estado limitadas tradicionalmente a bridas de unión entre perfiles en continuidad. Las uniones viga-pilar atornilladas con perfiles huecos han sido menos utilizadas debido a la dificultad de atornillar directamente a la cara del pilar, ya que no es posible aplicar el torque desde el interior del tubo. En consecuencia, la mayoría de las soluciones atornilladas existentes requieren piezas intermedias soldadas o costosos sistemas de tornillos ciegos. Estas limitaciones en la conexión de piezas a tubos han limitado considerablemente el uso de perfiles tubulares, a pesar de su potencial en estructuras más allá de las celosías.

Si se superan las limitaciones mencionadas, los perfiles tubulares ofrecen ventajas significativas en su aplicación estructural. En pilares, se destacan por sus excelentes características mecánicas a compresión cuando no hay restricciones claras de pandeo alrededor del eje débil. También son adecuados para vigas, ya que compensan la menor relación inercia/masa en comparación con los perfiles en I con una mayor resistencia

torsional, lo que evita la necesidad de comprobar el pandeo lateral-torsional en cálculos habituales. Esto es especialmente útil en vigas sin arriostramiento en su ala comprimida.

Además de sus ventajas estructurales, los perfiles tubulares son apreciados por sus cualidades estéticas y su facilidad para la aplicación de recubrimientos. Además, el uso de métodos constructivos que incluyen el relleno de hormigón o agua en el pilar tubular mejora significativamente la resistencia al fuego de la estructura. Incluso sin ningún relleno adicional, los perfiles tubulares muestran un mejor comportamiento frente al fuego en comparación con los perfiles abiertos. Entre las secciones tubulares, los perfiles rectangulares o cuadrados (RHS o SHS) son especialmente ventajosos en términos de ejecución de uniones, ya que permiten realizar cortes planos para su ensamblaje.

Dado que la mayoría de la investigación sobre uniones semirrígidas se ha centrado en aquellas que involucran perfiles abiertos en forma de I o H, hay pocas referencias bibliográficas disponibles que aborden específicamente los métodos de evaluación de rigidez para uniones con perfiles huecos. Hasta ahora, los esfuerzos principales han estado relacionados con los proyectos promovidos por el CIDECT (Comité International pour le Developpement et l'Etude de la Construction Tubulaire) en colaboración con expertos de Lieja y Aquisgrán. Sin embargo, estos trabajos representan solo un primer paso en la identificación del problema, proporcionando una revisión exhaustiva de la literatura existente y proponiendo conjuntos específicos de componentes para las uniones con pilares tubulares rectangulares (RHS). Además, se han propuesto algunas fórmulas analíticas para evaluar la resistencia (y a veces la rigidez) de los componentes identificados, en la mayoría de los casos utilizando ecuaciones del Eurocódigo 3-1.8 creadas originalmente para evaluar uniones completas entre perfiles huecos y no para componentes individuales. Debido a esta falta de conocimientos sobre la rigidez de las uniones con perfiles tubulares, incluso el propio CIDECT no ha publicado pautas claras sobre esta metodología en sus guías de diseño, que suelen presentar los avances más recientes para los diseñadores y que posteriormente suelen ser adoptados por las normativas internacionales. Por lo tanto, parece necesario investigar las uniones viga-pilar que involucran perfiles huecos rectangulares (RHS). Es especialmente útil explorar las uniones atornilladas, que son de fácil fabricación y montaje, con el objetivo de



minimizar o incluso eliminar la soldadura, evitando así el trabajo en obra que requiere personal altamente calificado y conlleva riesgos laborales significativos.

El presente proyecto tiene como objetivo estudiar este tipo de uniones que cumplen todas las condiciones mencionadas, y realizar una caracterización en términos de rigidez, resistencia y aplicabilidad en estructuras reales. Se espera que este estudio pueda ofrecer nuevas perspectivas y posibilidades para el uso de estas uniones en estructuras ligeras e incluso en construcciones provisionales desmontables. (Gracia Rodríguez, J. & López-Colina Pérez, C. (2022)).

## **4.2 Modelo geométrico**

Los modelos geométricos que han sido utilizados para el futuro estudio mediante “Ansys Static Structural” son: unión ortogonal viga-pilar y unión de cumbrera entre dinteles que se utilizaron en los ensayos de laboratorio por parte de mi compañero Diego García Picallo.

En todos los casos mencionados previamente los perfiles que se utilizaron son perfiles tubulares RHS 140x70x6 mm y RHS 140x80x4 mm con una longitud de 950mm. (Figura 27)

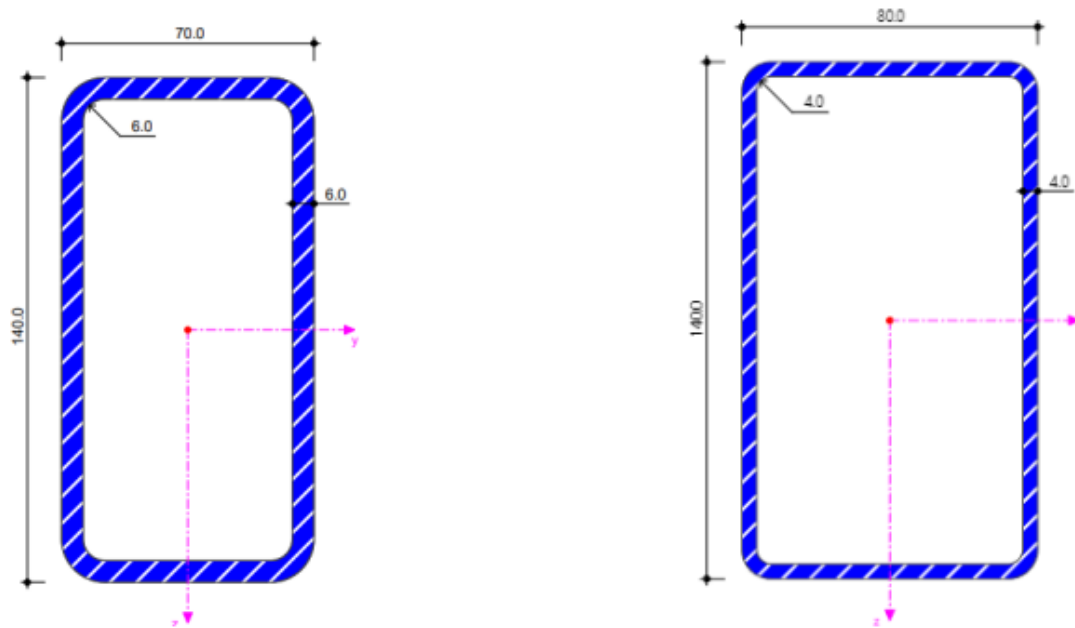


Figura 27.- Perfil RHS 140x70x6 (izq) y Perfil RHS 140x80x4 (dcha)

Estos perfiles son de acero laminado con forma rectangular. Son bisimétricos, y su uso está muy extendido en situaciones en las que se necesita un soporte vertical y las fuerzas a las que está sometido son notablemente más fuertes en una dirección que en otra. Su espesor es continuo y el rendimiento óptimo se consigue respecto al eje perpendicular al lado largo.

Los tornillos que unirán estos perfiles son tornillos autoperforantes y son los tornillos AUTO de la marca INDEX. Son tornillos de acero e ideales para la perforación de chapas y perfiles de acero. Como se verá más adelante, Figura 28, estos tornillos tienen una cabeza hexagonal con arandela estampada y una punta de broca viga y sus dimensiones son de:

CODIGO		M 5.5
d <sub>k</sub> : diámetro arandela cabeza	[mm]	11
k: espesor cabeza	[mm]	5.3
c: espesor arandela	[mm]	1.15
s: llave fija	[mm]	8
Punta		#5
D: diámetro exterior rosca	[mm]	5.5
d: diámetro interior rosca	[mm]	4.6
p: paso rosca	[mm]	1.06
l: longitudes	[mm]	32 - 38
Código punta de instalación (boca magnética hexagonal)		BOCA00B
Capacidad de taladrado	[mm]	4.0 - 12.0

**PLANO**

Figura 28.- Dimensiones de los tornillos AUTO

La instalación de dichos tornillos es bastante delicada debido al reducido tamaño de estos, y a las fuerzas a las que estos son sometidos, tanto de par de giro como de fricción entre el tornillo y la superficie de los tubos de acero; por ello se recogen los siguientes criterios de instalación que se han de llevar a cabo durante el proceso de diseño de las probetas.

Parámetro		ST 3.5	ST 3.9	ST 4.2	ST 4.8	ST 5.5 M 5.5	ST 6.3
Fuerza máxima instalación	[N]	150	200	250	250	350	350
Velocidad taladrado	Acero	1800 - 2500				1000 - 1800	
	Acero inox.	1000 - 1500				600 - 1000	
Tiempo máximo	[sg]	4	4.5	5	7	11	13
Par máximo	[Nm]	2.8	3.8	4.7	6.9	10.4	16.9

10 N ≈ 1 Kg

10 Nm ≈ 1Kg m

\*A tiempos altos de taladrado o velocidad excesiva de taladrado hay riesgo de quemar la punta broca, no consiguiendo por tanto taladrar el material.

TORNILLO	Ø ROSCA	ESPESOR A TALADRAR EN ACERO [mm]	
AUTO	5.5	4.0	12.0

Figura 29.- Parámetros de instalación de los tornillos AUTO

Como se verá más adelante (título de los ensayos de laboratorio), a partir de los resultados obtenidos en esos ensayos, se obtendrán unas comparaciones con sus respectivas conclusiones gracias a simulaciones numéricas.

### 4.2.1 Unión ortogonal viga-pilar

En esta unión se realizaron dos modelos diferentes. En el primer modelo el perfil 140x80x4 abraza al perfil 140x70x6 (Figura 30 y Figura 31) y en el segundo modelo el perfil 140x70x6 se ancla en el interior del perfil 140x80x4 (Figura 32 y Figura 33)

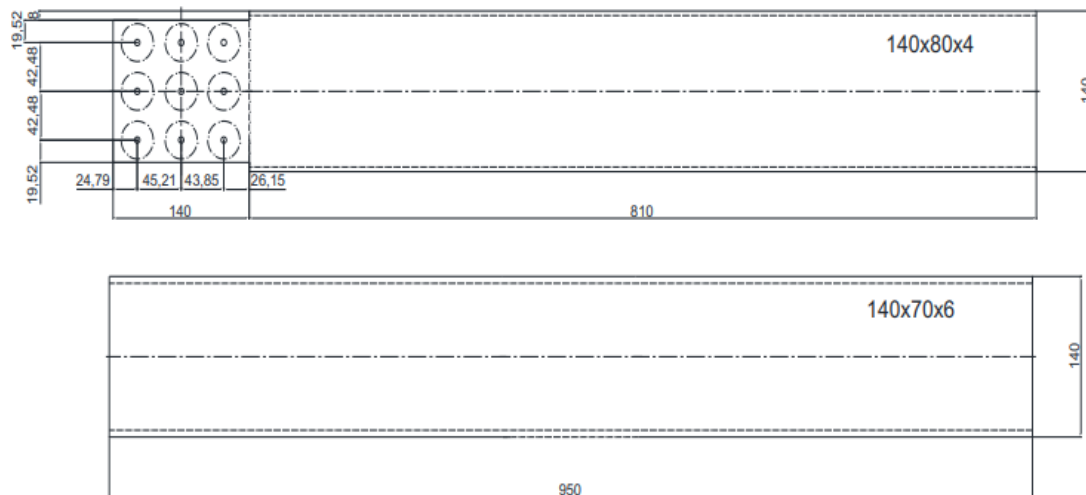


Figura 30.- Modelo 1 de la unión ortogonal viga-pilar



Figura 31.- Unión realizada en el laboratorio del modelo 1 de la unión viga-pilar

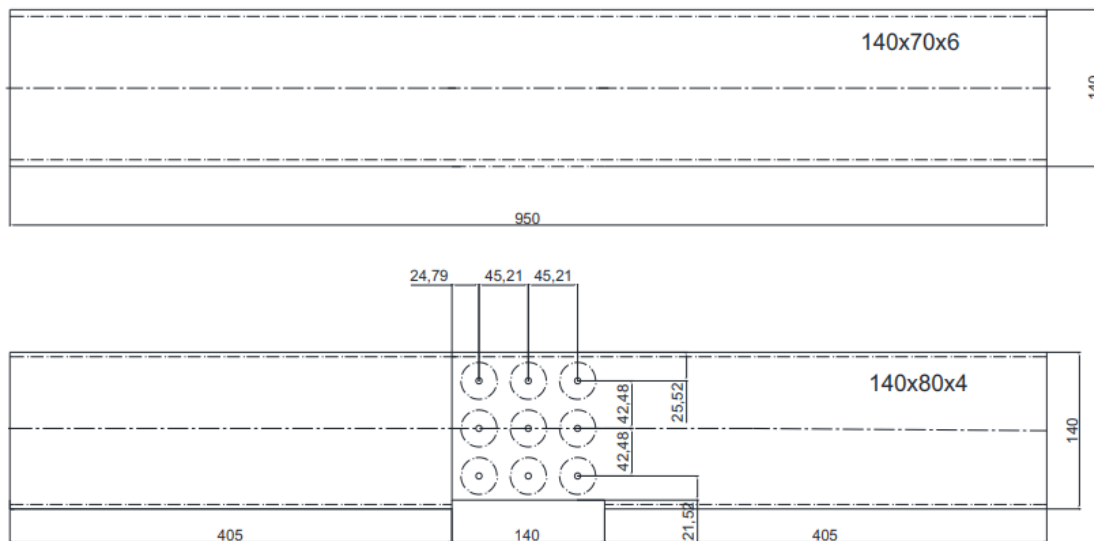


Figura 32.- Modelo 2 de la unión ortogonal viga-pilar



Figura 33.- Unión realizada en el laboratorio del modelo 2 de la unión viga-pilar

### 4.2.2 Unión de Cumbreira entre Dinteles

El diseño de esta unión se llevó a cabo pensando principalmente en adaptarlo a la máquina de ensayos de laboratorio. La unión entre los dos perfiles forma un ángulo de 150°, con este ángulo la distancia de los puntos de apoyo de la probeta y la altura de esta, serán los adecuados para poder llevar a cabo los ensayos en la respectiva máquina.

El esquema de la unión con su geometría se puede ver en la Figura 34:

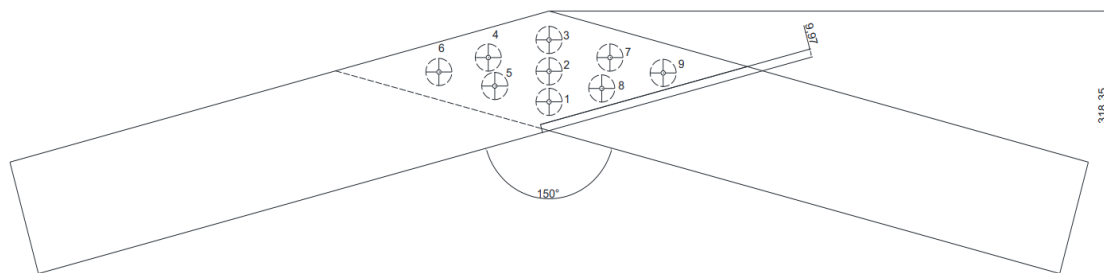


Figura 34.- Geometría de la unión de cumbreira entre dinteles

Los dos perfiles de la unión presentan geometrías distintas ya que se procedió a unir un perfil 140x80x4 con un perfil 140x70x6 (Figura 35):

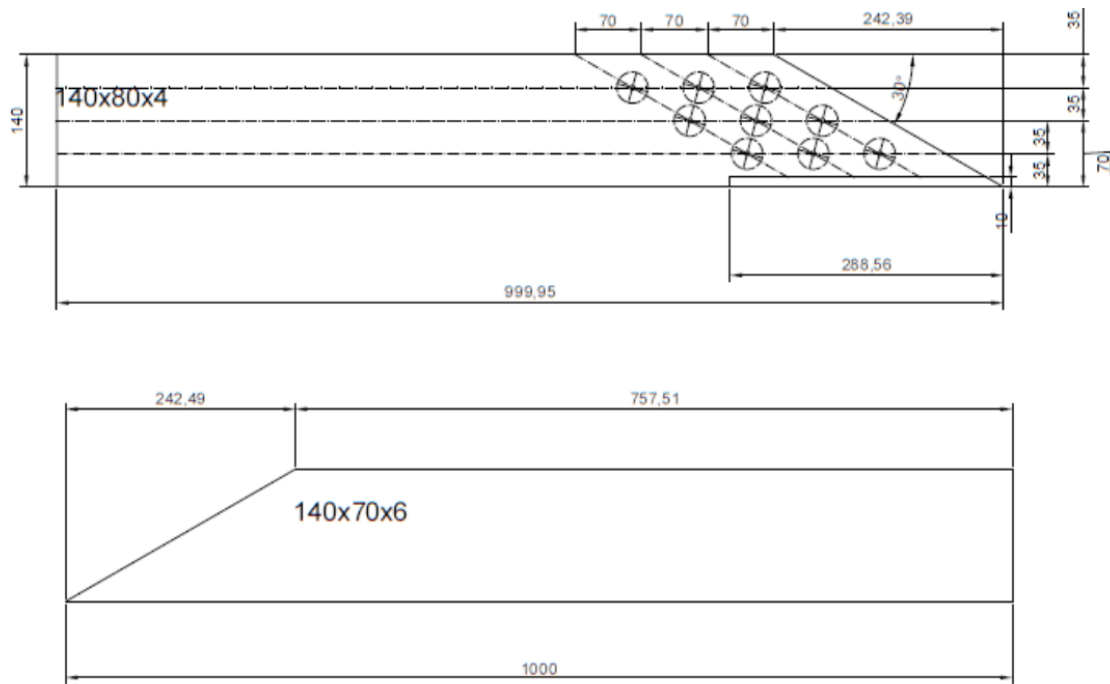


Figura 35.- Geometría de los perfiles de la unión de cumbrera entre dinteles

En los ensayos de laboratorio, uno de los modelos que se utilizaron se puede observar en Figura 36:



Figura 36.- Modelo utilizado en el laboratorio de la unión de cumbrera entre dinteles

### 4.3 Ensayos de laboratorio y Momentos resistentes

Para las diferentes uniones que se han presentado en los anteriores apartados del proyecto se realizaron una serie de ensayos de laboratorio por parte de un compañero de la universidad y en estos ensayos se establecieron unas condiciones de contorno que se van a desarrollar a continuación.

### 4.3.1 Unión ortogonal Viga-Pilar

Para la unión Viga-Pilar, el punto de rotación al aplicar una carga será el siguiente (Figura 37):

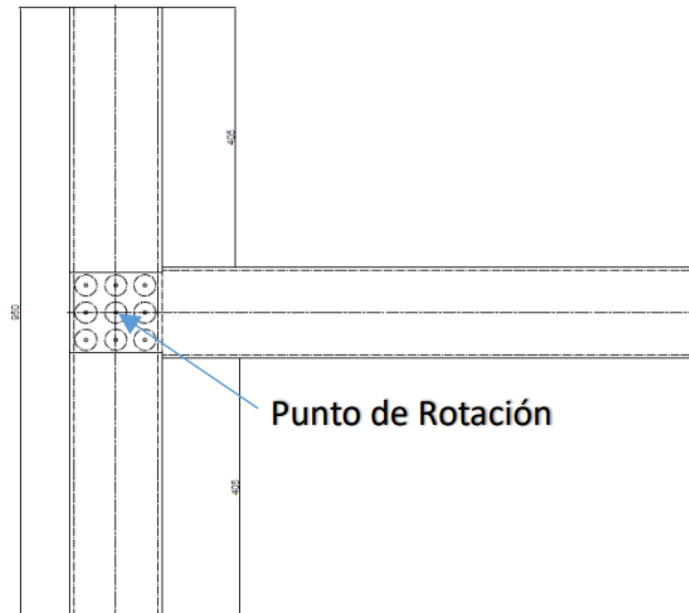


Figura 37.- Punto de rotación de la unión viga-pilar

Esto se debe a que la carga se va a aplicar en el extremo de la viga horizontal (ver Figura 38) y una vez que se representa este esquema de la unión, se midieron los valores de los radios y se aplican las fórmulas desarrolladas con anterioridad para sacar el momento resistente teórico de la unión.

Esta unión, al realizarse los ensayos de laboratorio, se debe fijar de alguna manera para poder aplicar la carga sobre ella. Se decidió utilizar un perfil HEB200 para enganchar la probeta a una de las paredes de la máquina de ensayo (Figura 38). Esto es debido ya que la máquina de ensayos distribuirá las reacciones verticales a lo largo de los perfiles sin que estos terminen desplazándose o separándose del suelo.



Además, por la parte superior también hay una sujeción (Figura 38) para que la carga no empuje la probeta hacia adelante por efecto del giro.

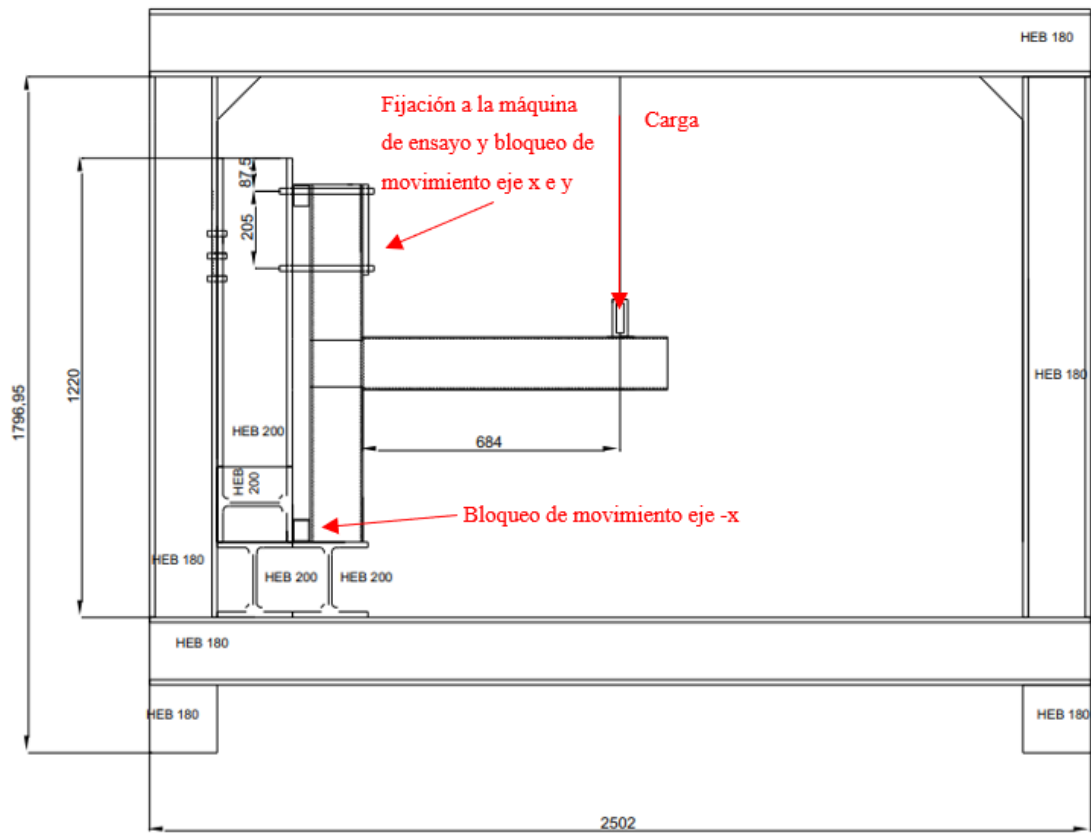


Figura 38.- Fijación unión viga-pilar a la máquina de ensayos

### 4.3.2 Unión de cumbrera entre dinteles

Para la unión de cumbrera entre dinteles el punto de rotación al aplicar la carga será el que se muestra en la Figura 39:

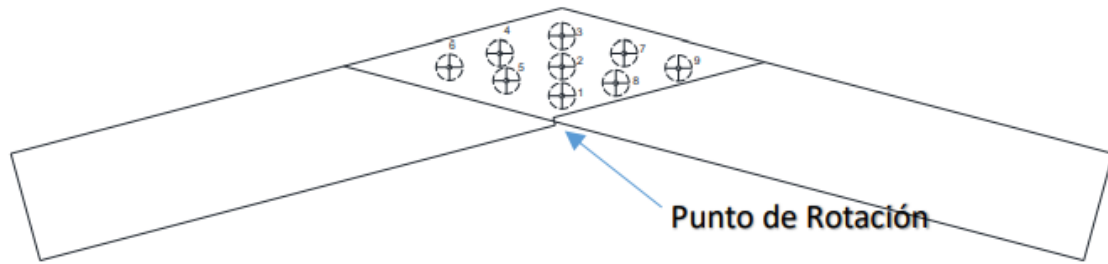


Figura 39.- Punto de rotación de la unión de cumbrera entre dinteles

En los ensayos de laboratorio se utilizó una máquina MTS, la cual va a ejercer una fuerza vertical desde arriba mediante un pistón que desciende. En este caso, al igual que anteriormente, va a haber dos puntos de apoyo, pero en posiciones diferentes. Estos puntos de apoyo de la carga han de estar separados del centro de la unión 685 mm, por lo que se requiere del diseño de un anclaje especial que sea capaz de transmitir esos esfuerzos a la distancia anteriormente mencionada.

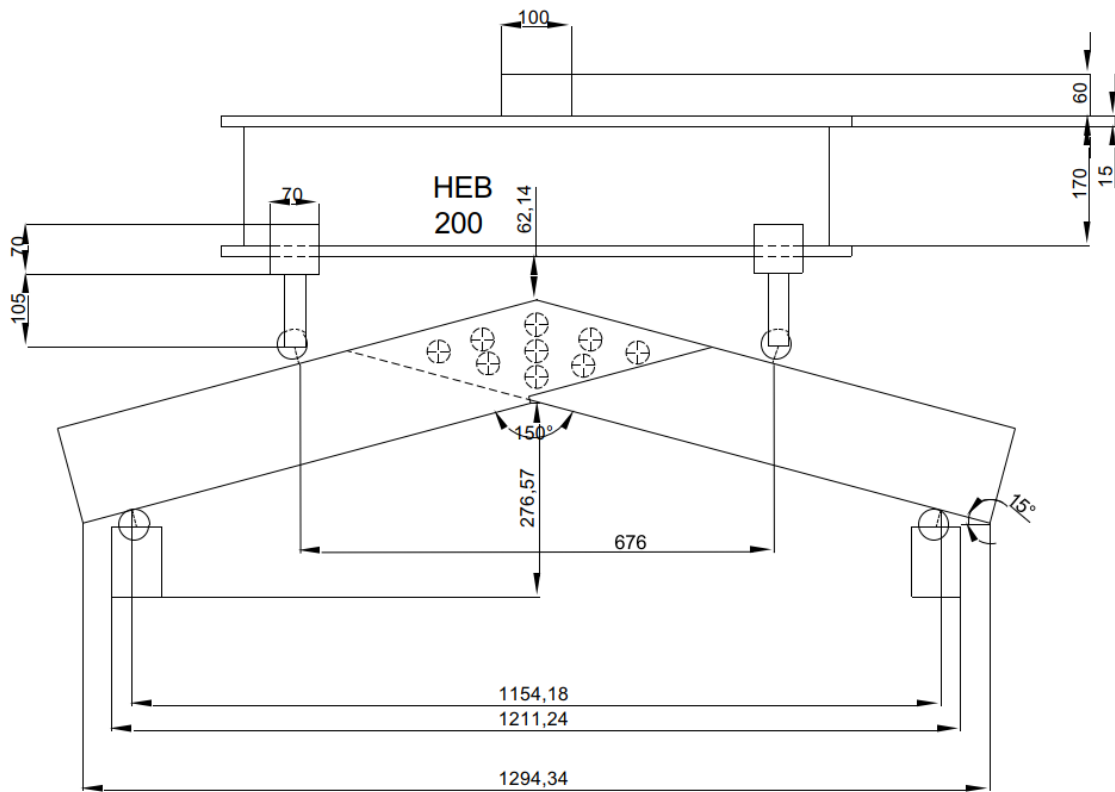


Figura 40.- Fijación y cargas aplicadas a la unión de cumbrera entre dinteles

Además, se ha de tener en cuenta el punto de contacto entre los perfiles y los apoyos; la altura entre la punta de la cumbrera y el anclaje tiene que ser lo suficiente como para que una vez se produzca la carga, se puedan observar deformaciones sin que estas produzcan un contacto entre la cumbrera y el anclaje.

## 5 Desarrollo del proyecto en ANSYS

### 5.1 Introducción

La simulación y el análisis del comportamiento de las uniones en estructuras son fundamentales para garantizar la seguridad y el rendimiento en la ingeniería estructural. En este proyecto, se utilizó el software ANSYS en su modo Structural para modelar, mallar, establecer condiciones de contorno y simular tres modelos diferentes de uniones estructurales. El objetivo principal fue lograr una representación realista de estas uniones, utilizando como base los resultados obtenidos en ensayos de laboratorio previos. ANSYS es reconocido mundialmente por su potencia y versatilidad en el análisis estructural. Permite simular y analizar comportamientos complejos con alta precisión, convirtiéndose en una herramienta esencial para este tipo de estudios de estructuras. Su amplia gama de características y funcionalidades permite abordar problemas de ingeniería de manera efectiva y eficiente.

En este proyecto, se comenzó con el modelado de las uniones estructurales, considerando aspectos clave como la geometría de las piezas, los materiales utilizados y los métodos de unión empleados en los ensayos de laboratorio. La precisión en la representación de estos elementos fue fundamental para garantizar la fiabilidad de los resultados obtenidos en las simulaciones.

Posteriormente, se generó la malla, un paso crítico para asegurar una simulación numérica precisa. La calidad de la malla influye directamente en la precisión y eficiencia del análisis estructural. Se aplicaron técnicas de mallado adecuadas a cada modelo de unión, considerando la complejidad de las geometrías y los posibles efectos locales en las zonas críticas de tensión.

Una vez finalizada la etapa de mallado, se establecieron las condiciones de contorno pertinentes en cada modelo. Estas condiciones incluyeron restricciones, cargas y desplazamientos para simular las condiciones reales a las que se someten las uniones en una estructura. La correcta definición de estas condiciones garantizó la representación

precisa del comportamiento de las uniones en respuesta a las fuerzas y solicitaciones externas.

Finalmente, se llevó a cabo la simulación de los tres modelos de uniones estructurales utilizando este software. Los resultados obtenidos en esta etapa se compararon con los datos experimentales previamente recopilados en los ensayos de laboratorio. La concordancia entre los resultados de las simulaciones y los resultados experimentales validó la precisión y confiabilidad del modelo numérico implementado.

## **5.2 Unión ortogonal Viga-Pilar modelo 1**

### **5.2.1 Modelado**

En el modelo 1 de la unión ortogonal Viga-Pilar se realizó una parametrización de la geometría (Figura 41) ya que esto proporciona flexibilidad en el diseño, facilita análisis paramétricos, permite la optimización y facilita el estudio de sensibilidad en el comportamiento estructural. Al utilizar variables paramétricas en lugar de dimensiones fijas, se puede ahorrar tiempo, explorar múltiples configuraciones y tomar decisiones informadas para mejorar el diseño y el rendimiento de sus estructuras.

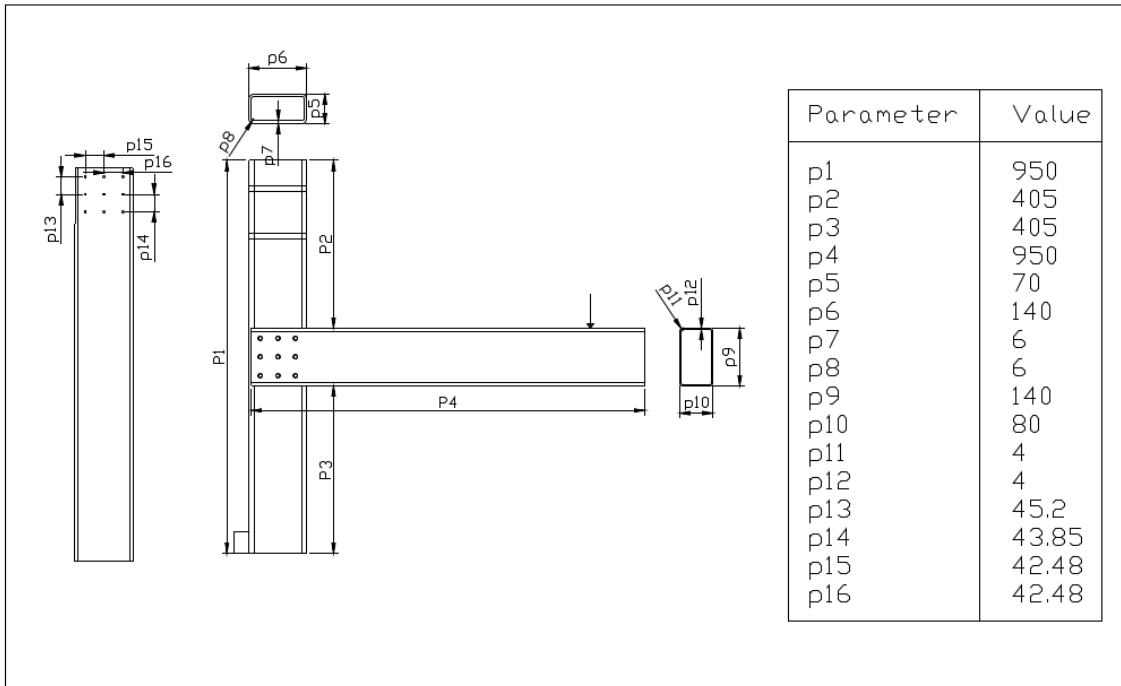


Figura 41.- Parámetros del modelo 1 de la unión ortogonal viga-pilar

De esta forma se obtienen las distintas geometrías:

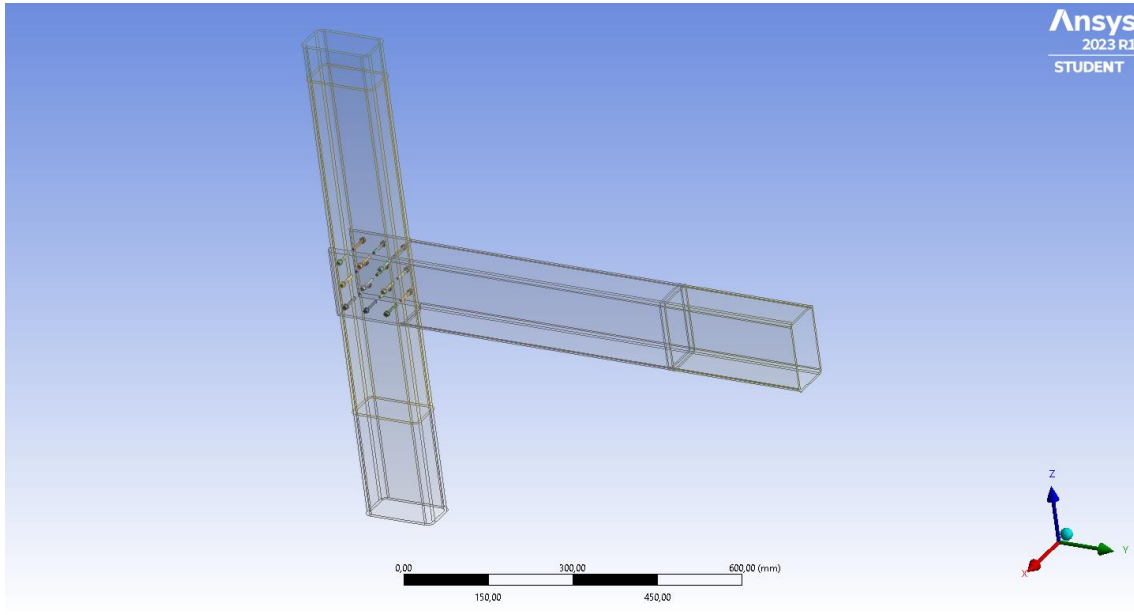


Figura 42.- Vista general del modelo 1 de la unión ortogonal Viga-Pilar

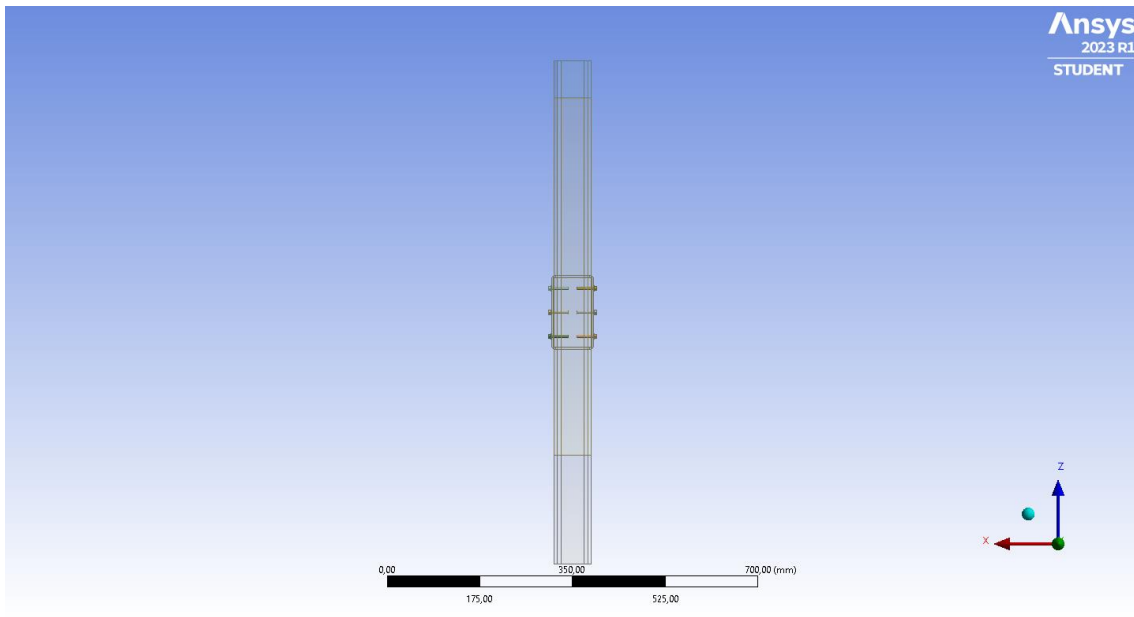


Figura 43.- Vista frontal del modelo 1 de la unión ortogonal Viga-Pilar

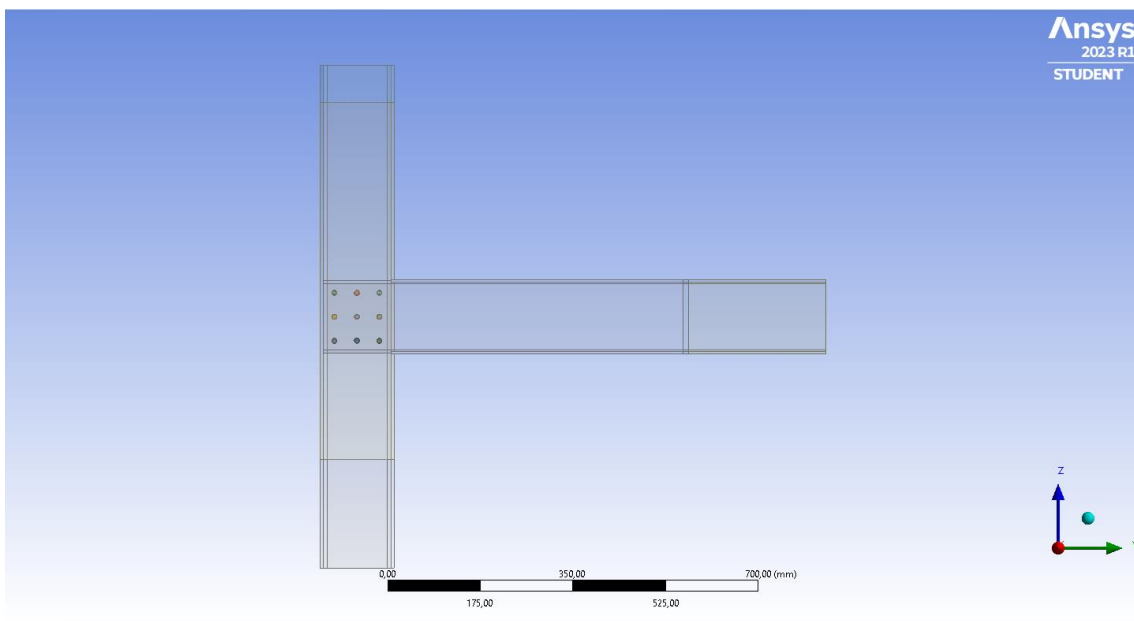


Figura 44.- Vista lateral del modelo 1 de la unión ortogonal Viga-Pilar

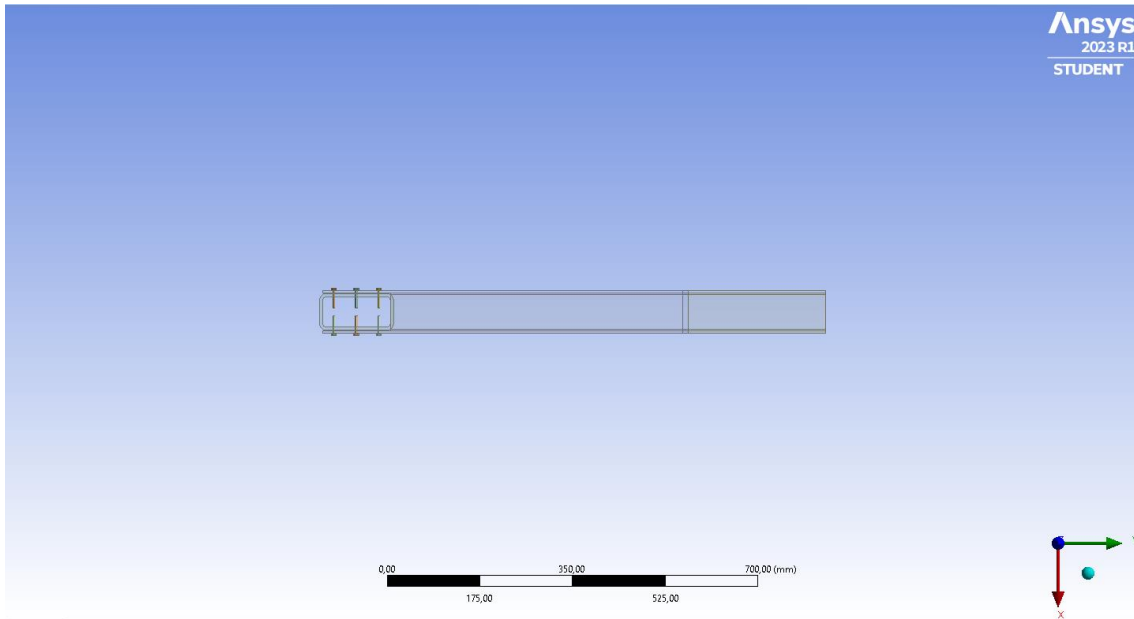


Figura 45.- Vista superior del modelo 1 de la unión ortogonal Viga-Pilar

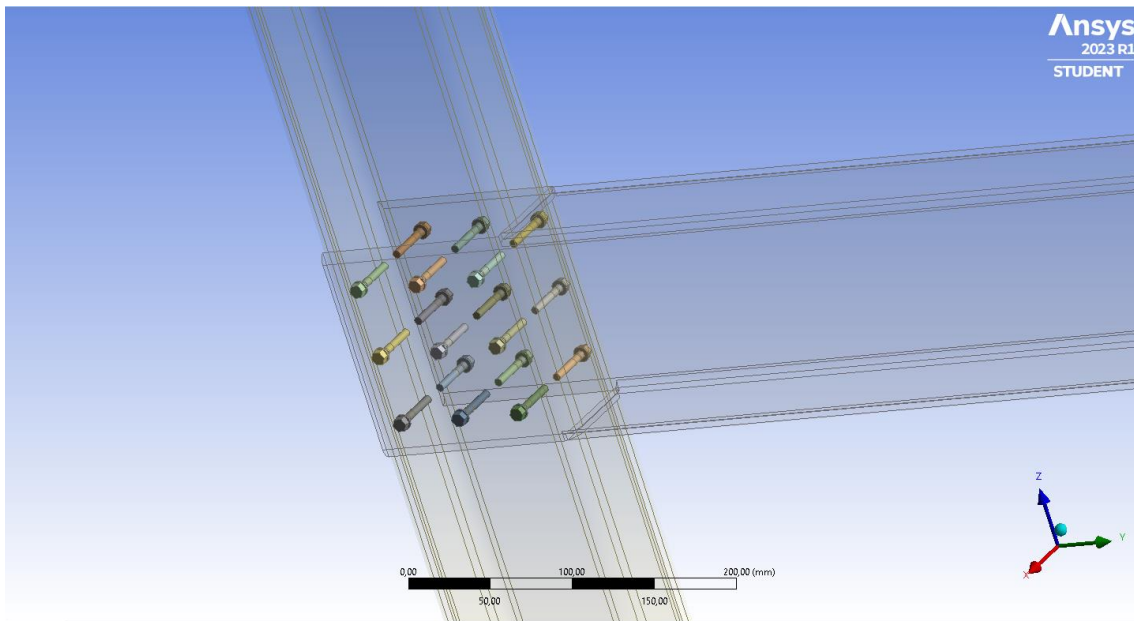


Figura 46.- Vista detallada del modelo 1 de la unión ortogonal Viga-Pilar



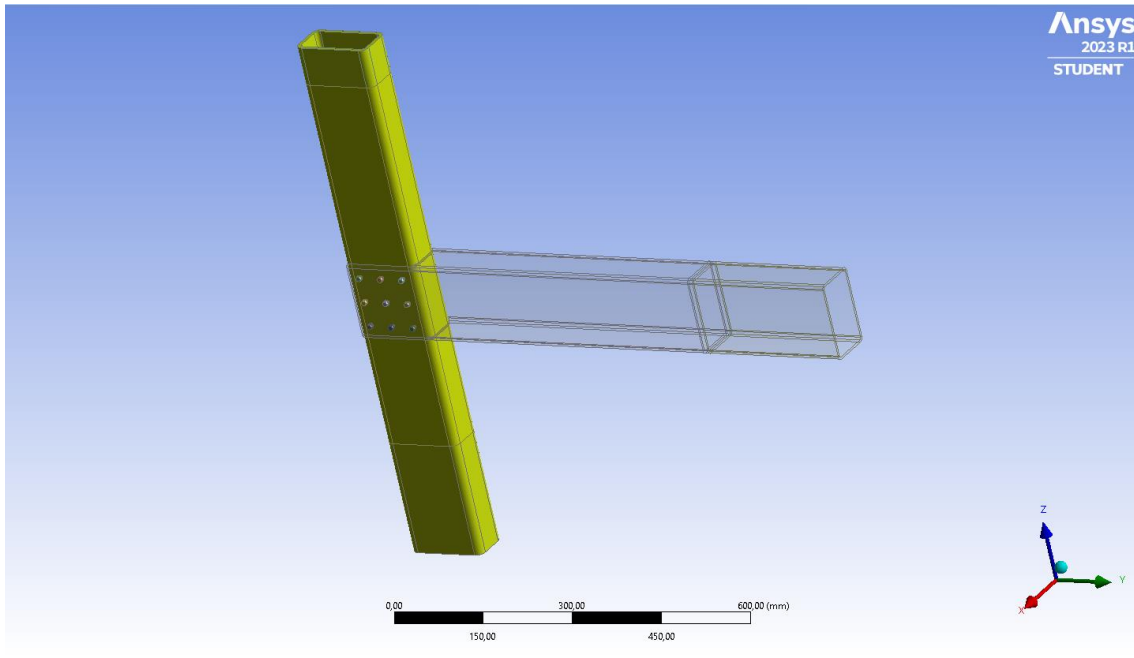


Figura 47.- Perfil 140x70x6 del modelo 1 de la unión ortogonal Viga-Pilar

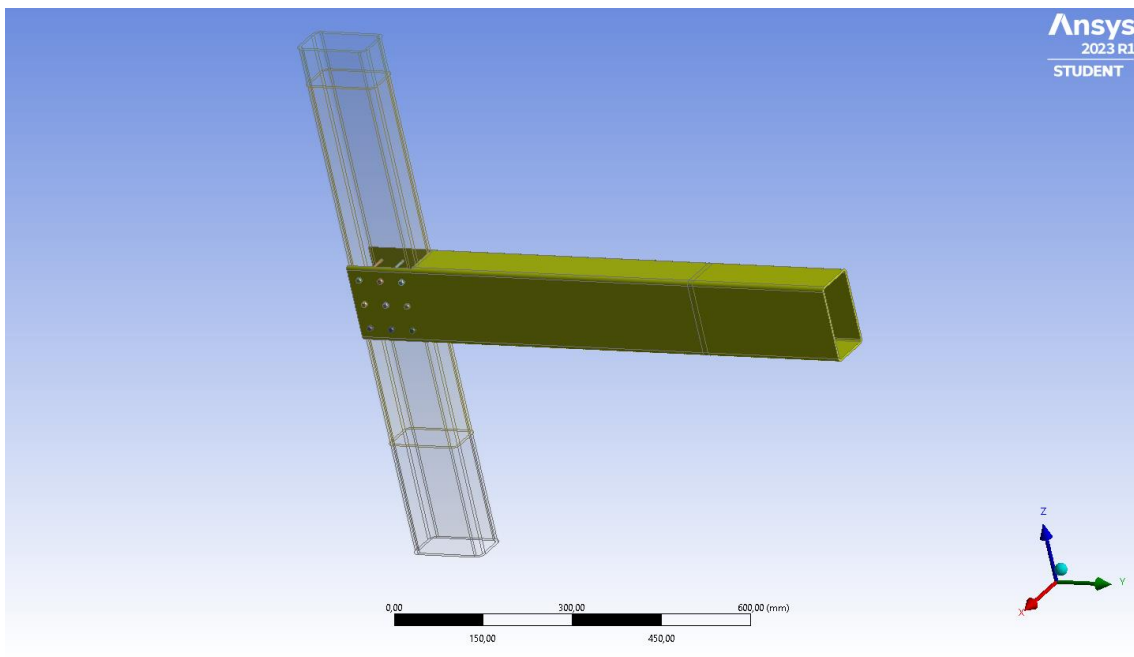


Figura 48.- Perfil 140x80x4 del modelo 1 de la unión ortogonal Viga-Pilar

### 5.2.2 Propiedades físicas

En esta unión las propiedades del material que se utilizaron fueron las que se pueden ver en (Tabla 3) Además hay que tener en cuenta que los datos de los materiales introducidos en el ANSYS son estos pero pasados a tensiones y deformaciones reales, ya que el ensayo nos da tensiones y deformaciones ingenieriles. Las fórmulas de transformación de deformaciones y tensiones ingenieriles a reales son las siguientes:

$$\varepsilon_{real} = Ln(\varepsilon_{ingenieril} + 1)$$

$$\sigma_{real} = \sigma_{ingenieril}(\varepsilon_{ingenieril} + 1)$$

Tabla 3.- Propiedades del modelo 1 de la unión ortogonal Viga-Pilar

Propiedad	Valor	Unidad
Densidad	7850	kg /m3
Módulo de Young	200000	Mpa
Módulo de compresión	166667	
Módulo cortante	76923	Mpa
Módulo tangente	2100	Mpa
Límite elástico	275	Mpa
Coefficiente de Poisson	0,3	Mpa

Con estos datos se obtiene la curva de comportamiento angular del modelo 1 (Figura 49)

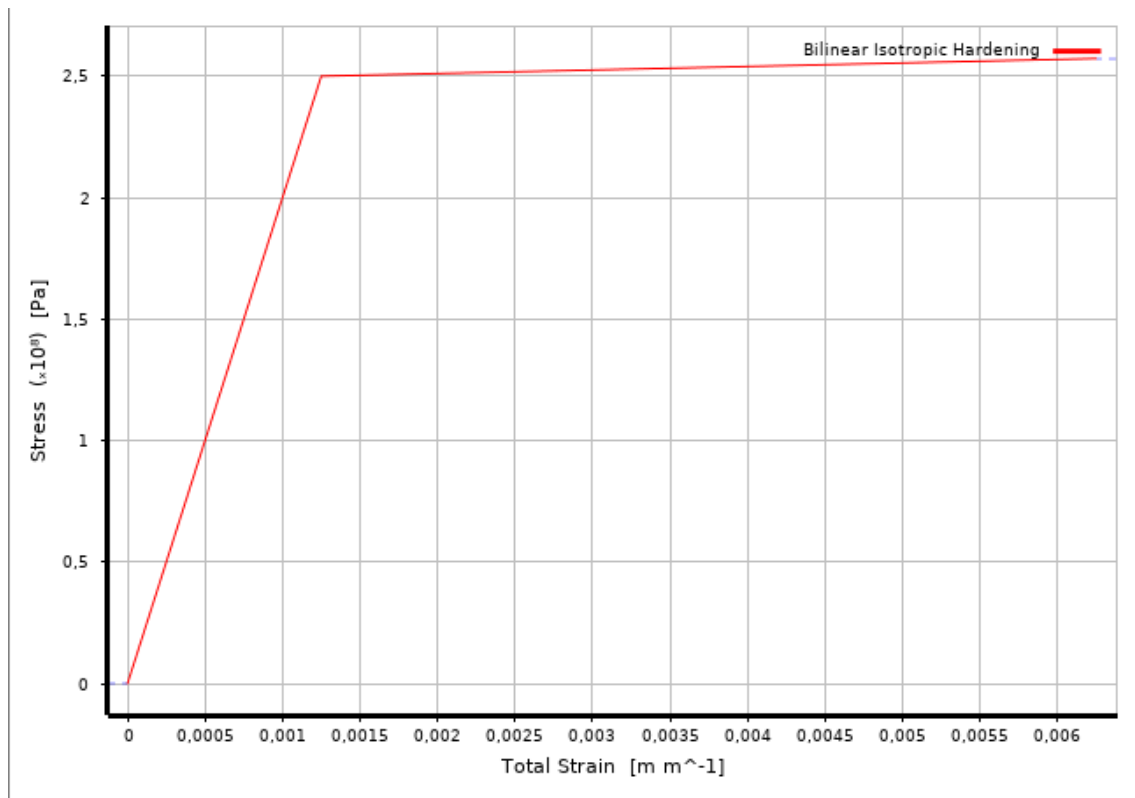


Figura 49.- Curva de comportamiento angular del modelo 1 de la unión ortogonal Viga-Pilar

### 5.2.3 Mallado

Una vez determinado el modelo geométrico y las condiciones del material, se procede al mallado.

El mallado, también conocido como discretización, es un paso fundamental en el análisis de una unión estructural en ANSYS. Consiste en dividir la geometría de la unión en elementos más pequeños llamados elementos finitos para permitir el cálculo y análisis numérico de las propiedades estructurales. Esto implica la creación de una red de elementos finitos que cubra toda la geometría de la unión. El software proporciona herramientas automáticas y manuales para generar el mallado, permitiendo adaptar la malla a las características específicas de la unión.

Después de generar el mallado, es importante realizar una verificación de calidad para asegurarse de que la malla es adecuada. Esto implica comprobar aspectos como la conexión adecuada entre elementos, la distorsión excesiva de los elementos, la adecuada resolución de las características geométricas y la adecuada representación de las interfaces de la unión.

En este caso, se diferenciaron diferentes geometrías de mallado dentro de la geometría principal como se puede observar en la Figura 50 y Figura 51. Esto es debido a la complejidad de la unión, donde los angulares y las zonas del pilar y la viga adyacentes a estas forman la parte crítica de la unión.

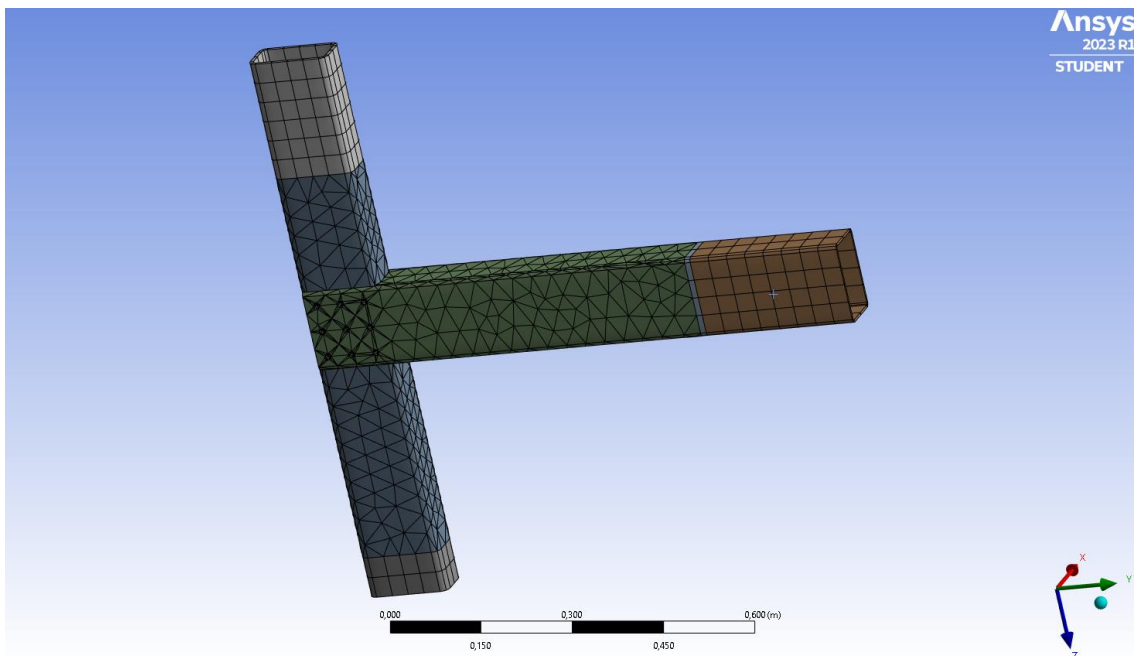


Figura 50.- Vista general del mallado del modelo 1 de la unión ortogonal Viga-Pilar

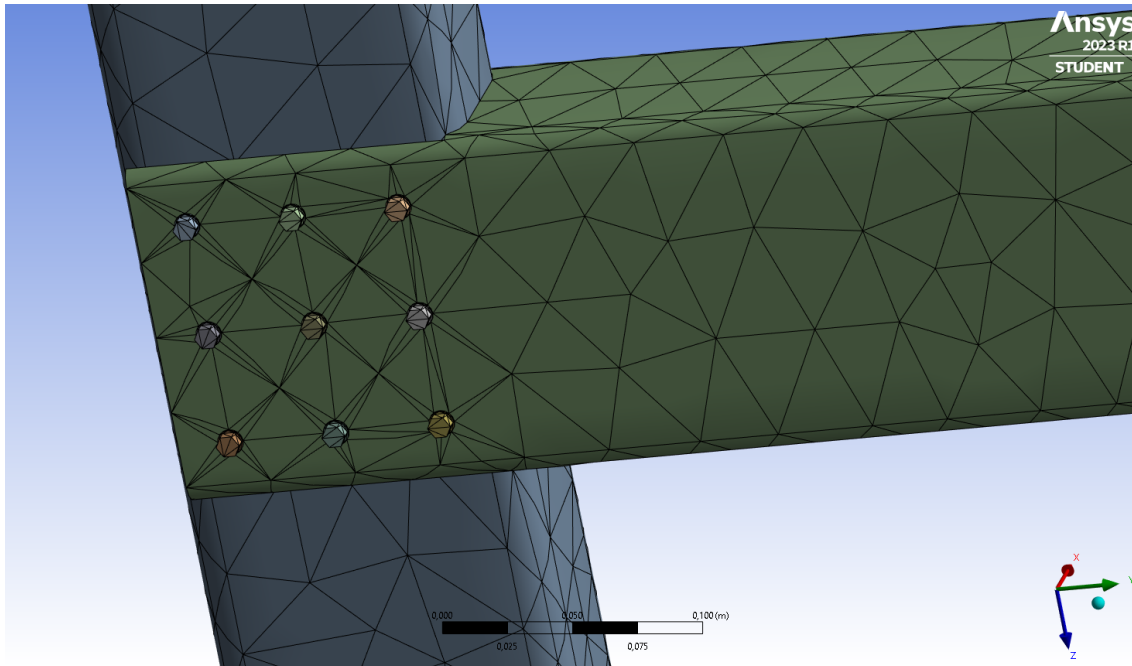


Figura 51.- Vista detallada del mallado del modelo 1 de la unión ortogonal Viga-Pilar

En total, se generaron 22371 nodos y 9474 elementos.

#### 5.2.4 Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno en esta unión se refieren a las restricciones y cargas que se aplican en los puntos de contacto entre ambas estructuras para simular las condiciones reales a las que están sometidas en la realidad. Estas condiciones de contorno son esenciales para obtener resultados precisos en el análisis estructural y evaluar el comportamiento de la unión.

En el modelo 1 de la unión ortogonal Viga-Pilar se establecieron 4 condiciones de contorno (Figura 52): Un apoyo fijo en la parte superior (A), una fijación en el desplazamiento (B), una carga de 20000N en C y una fijación en D debido a los tornillos. Estas condiciones se basaron en las desarrolladas en el título: 4.3.1 Unión ortogonal Viga-Pilar.

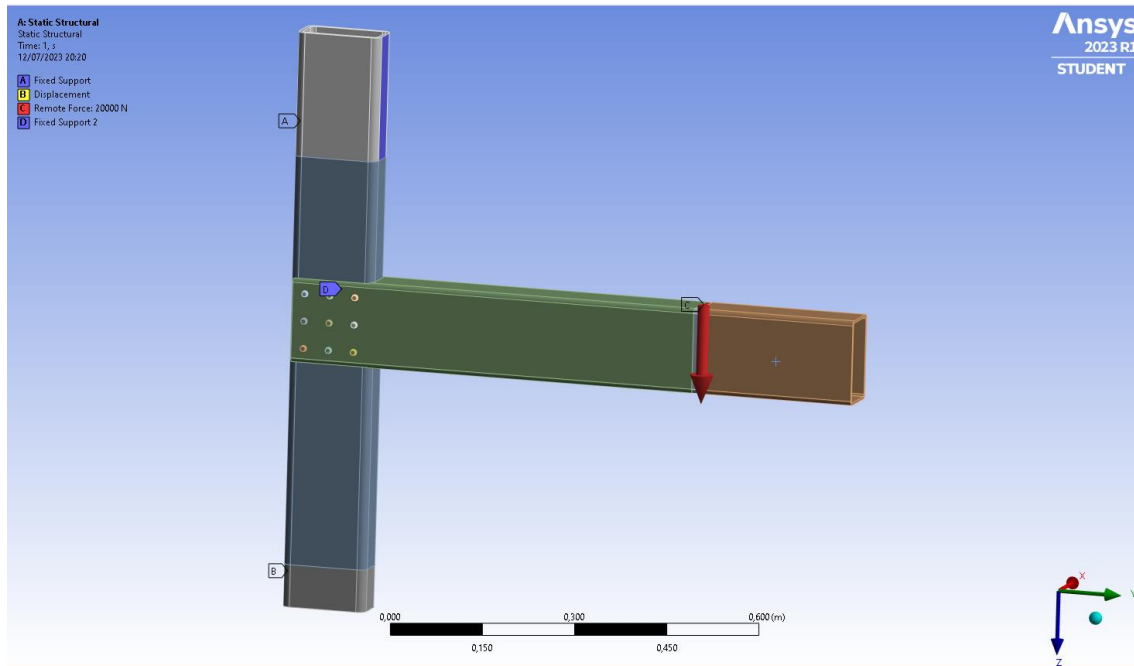


Figura 52.- Condiciones de contorno del modelo 1 de la unión ortogonal Viga-Pilar

## 5.3 Unión ortogonal Viga-Pilar modelo 2

### 5.3.1 Modelado

En el modelo 2 de la unión ortogonal Viga-Pilar se realizó una parametrización de la geometría (Figura 53) ya que esto proporciona flexibilidad en el diseño, facilita análisis paramétricos, permite la optimización y facilita el estudio de sensibilidad en el comportamiento estructural. Al utilizar variables paramétricas en lugar de dimensiones fijas, se puede ahorrar tiempo, explorar múltiples configuraciones y tomar decisiones informadas para mejorar el diseño y el rendimiento de sus estructuras.

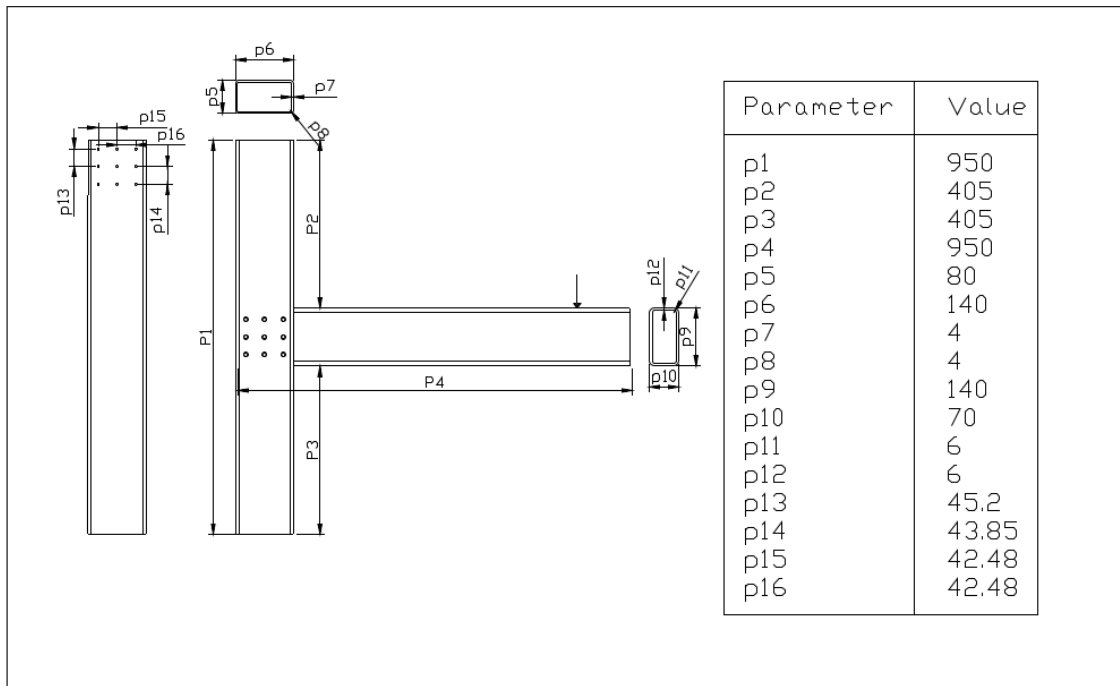


Figura 53.- Parámetros del modelo 2 de la unión ortogonal viga-pilar

De esta forma se obtienen las distintas geometrías:

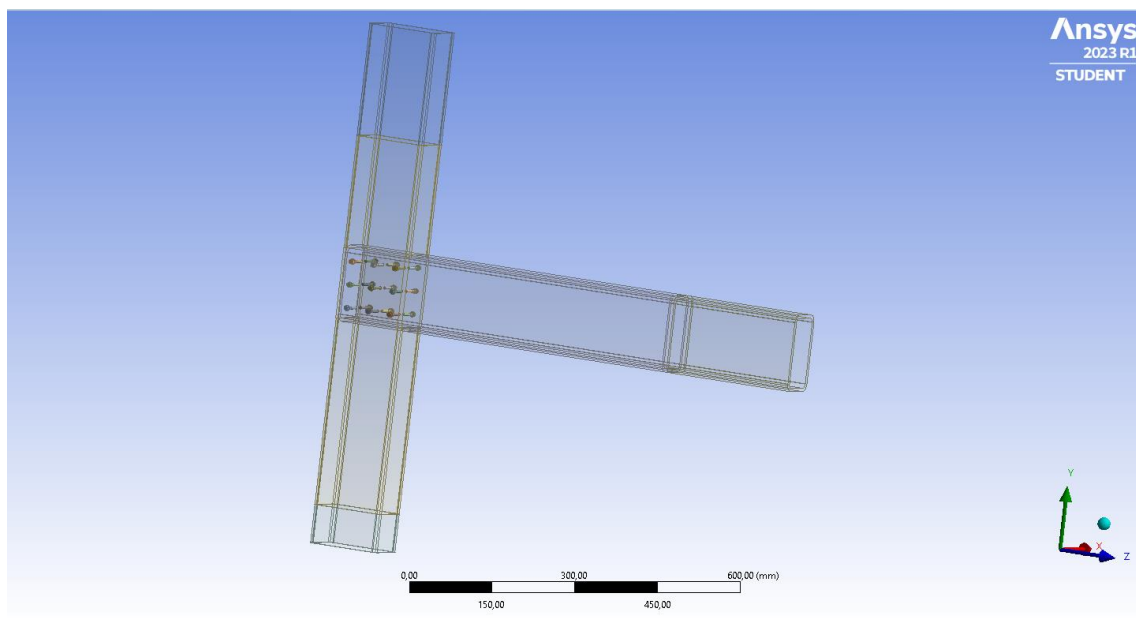


Figura 54.- Vista general del modelo 2 de la unión ortogonal Viga-Pilar

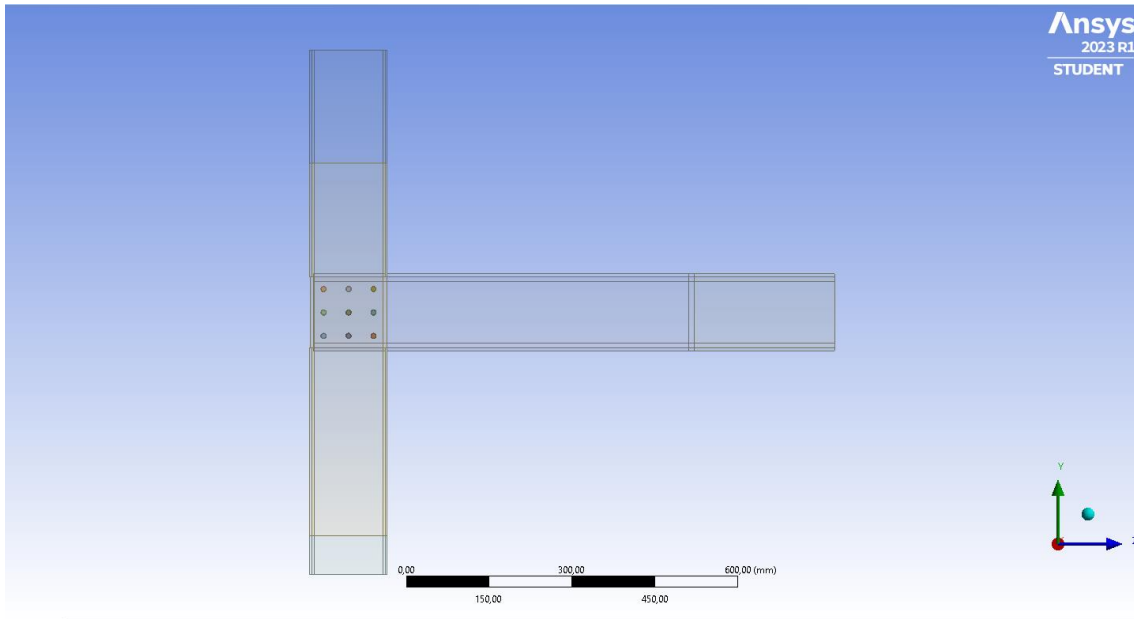


Figura 55.- Vista lateral del modelo 2 de la unión ortogonal Viga-Pilar

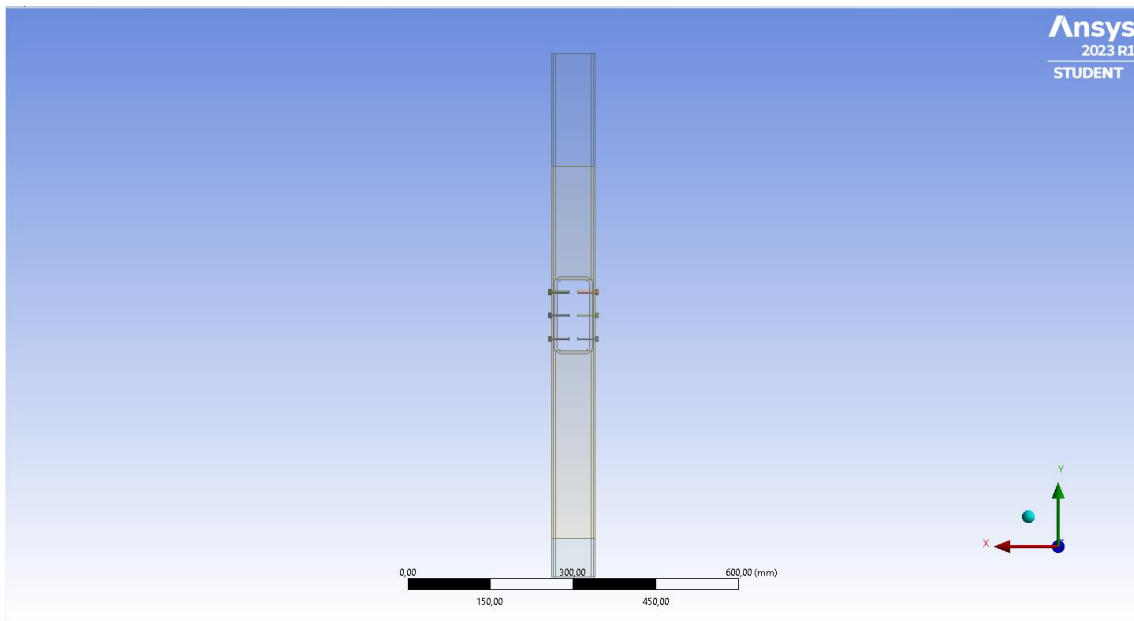


Figura 56.- Vista frontal del modelo 2 de la unión ortogonal Viga-Pilar



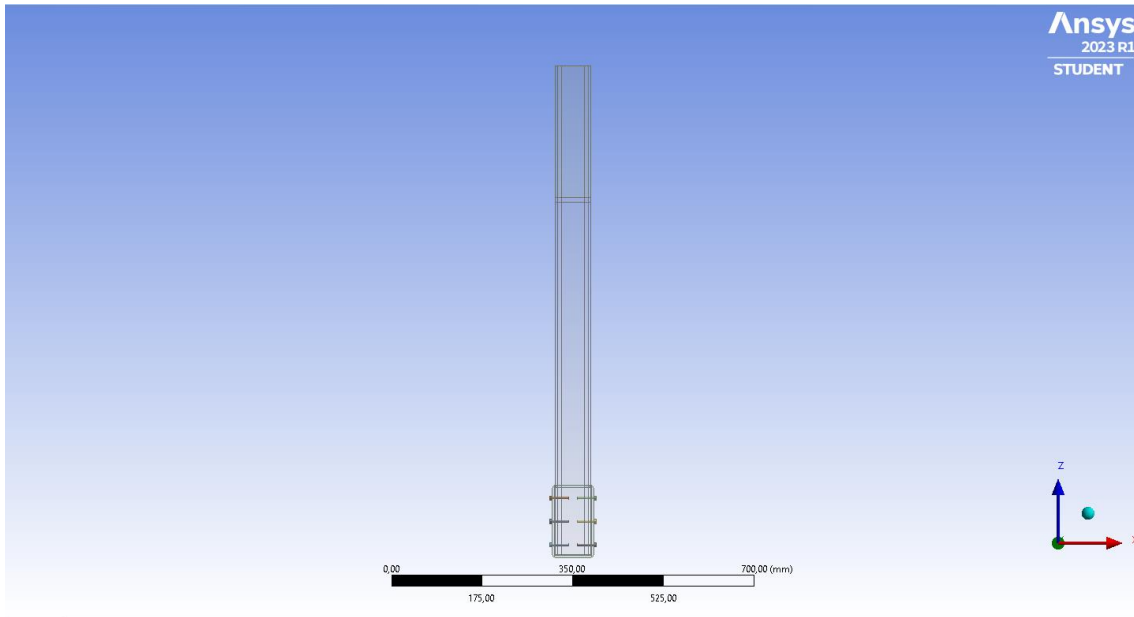


Figura 57.- Vista superior del modelo 2 de la unión ortogonal Viga-Pilar

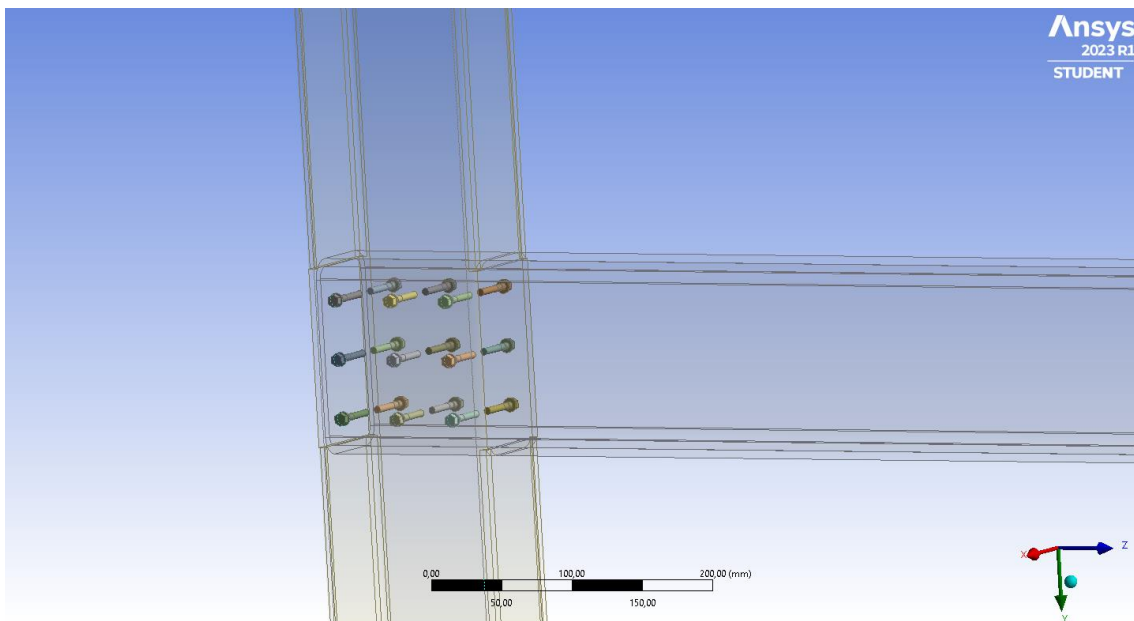


Figura 58.- Vista detallada del modelo 2 de la unión ortogonal Viga-Pilar

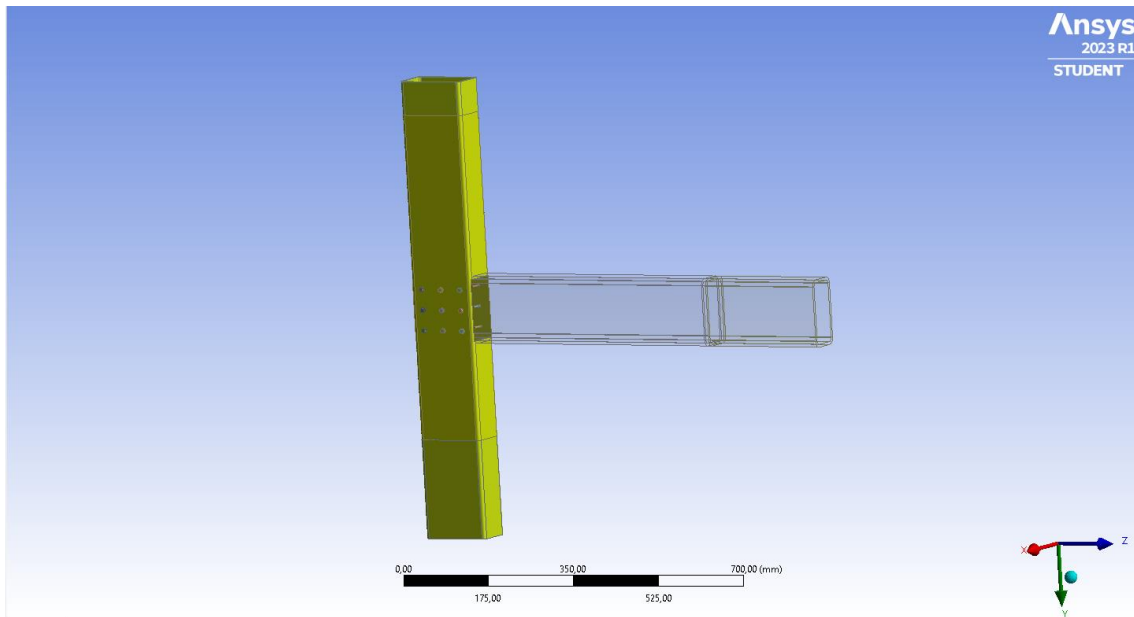


Figura 59.- Perfil 140x80x4 del modelo 2 de la unión ortogonal Viga-Pilar

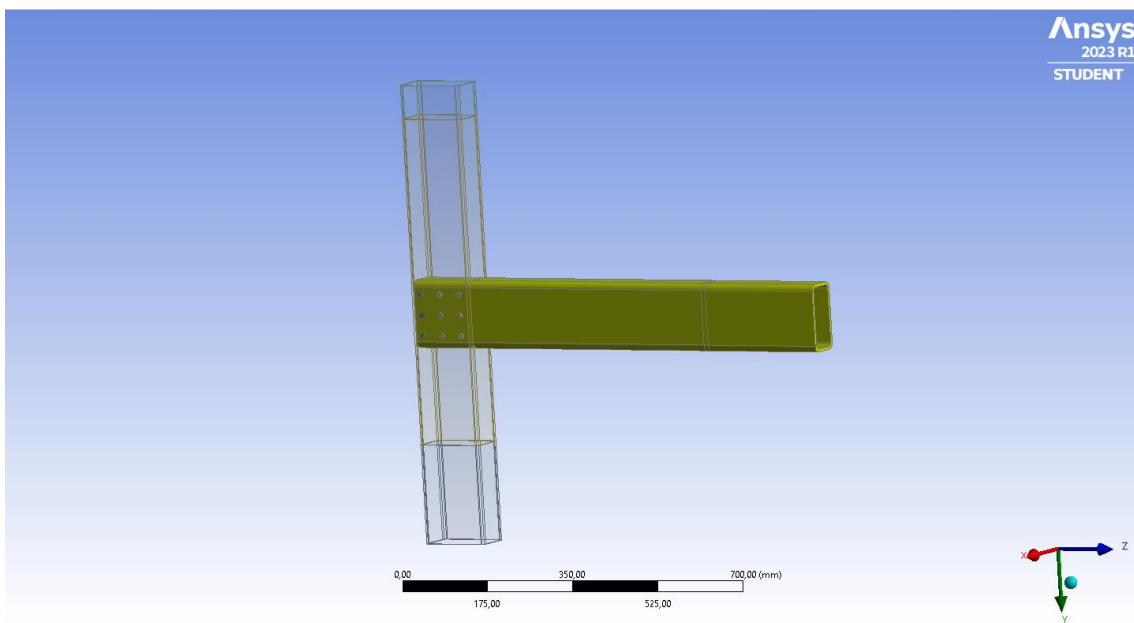


Figura 60.- Perfil 140x70x6 del modelo 2 de la unión ortogonal Viga-Pilar

### 5.3.2 Propiedades físicas

En esta unión las propiedades del material que se utilizaron fueron las que se pueden ver en la siguiente tabla. Además, hay que tener en cuenta que los datos de los materiales introducidos en el ANSYS son estos, pero pasados a tensiones y deformaciones reales, ya que el ensayo nos da tensiones y deformaciones ingenieriles. Las fórmulas de transformación de deformaciones y tensiones ingenieriles a reales son las siguientes:

$$\varepsilon_{\text{real}} = \ln(\varepsilon_{\text{ingenieril}} + 1)$$

$$\sigma_{\text{real}} = \sigma_{\text{ingenieril}} (\varepsilon_{\text{ingenieril}} + 1)$$

Propiedad	Valor	Unidad
Densidad	7850	kg /m <sup>3</sup>
Módulo de Young	200000	Mpa
Módulo de compresión	166667	
Módulo cortante	76923	Mpa
Módulo tangente	2100	Mpa
Límite elástico	275	Mpa
Coefficiente de Poisson	0,3	Mpa

Con estos datos se obtiene la curva de comportamiento angular del modelo 2 (Figura 61)

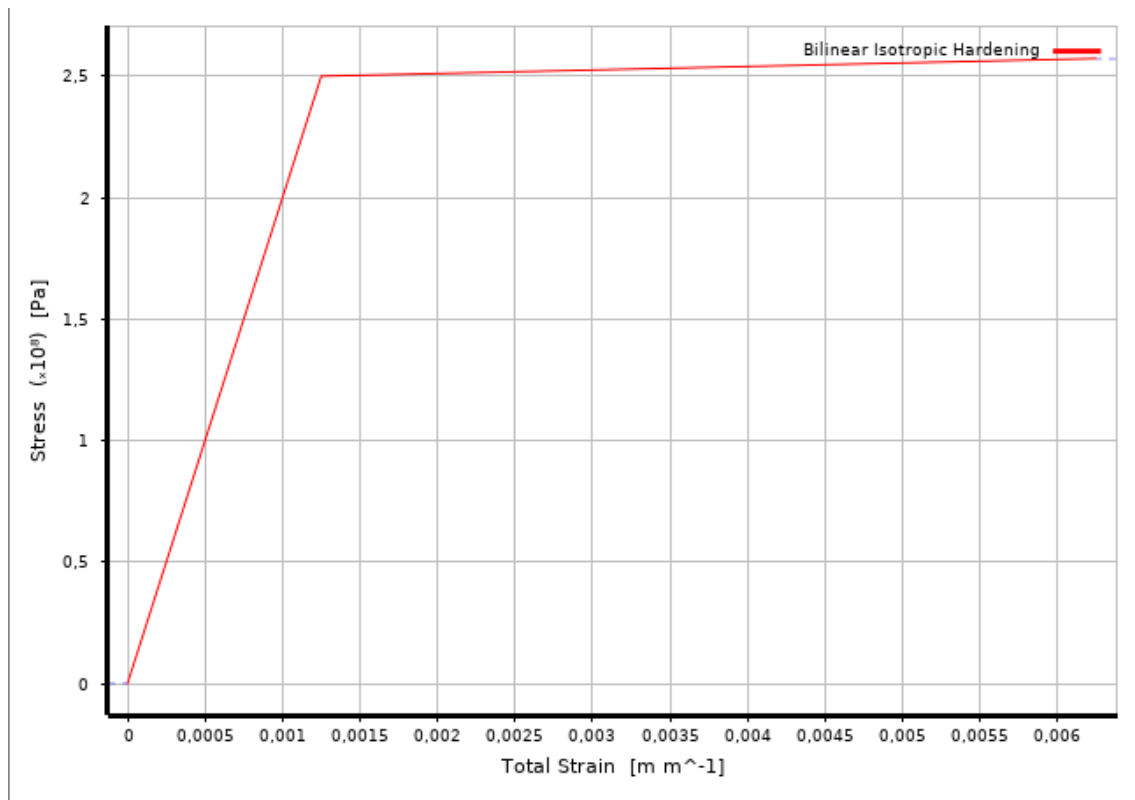


Figura 61.- Curva de comportamiento angular del modelo 2 de la unión ortogonal Viga-Pilar

### 5.3.3 Mallado

Una vez determinado el modelo geométrico y las condiciones del material, se procede al mallado.

El mallado, también conocido como discretización, es un paso fundamental en el análisis de una unión estructural en ANSYS. Consiste en dividir la geometría de la unión en elementos más pequeños llamados elementos finitos para permitir el cálculo y análisis numérico de las propiedades estructurales. Esto implica la creación de una red de elementos finitos que cubra toda la geometría de la unión. El software proporciona herramientas automáticas y manuales para generar el mallado, permitiendo adaptar la malla a las características específicas de la unión.

Después de generar el mallado, es importante realizar una verificación de calidad para asegurarse de que la malla es adecuada. Esto implica comprobar aspectos como la conexión adecuada entre elementos, la distorsión excesiva de los elementos, la adecuada resolución de las características geométricas y la adecuada representación de las interfaces de la unión.

En este caso, se diferenciaron diferentes geometrías de mallado dentro de la geometría principal como se puede observar en la Figura 62 y Figura 63. Esto es debido a la complejidad de la unión, donde los angulares y las zonas del pilar y la viga adyacentes a estas forman la parte crítica de la unión.

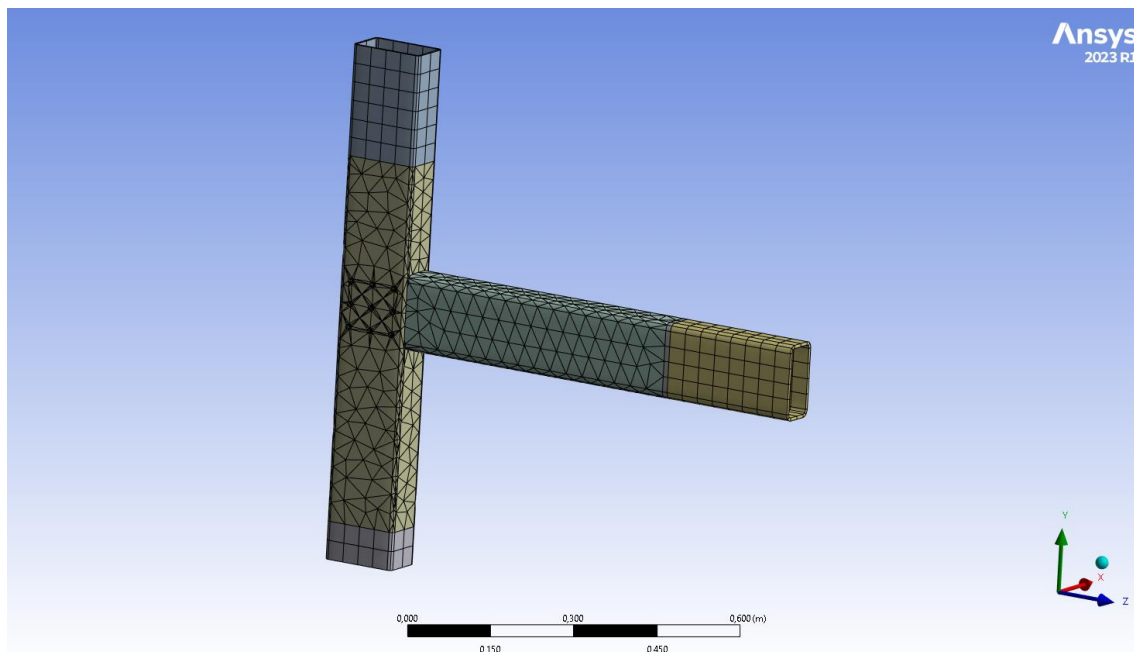


Figura 62.- Vista general del mallado del modelo 2 de la unión ortogonal Viga-Pilar

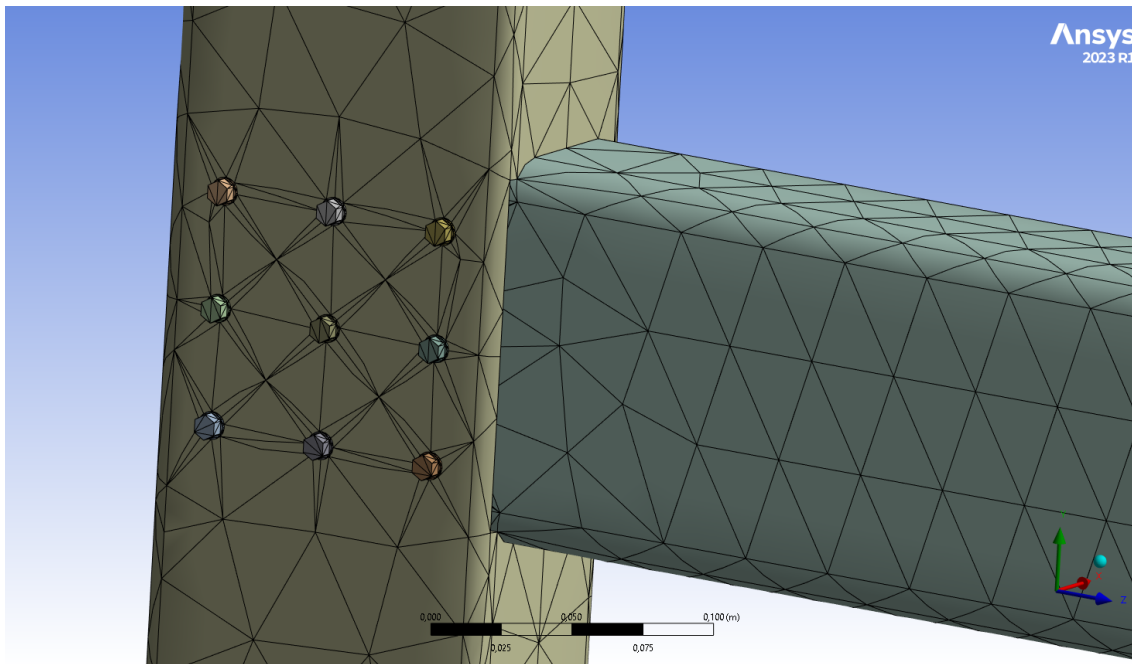


Figura 63.- Vista detallada del mallado del modelo 2 de la unión ortogonal Viga-Pilar

### 5.3.4 Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno en esta unión se refieren a las restricciones y cargas que se aplican en los puntos de contacto entre ambas estructuras para simular las condiciones reales a las que están sometidas en la realidad. Estas condiciones de contorno son esenciales para obtener resultados precisos en el análisis estructural y evaluar el comportamiento de la unión.

En el modelo 2 de la unión ortogonal Viga-Pilar se establecieron 4 condiciones de contorno (Figura 64): Un apoyo fijo en la parte superior (A), una fijación en el desplazamiento (B), una carga de 40000N en C y una fijación en D debido a los tornillos. Estas condiciones se basaron en las desarrolladas en el título: 4.3.1 Unión ortogonal Viga-Pilar.

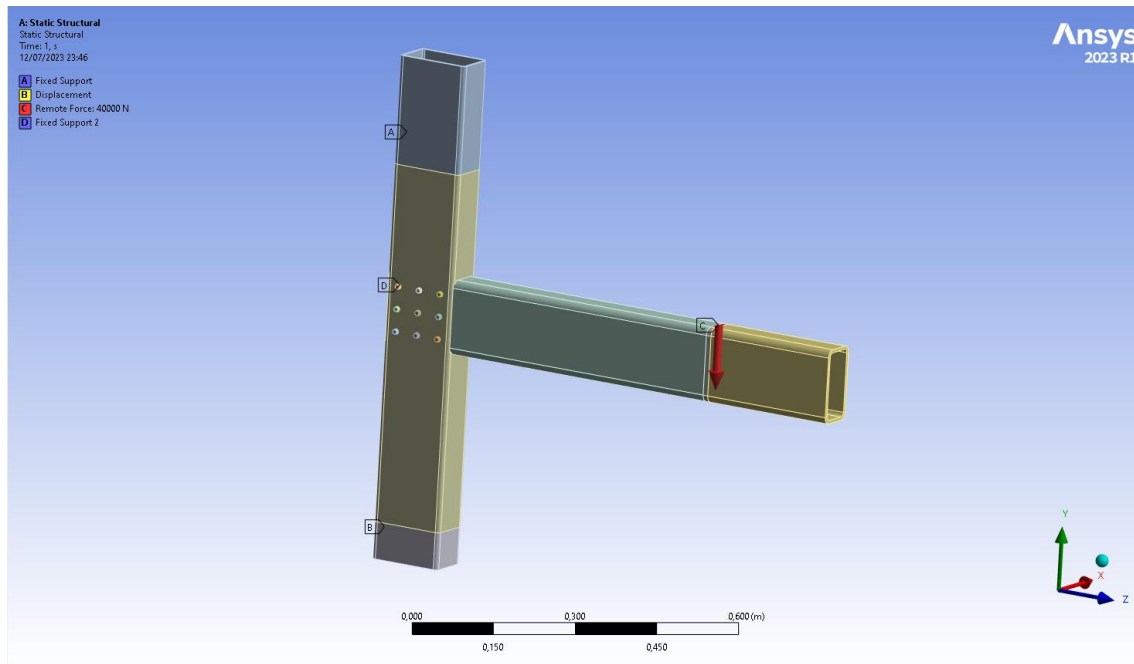


Figura 64.- Condiciones de contorno del modelo 2 de la unión ortogonal viga-pilar

## 5.4 Unión de cumbrera entre dinteles

### 5.4.1 Modelado

En la unión de cumbrera entre dinteles se realizó una parametrización de la geometría (Figura 65) ya que esto proporciona flexibilidad en el diseño, facilita análisis paramétricos, permite la optimización y facilita el estudio de sensibilidad en el comportamiento estructural. Al utilizar variables paramétricas en lugar de dimensiones fijas, se puede ahorrar tiempo, explorar múltiples configuraciones y tomar decisiones informadas para mejorar el diseño y el rendimiento de sus estructuras.

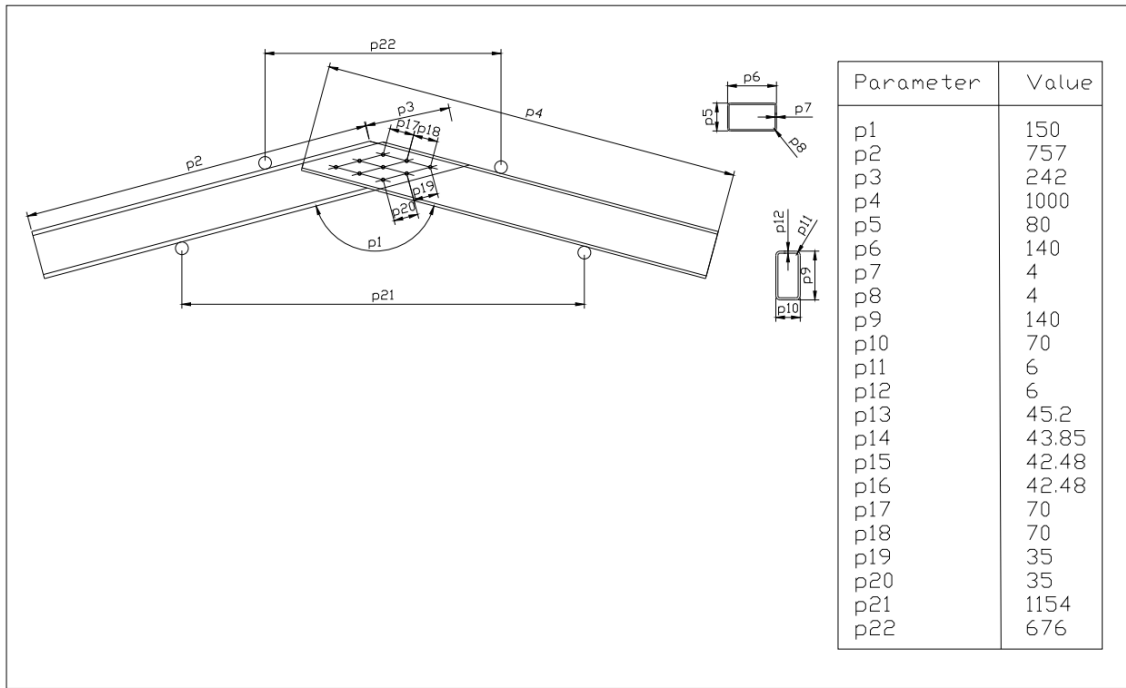


Figura 65.- Parámetros de la unión de cumbrera entre dinteles

De esta forma se obtienen las distintas geometrías:

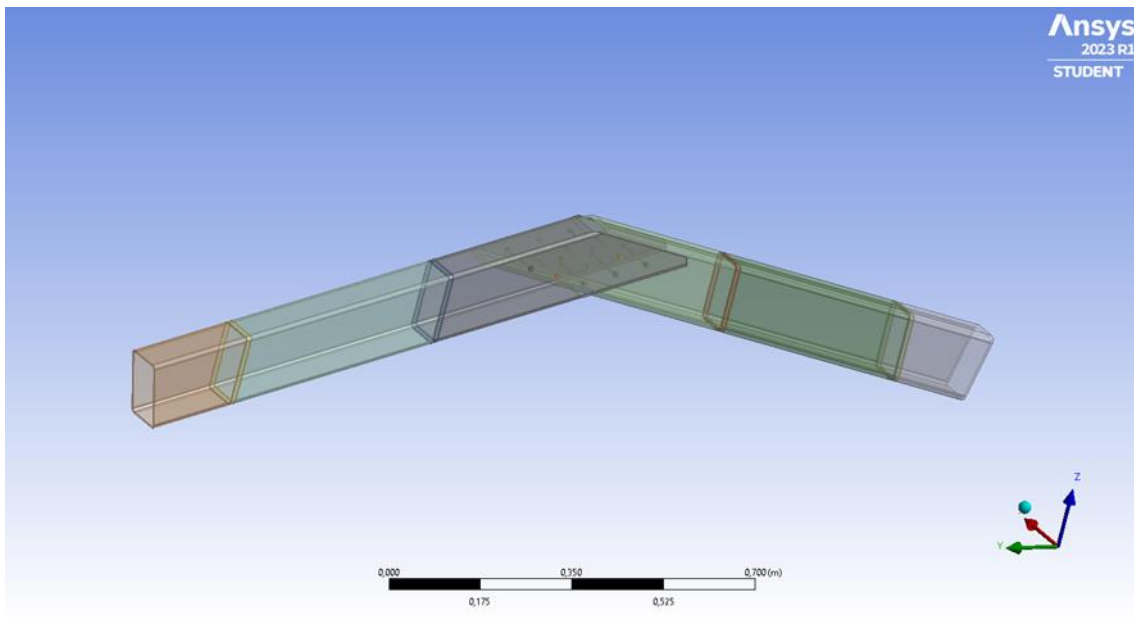


Figura 66.- Vista general de la unión de cumbrera entre dinteles



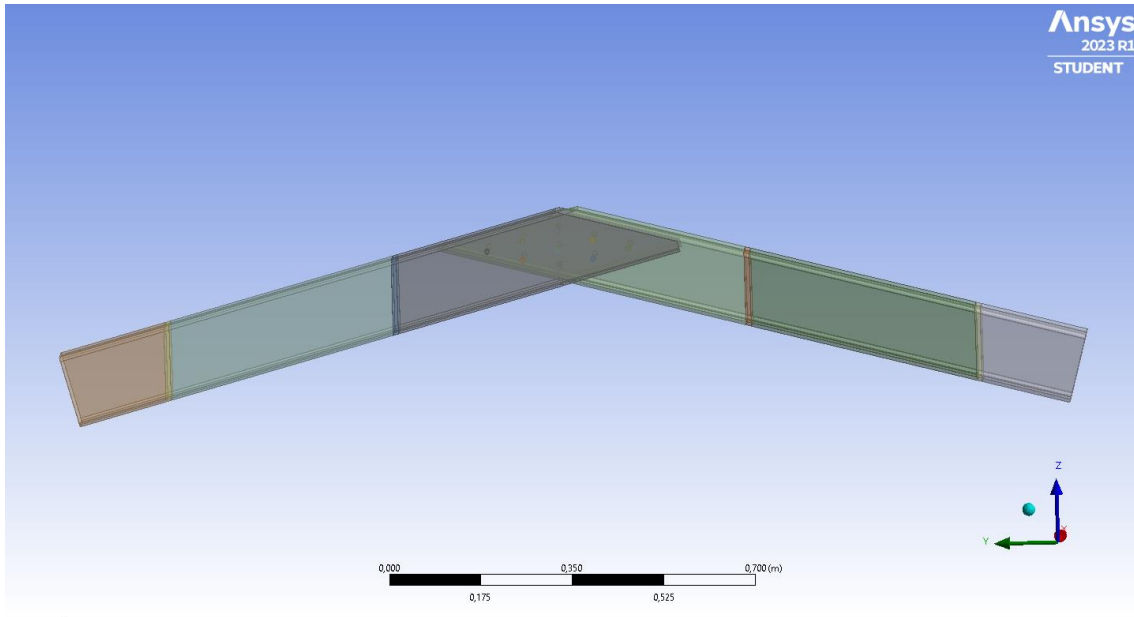


Figura 67.- Vista lateral de la unión de cumbrera entre dinteles

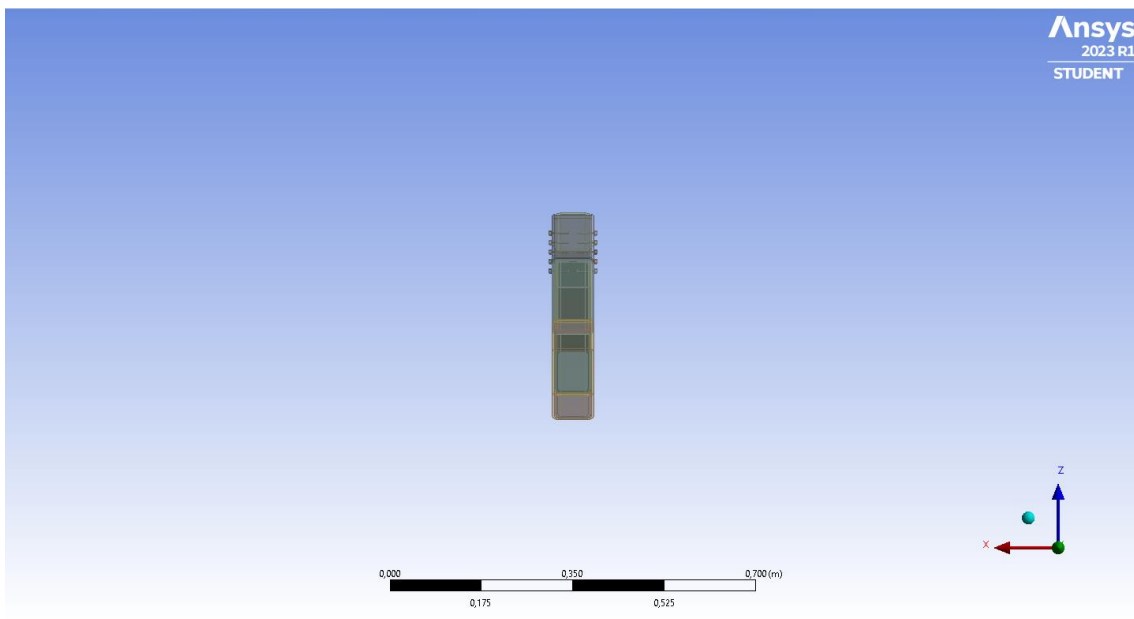


Figura 68.- Vista frontal de la unión de cumbrera entre dinteles

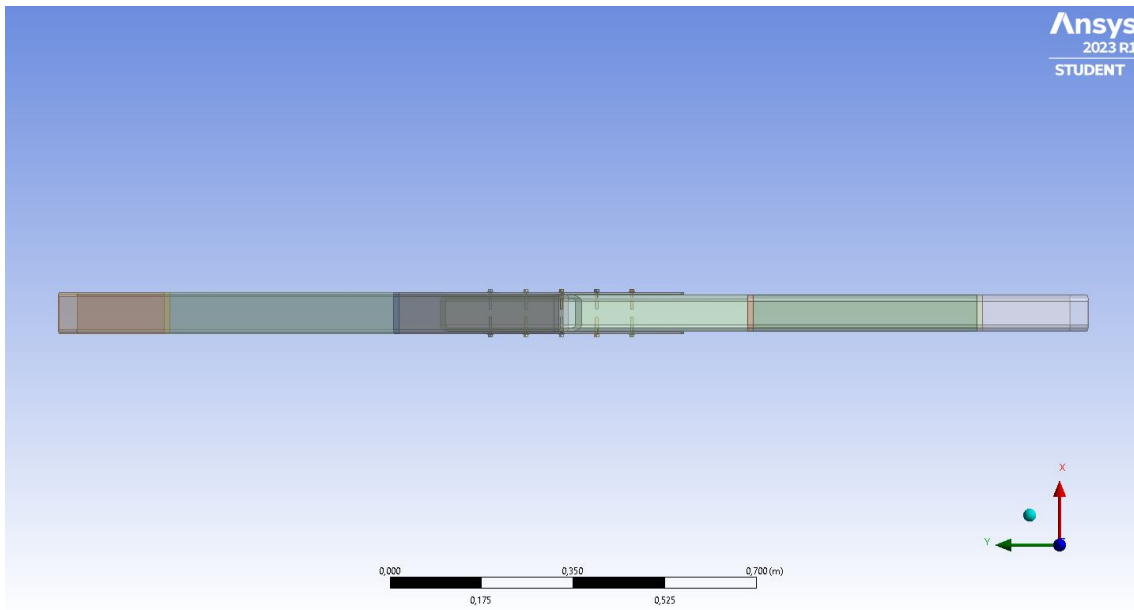


Figura 69.- Vista superior de la unión de cumbrera entre dinteles

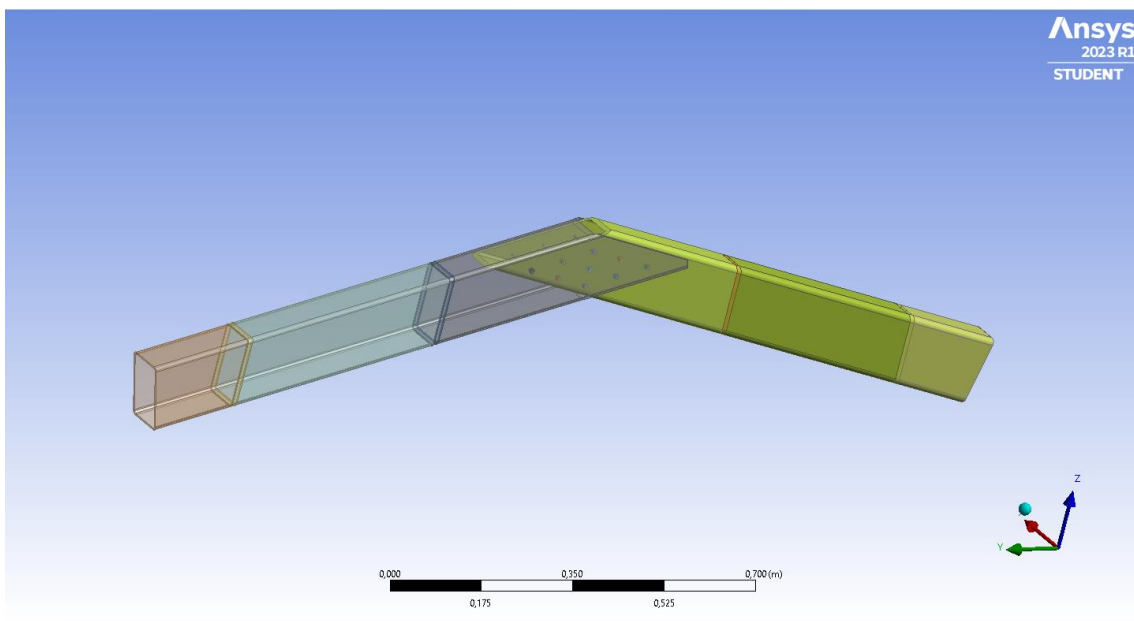


Figura 70.- Perfil 140x70x6 de la unión de cumbrera entre dinteles

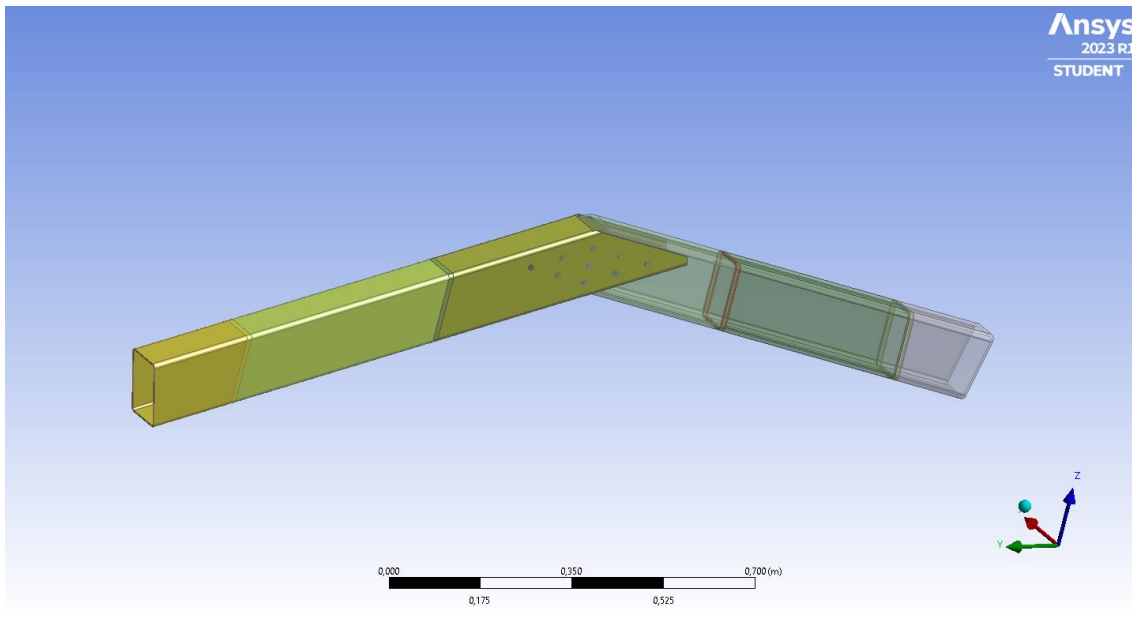


Figura 71.- Perfil 140x80x4 de la unión de cumbrera entre dinteles

## 5.4.2 Propiedades físicas

## 5.4.3 Mallado

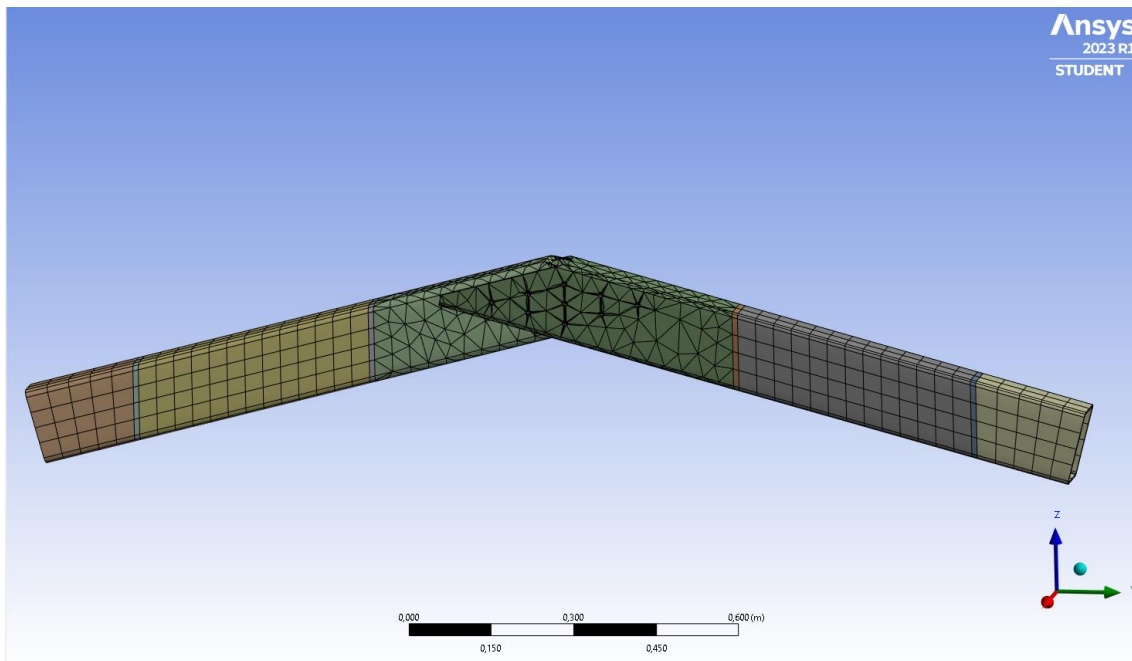
Una vez determinado el modelo geométrico y las condiciones del material, se procede al mallado.

El mallado, también conocido como discretización, es un paso fundamental en el análisis de una unión estructural en ANSYS. Consiste en dividir la geometría de la unión en elementos más pequeños llamados elementos finitos para permitir el cálculo y análisis numérico de las propiedades estructurales. Esto implica la creación de una red de elementos finitos que cubra toda la geometría de la unión. El software proporciona herramientas automáticas y manuales para generar el mallado, permitiendo adaptar la malla a las características específicas de la unión.

Después de generar el mallado, es importante realizar una verificación de calidad para asegurarse de que la malla es adecuada. Esto implica comprobar aspectos como la

conexión adecuada entre elementos, la distorsión excesiva de los elementos, la adecuada resolución de las características geométricas y la adecuada representación de las interfaces de la unión.

En este caso, se diferenciaron diferentes geometrías de mallado dentro de la geometría principal como se puede observar en la Figura 72 y Figura 73. Esto es debido a la complejidad de la unión, donde los angulares y las zonas del pilar y la viga adyacentes a estas forman la parte crítica de la unión.



*Figura 72.- Vista general del mallado de la unión de cumbrera entre dinteles*

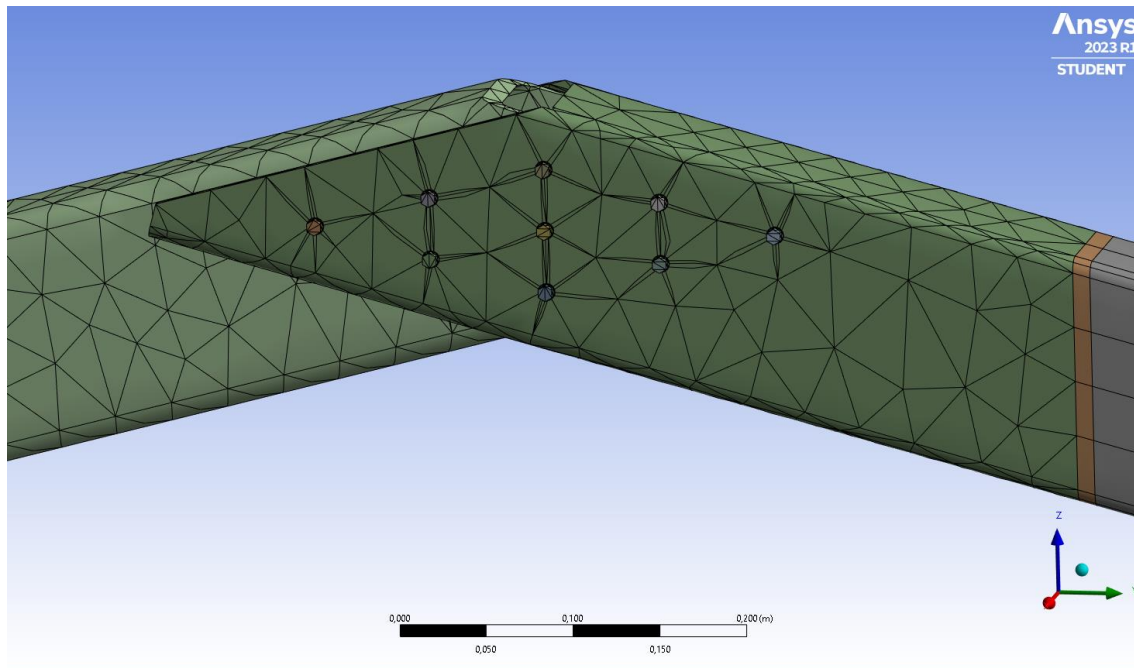
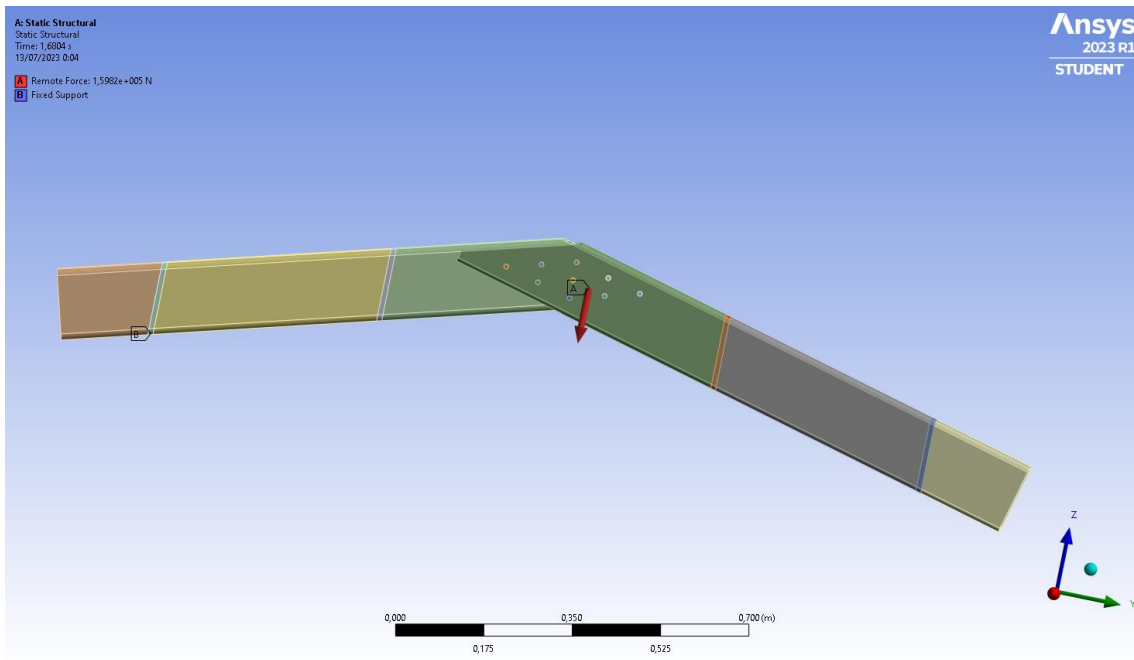


Figura 73.- Vista detallada del mallado de la unión de cumbrera entre dinteles

#### 5.4.4 Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno en esta unión se refieren a las restricciones y cargas que se aplican en los puntos de contacto entre ambas estructuras para simular las condiciones reales a las que están sometidas en la realidad. Estas condiciones de contorno son esenciales para obtener resultados precisos en el análisis estructural y evaluar el comportamiento de la unión.

En esta unión las condiciones de contorno son diferentes a las expuestas con anterioridad



## 6 Simulaciones

### 6.1 Introducción

Finalmente, tras completar todo lo explicado con anterioridad, se realizarán unas simulaciones de los tres modelos para comparar los resultados obtenidos en el laboratorio con los obtenidos en el software de ANSYS.

Antes de mostrar todos los resultados de ANSYS hay una serie de aspectos a considerar para tratar los resultados que se van a exponer a continuación.

#### 6.1.1 Momento resistente máximo

El Momento Resistente Máximo de una unión estructural se refiere al momento máximo que la unión es capaz de resistir sin que ocurra un fallo o una falla estructural. Este momento representa la capacidad máxima de la unión para resistir momentos o fuerzas de flexión aplicadas a la estructura.

En una unión estructural, el Momento Resistente Máximo se determina considerando varios factores, como la resistencia del material, el tipo de unión, el diseño y la calidad de la construcción. Para calcular este momento, se deben tener en cuenta las propiedades de los materiales utilizados en la unión, así como los factores de seguridad aplicados. Principalmente se utiliza para evaluar la capacidad de una unión de resistir momentos de flexión. Sin embargo, en el diseño y la evaluación de una unión estructural, también se deben considerar otros aspectos críticos, como la resistencia a la tracción, a la compresión y a la cortante, así como la rigidez y la estabilidad global de la estructura.

El giro que nos marcará el momento resistente vendrá dado del cálculo resultante de considerar un desplazamiento del 3% del ancho del perfil tubular en la zona de compresión y en la zona de tracción, ya que cuando se alcance dicho giro se considera que la unión ya ha fallado por plastificación.

### 6.1.2 Rigidez

La rigidez de una unión estructural se refiere a la capacidad de la unión para resistir deformaciones o desplazamientos bajo la acción de cargas o momentos aplicados. En otras palabras, la rigidez de una unión indica la cantidad de resistencia que ofrece ante las fuerzas que intentan deformar o desplazar la unión.

La rigidez de una unión se relaciona directamente con la curva momento-rotación de la unión. La curva momento-rotación es una representación gráfica que muestra cómo varía el momento en la unión en función de la rotación o deformación experimentada por la unión.

En una unión estructural, cuando se aplica un momento o una carga, se generan deformaciones y rotaciones en la unión. La rigidez de la unión determina la relación entre el momento aplicado y la deformación resultante, lo cual se puede representar mediante la curva momento-rotación. La pendiente de la curva momento-rotación indica la rigidez de la unión. Una pendiente más pronunciada indica una mayor rigidez, lo que significa que la unión ofrece una mayor resistencia a las deformaciones y rotaciones bajo la acción de cargas o momentos aplicados. Por otro lado, una pendiente más suave indica una menor rigidez, lo que implica que la unión es más flexible y puede deformarse más fácilmente.

## 6.2 Ángulo de rotación

Todo el proceso se ha dividido en dos intervalos de tiempo. En el primer paso, la carga se proporciona en el extremo del ala. En el segundo paso, se prevé la descarga. La carga se aplica en incrementos iguales hasta que se observa el fallo en la viga. En el análisis, la viga se dobla linealmente. Después de una determinada tensión, la viga se deforma de forma no lineal. Esto se observa claramente en el diagrama de tensiones y deformaciones. En el análisis, el movimiento máximo se observa en los tornillos y las tuercas. En el proyecto, cada tornillo está sometido a un valor de movimiento diferente, por lo que el movimiento total de todos los tornillos se anota utilizando la sonda de movimiento de



reacción. En ANSYS, la rotación del movimiento no se puede hallar. Pero utilizando algunas fórmulas matemáticas del concepto de trigonometría, se puede averiguar el ángulo de rotación en mili radianes.

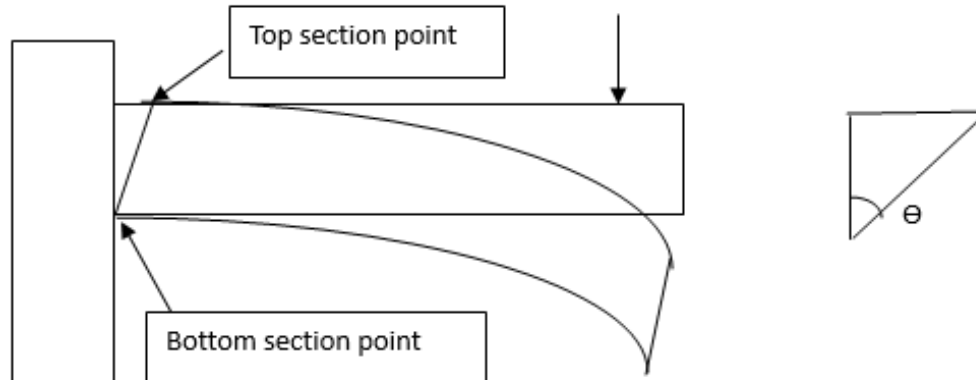


Figura 74.- Ángulo de rotación de la unión

Para identificar el ángulo de rotación, se consideran dos puntos, que están en las secciones superior e inferior de la viga, y la diferencia de altura entre ellos es de 140mm. El ángulo de rotación puede determinarse mediante la siguiente fórmula.

$$\text{Angle}(\theta) = \tan^{-1}\left(\frac{\text{Top section point displacement} - \text{Bottom section point displacement}}{\text{Height of section}}\right)$$

$$\text{mRad} = \theta * 17.45.$$

Utilizando la fórmula y el procedimiento mencionados anteriormente, se realizó el cálculo del ángulo de rotación de la viga para los tres modelos. Los resultados se registraron en una tabla. Para evaluar la condición de carga, se dividieron en 100 subpasos, lo que permitió obtener lecturas de deformación y momento. Estos datos se presentaron en tablas y gráficos. Además, se generaron gráficos que representan el momento y el ángulo de rotación para los tres modelos. A continuación, se compararon estos datos numéricos con los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio para validarlos. A través de estos gráficos, se pudo confirmar los momentos de fluencia máxima y su validez con relación a los resultados experimentales.

### 6.3 Unión ortogonal Viga-Pilar modelo 1

El programa ANSYS ha proporcionado los siguientes resultados y con ellos se han hecho las respectivas comparaciones en la curva momento-deformación.

La Figura 75 muestra la deformación del modelo 1. La deformación se observa linealmente antes del límite elástico del acero. Una vez que el material alcanza el límite elástico, la deformación se observa como no lineal. El color rojo indica la deformación máxima y el azul la mínima.

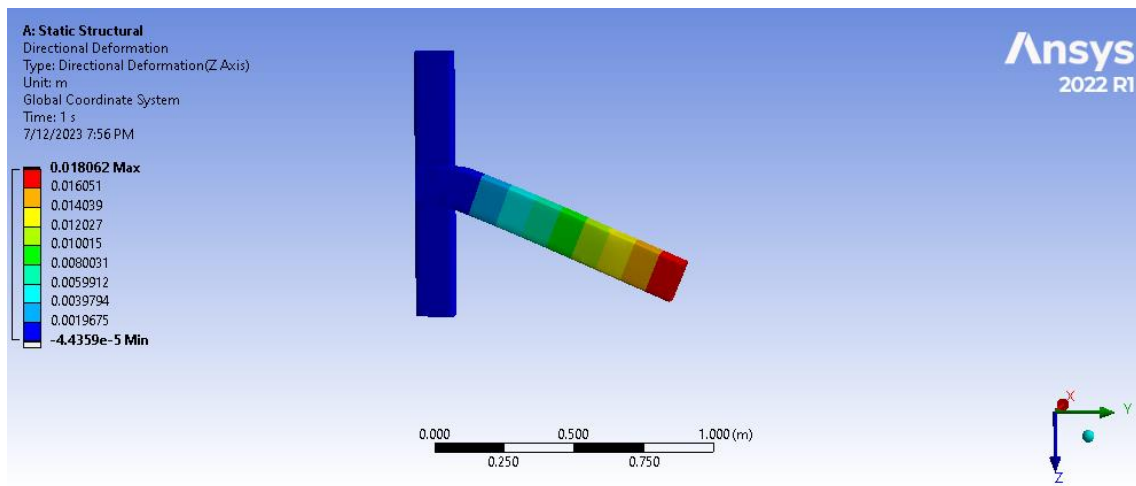


Figura 75.- Deformación total del modelo 1 de la unión ortogonal viga-pilar

La Figura 76 muestra la tensión en el modelo 1. La tensión se observa linealmente antes del límite elástico del acero. Una vez que el material alcanza el límite elástico, la tensión se observa como no lineal. El color rojo indica la tensión máxima y el azul la mínima.

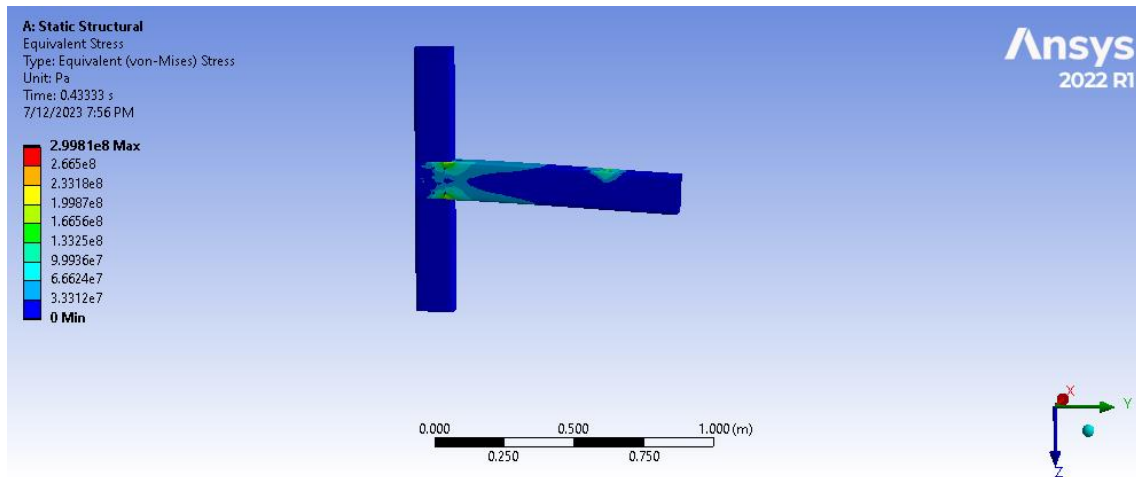


Figura 76.- Tensión total del modelo 1 de la unión ortogonal viga-pilar

La Figura 77 muestra el momento de reacción con respecto a cada intervalo de tiempo en los tornillos para registrarlo y generar los gráficos de momento y rotación.

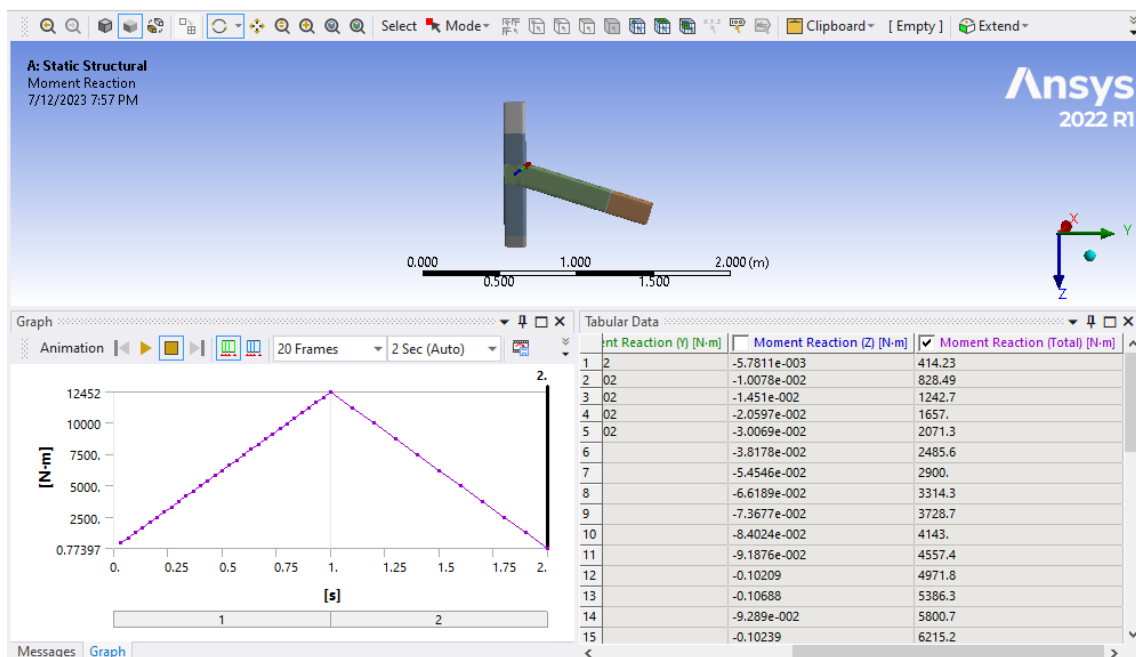


Figura 77.- Momento en los tornillos del modelo 1 de una unión ortogonal viga-pilar

La Figura 78 y la Figura 79 muestran los puntos de deformación de los lados superior e inferior de la sección para hallar la rotación. Para cada intervalo de tiempo, se toma la deformación en los puntos superior e inferior de la sección, que puede verse en la imagen. A partir de estos desplazamientos puntuales, se calcula la rotación de la viga.

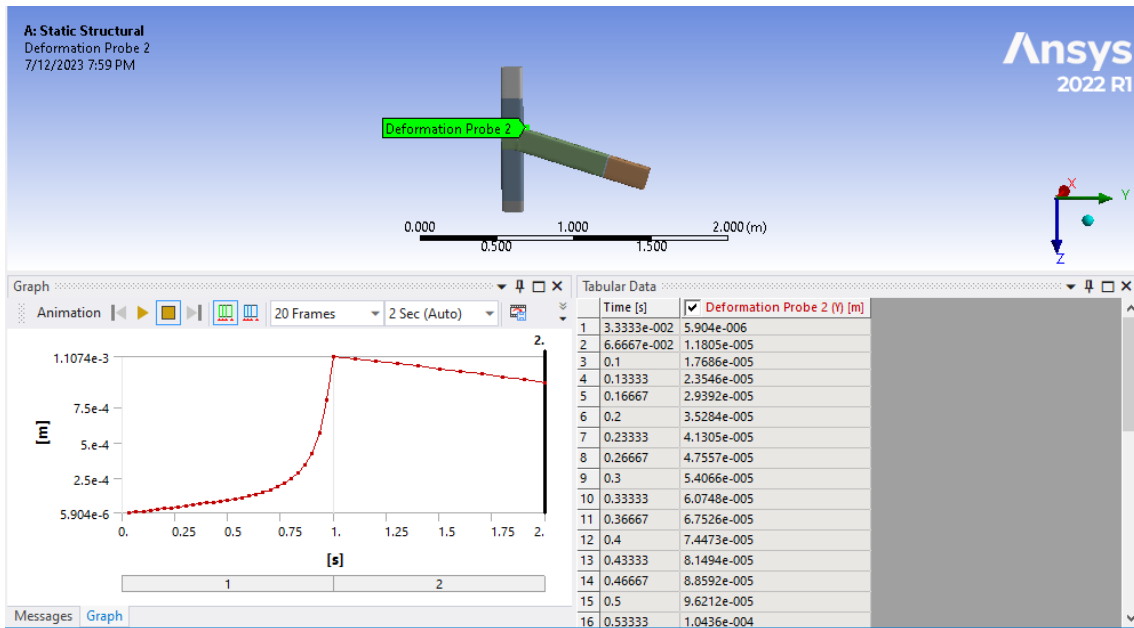


Figura 78.- Deformación superior de la sección del modelo 1 de la unión ortogonal viga-pilar

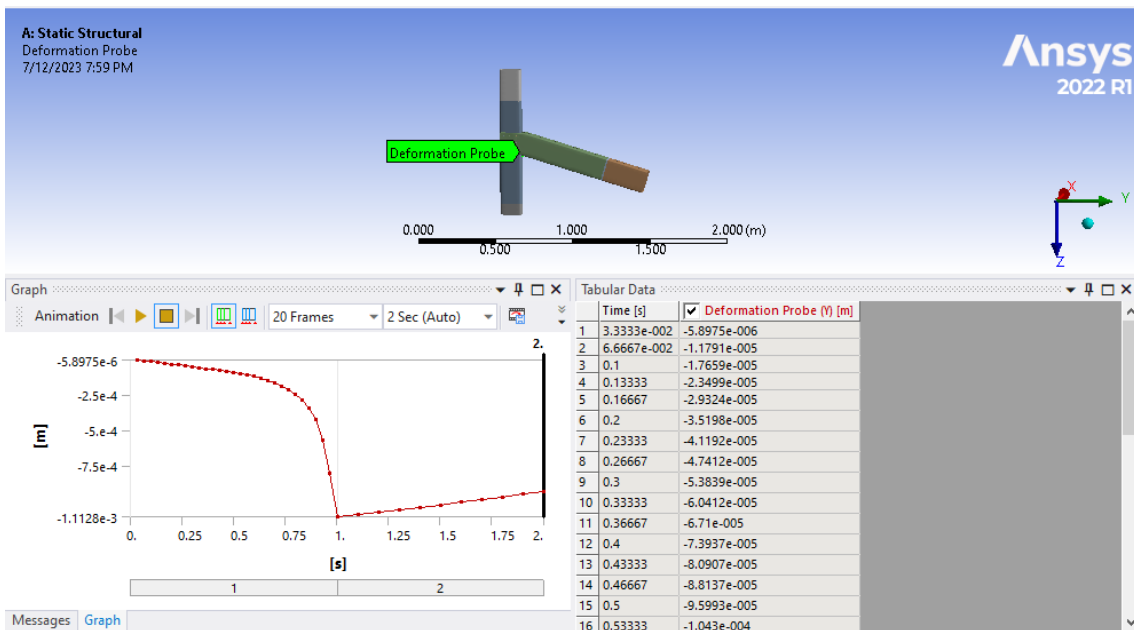


Figura 79.- Deformación inferior de la sección del modelo 1 de la unión ortogonal viga-pilar

Y, con toda esta información ya se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 4.- Resultados del modelo 1 de la unión ortogonal viga-pilar

Deformación sup	Deformación inf	Rotación (°)	Rotación (mrad)	Momento (KNm)
4,41E-06	-5,90E-06	4,22E-02	0,73604	0,41423
8,82E-06	-1,18E-05	8,43E-02	1,471757	0,82849
1,32E-05	-1,77E-05	1,26E-01	2,205152	1,2427
1,76E-05	-2,35E-05	1,68E-01	2,935723	1,657
2,20E-05	-2,93E-05	2,10E-01	3,664506	2,0713
2,64E-05	-3,52E-05	2,52E-01	4,395785	2,4856
3,07E-05	-4,12E-05	2,94E-01	5,136129	2,9
3,52E-05	-4,74E-05	3,38E-01	5,896248	3,3143
3,97E-05	-5,38E-05	3,83E-01	6,676498	3,7287
4,43E-05	-6,04E-05	4,28E-01	7,475165	4,143
4,90E-05	-6,71E-05	4,75E-01	8,291745	4,5574
5,39E-05	-7,39E-05	5,23E-01	9,126524	4,9718
5,88E-05	-8,09E-05	5,72E-01	9,974787	5,3863
6,37E-05	-8,81E-05	6,22E-01	10,84574	5,8007
6,88E-05	-9,60E-05	6,74E-01	11,76759	6,2152
7,40E-05	-1,04E-04	7,30E-01	12,7317	6,6296
7,93E-05	-1,13E-04	7,87E-01	13,73562	7,0441
8,46E-05	-1,23E-04	8,49E-01	14,81755	7,4586
9,01E-05	-1,35E-04	9,19E-01	16,04281	7,8731
9,62E-05	-1,49E-04	1,01E+00	17,53968	8,2877
1,03E-04	-1,67E-04	1,10E+00	19,26113	8,7024
1,10E-04	-1,88E-04	1,22E+00	21,27063	9,1172
1,17E-04	-2,14E-04	1,35E+00	23,63328	7,4687
1,25E-04	-2,46E-04	1,52E+00	26,53091	6,2236
1,35E-04	-2,88E-04	1,73E+00	30,19797	4,9786

La Tabla 4 muestra la lectura obtenida del análisis no lineal ANSYS para calcular la rotación de la viga. En ella, cada columna representa el desplazamiento del punto de la sección superior, el desplazamiento del punto de la sección inferior, la rotación en grados, la rotación en mili radianes y el momento en KNm. Utilizando los datos de la tabla anterior, se generan los gráficos siguientes (Figura 80) al compararlos con los ensayos de laboratorio.

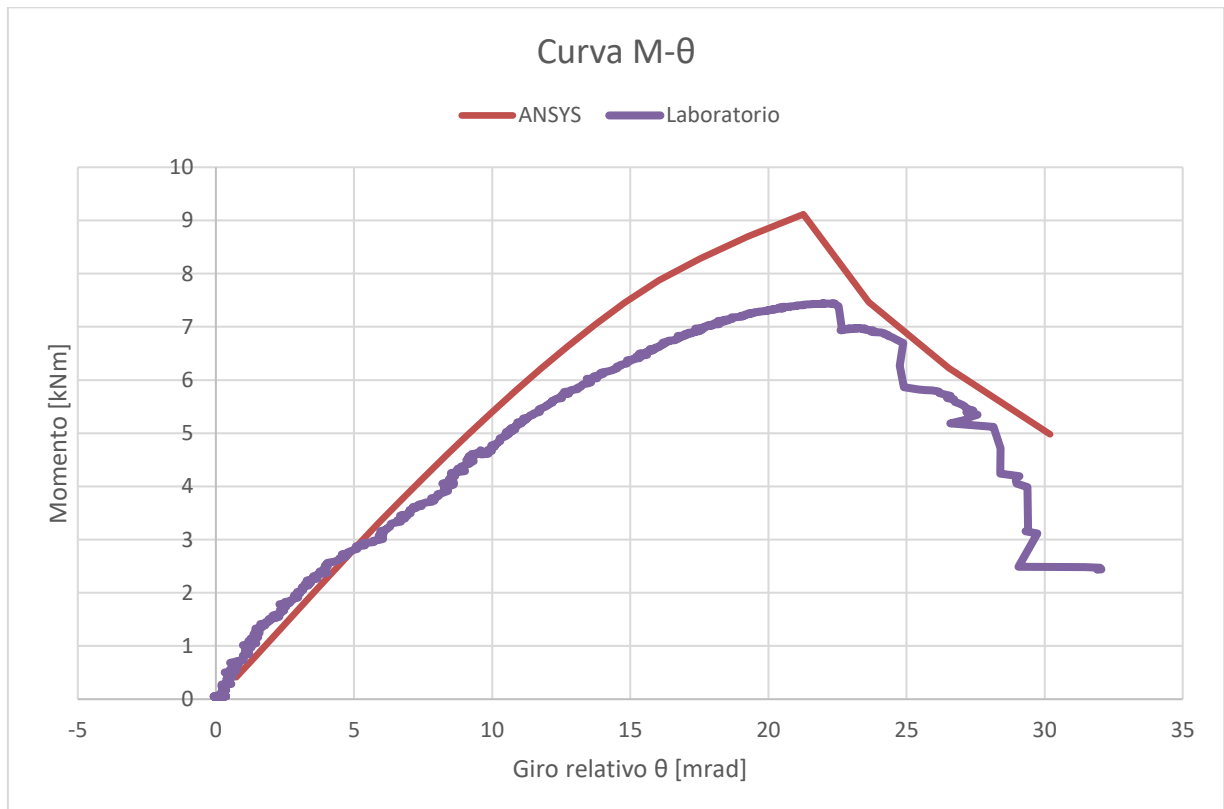


Figura 80.- Comparación resultados ANSYS con resultados laboratorio del modelo 1 de la unión ortogonal viga-pilar

## 6.4 Unión ortogonal Viga-Pilar modelo 2

El programa ANSYS ha proporcionado los siguientes resultados y con ellos se han hecho las respectivas comparaciones en la curva momento-deformación.

La Figura 81 muestra la deformación del modelo 2. La deformación se aprecia linealmente antes del límite elástico del acero. Una vez que el material adquiere el límite

elástico, la deformación se considera no lineal. El color rojo indica la deformación máxima y el azul la mínima.

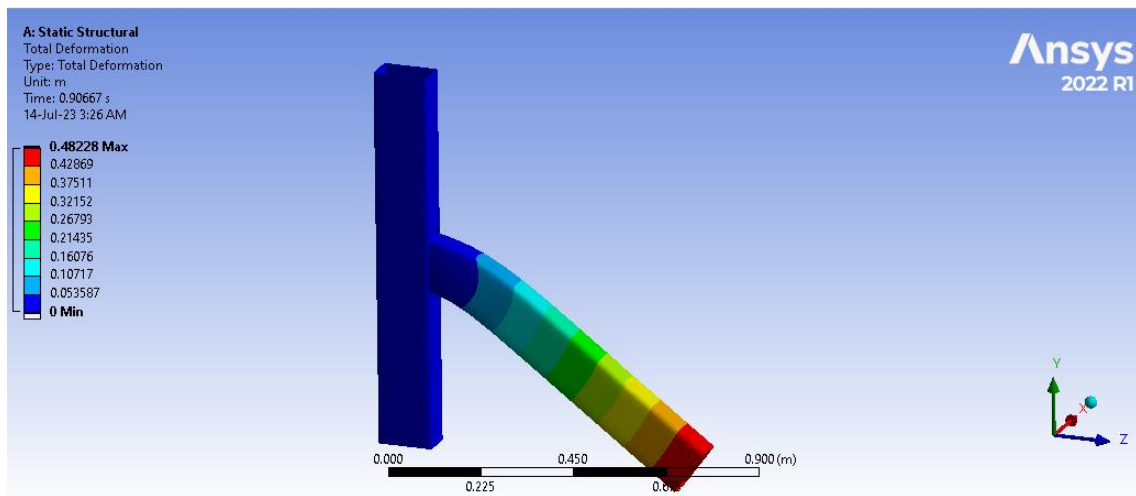


Figura 81.- Deformación total del modelo 2 de la unión ortogonal viga-pilar

La Figura 82 muestra la tensión en el modelo 2. La tensión se aprecia de forma lineal antes del límite elástico del acero. Una vez que el material alcanza el límite elástico, la tensión se considera no lineal. El color rojo indica la tensión máxima y el azul la mínima.

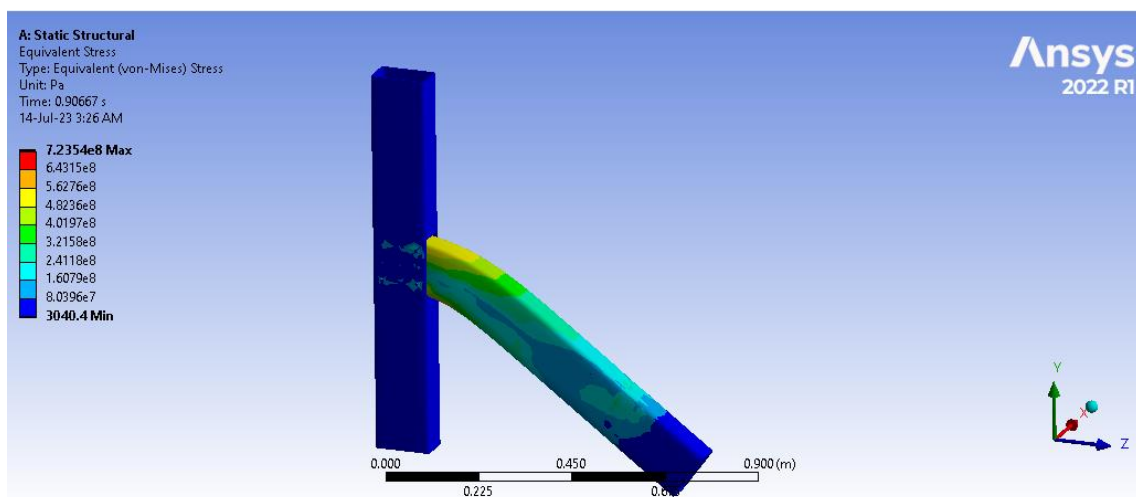


Figura 82.- Tensión máxima del modelo 2 de la unión ortogonal viga-pilar

La Figura 83 muestra el momento de reacción con respecto a cada intervalo de tiempo. El momento en los tornillos se registra para generar los gráficos de momento y rotación.

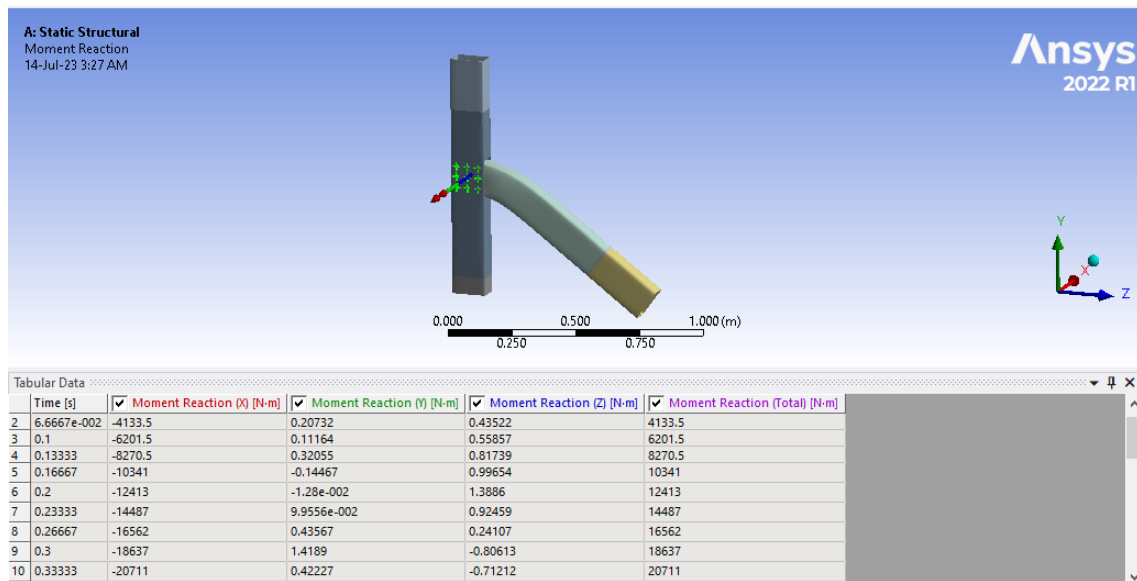


Figura 83.- Momento en los tornillos del modelo 2 de una unión ortogonal viga-pilar

La Figura 84 y la Figura 85 muestran los puntos de deformación de los lados superior e inferior de la sección para hallar la rotación. Para cada intervalo de tiempo, se toma la deformación en los puntos superior e inferior de la sección, que puede verse en la imagen. A partir de estos desplazamientos puntuales, se calcula la rotación de la viga.

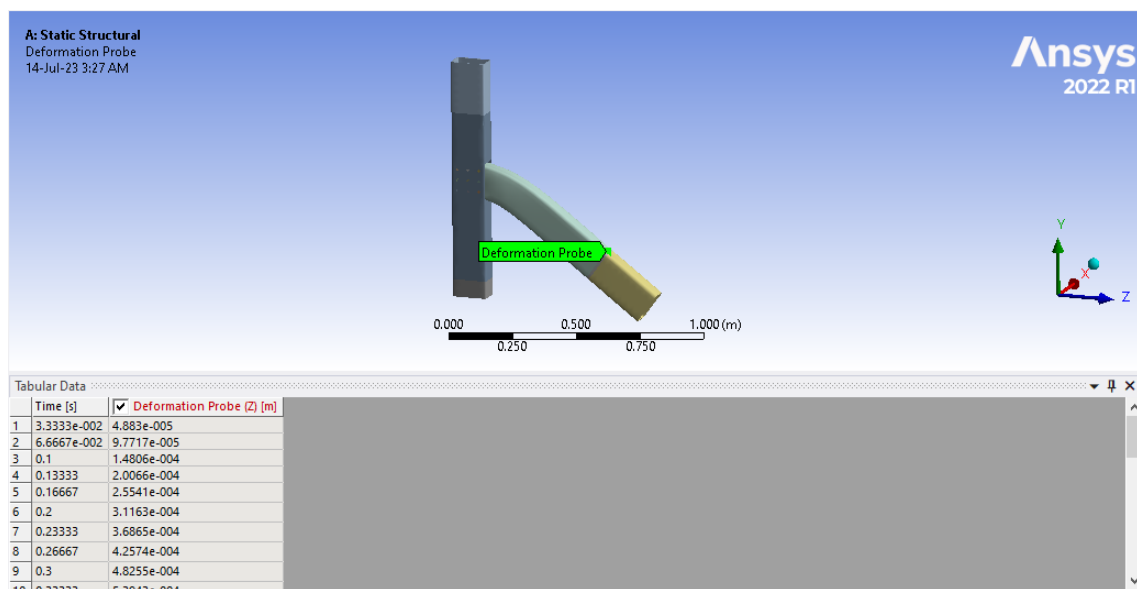


Figura 84.- Deformación superior de la sección del modelo 2 de la unión ortogonal viga-pilar



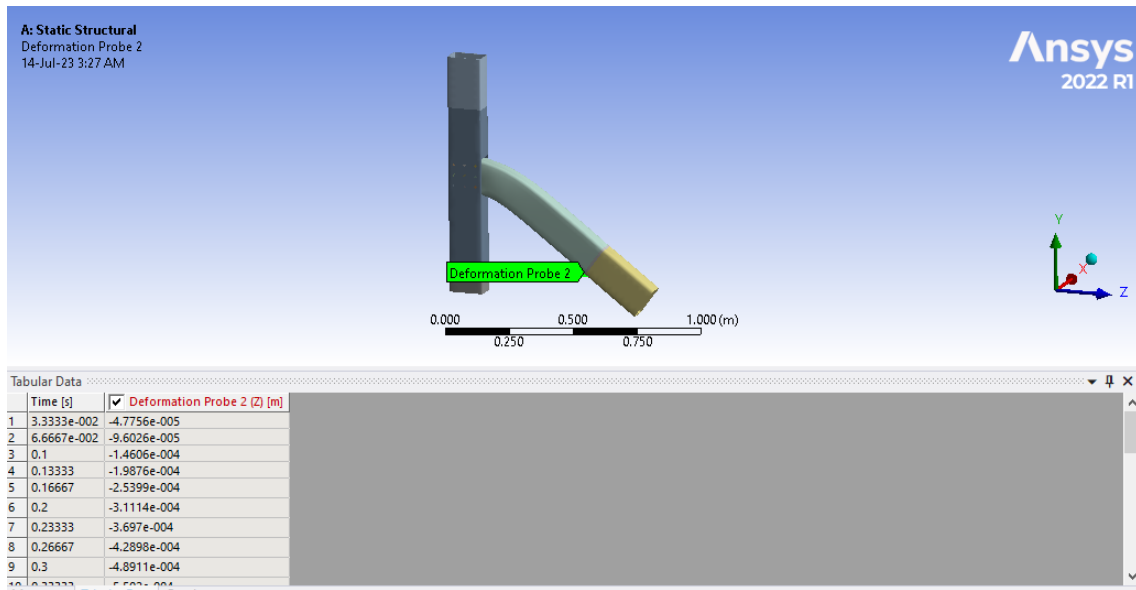


Figura 85.- Deformación inferior de la sección del modelo 2 de la unión ortogonal viga-pilar

Y, con toda esta información, se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 5.- Resultados del modelo 2 de la unión ortogonal viga-pilar

Deformación sup	Deformación inf	Rotación (º)	Rotación (mrad)	Momento (KNm)
4,88E-05	-4,78E-05	3,95E-02	0,68977	2,0662
9,77E-05	-9,60E-05	7,93E-02	1,383617	4,1335
1,48E-04	-1,46E-04	1,20E-01	2,100458	6,2015
2,01E-04	-1,99E-04	1,63E-01	2,852454	8,2705
2,55E-04	-2,54E-04	2,08E-01	3,637869	10,341
3,12E-04	-3,11E-04	2,55E-01	4,447489	12,413
3,69E-04	-3,70E-04	3,02E-01	5,272885	14,487
4,26E-04	-4,29E-04	3,50E-01	6,103915	16,562
4,83E-04	-4,89E-04	3,98E-01	6,939008	18,637
5,39E-04	-5,50E-04	4,46E-01	7,781446	20,711
5,97E-04	-6,14E-04	4,95E-01	8,646082	22,786

6,67E-04	-6,90E-04	5,55E-01	9,691296	24,858
8,13E-04	-8,56E-04	6,83E-01	11,91633	26,933

La Tabla 5Tabla 4 muestra la lectura obtenida del análisis no lineal ANSYS para calcular la rotación de la viga. En ella, cada columna representa el desplazamiento del punto de la sección superior, el desplazamiento del punto de la sección inferior, la rotación en grados, la rotación en mili radianes y el momento en KNm. Utilizando los datos de la tabla anterior, se generan los gráficos siguientes (Figura 86) al compararlos con los ensayos de laboratorio.

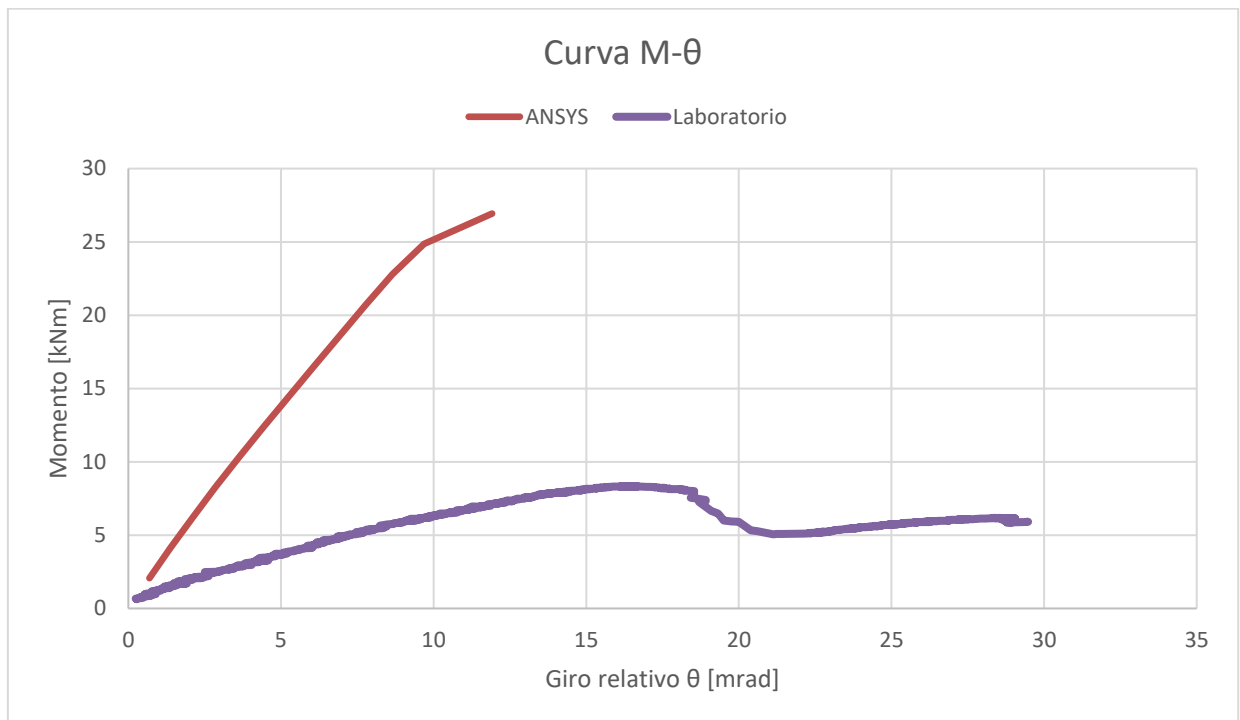


Figura 86.- Comparación resultados ANSYS con resultados laboratorio del modelo 2 de la unión ortogonal viga-pilar

## 6.5 Unión de cumbrera entre dinteles

El programa ANSYS ha proporcionado los siguientes resultados y con ellos se han hecho las respectivas comparaciones en la curva momento-deformación.

La Figura 87 muestra la deformación de la unión de cumbrera entre dinteles. La deformación se aprecia linealmente antes del límite elástico del acero. Una vez que el material adquiere el límite elástico, la deformación se considera no lineal. El color rojo indica la deformación máxima y el azul la mínima.

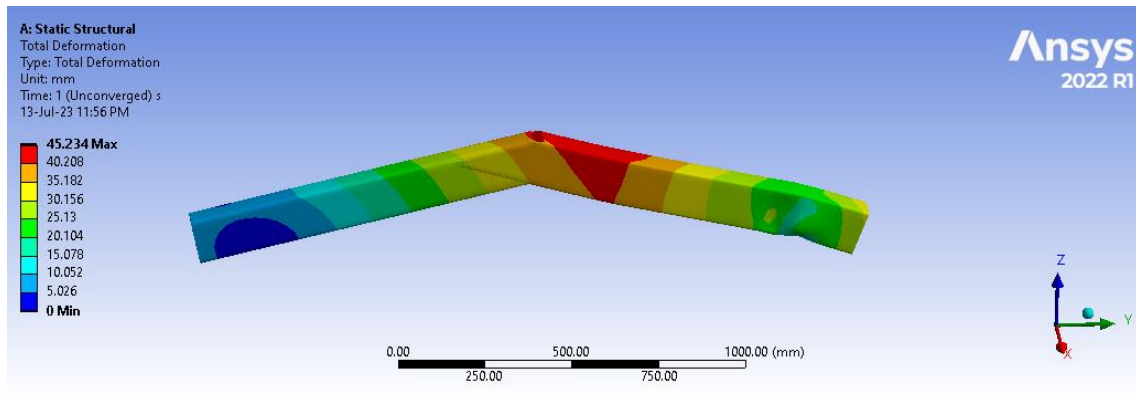


Figura 87.- Deformación total de la unión de cumbrera entre dinteles

La Figura 88 muestra la tensión en la unión de cumbrera entre dinteles. La tensión se aprecia de forma lineal antes del límite elástico del acero. Una vez que el material alcanza el límite elástico, la tensión se considera no lineal. El color rojo indica la tensión máxima y el azul la mínima.

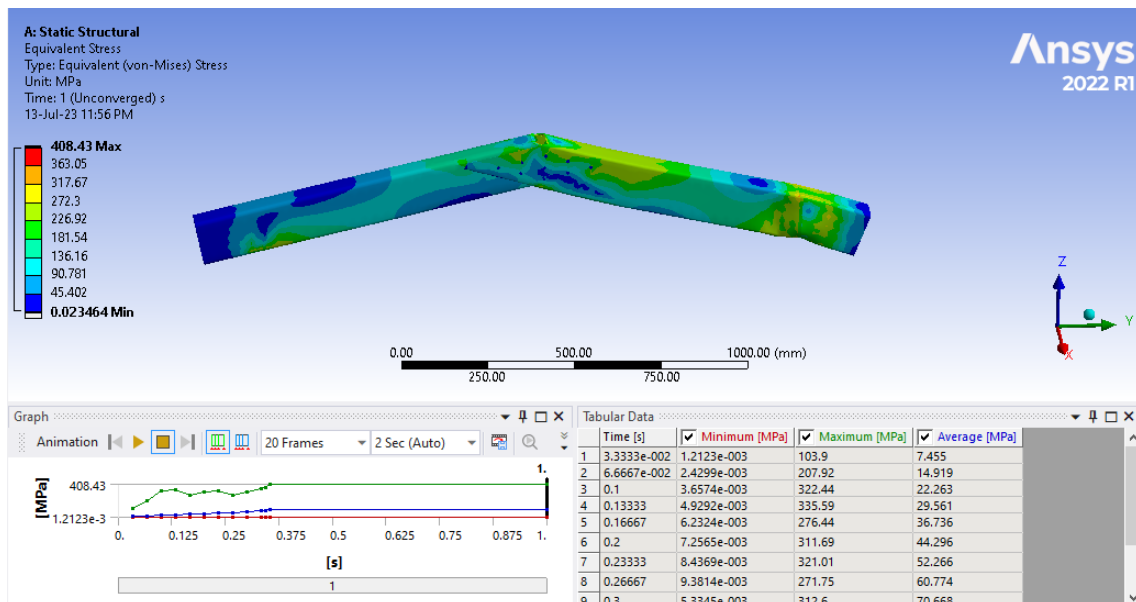


Figura 88.- Tensión total de la unión de cumbrera entre dinteles

La Figura 89 muestra el momento de reacción con respecto a cada intervalo de tiempo. El momento en los tornillos se registra para generar los gráficos de momento y rotación.

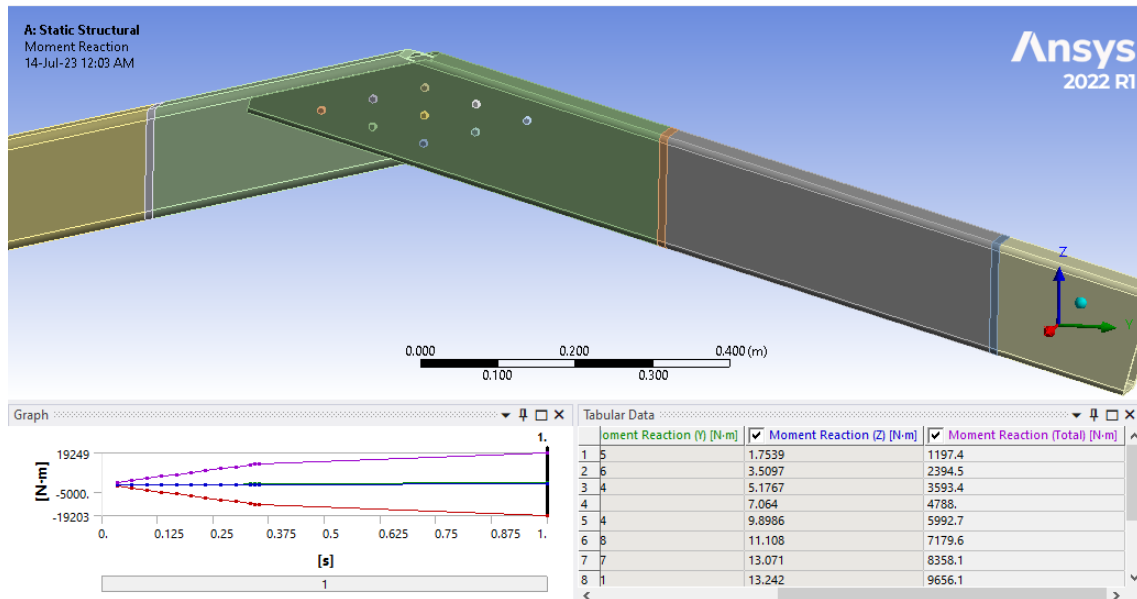


Figura 89.- Momento en los tornillos de la unión de cumbrera entre dinteles

La Figura 90 y la Figura 91 muestran los puntos de deformación de los lados superior e inferior de la sección para hallar la rotación. Para cada intervalo de tiempo, se toma la deformación en los puntos superior e inferior de la sección, que puede verse en la imagen. A partir de estos desplazamientos puntuales, se calcula la rotación de la viga.

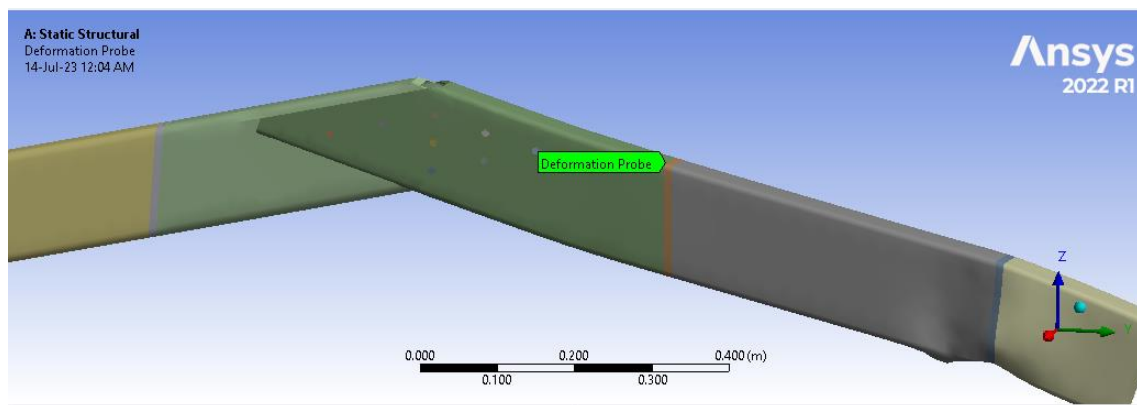


Figura 90.- Deformación superior de la sección de la unión de cumbrera entre dinteles

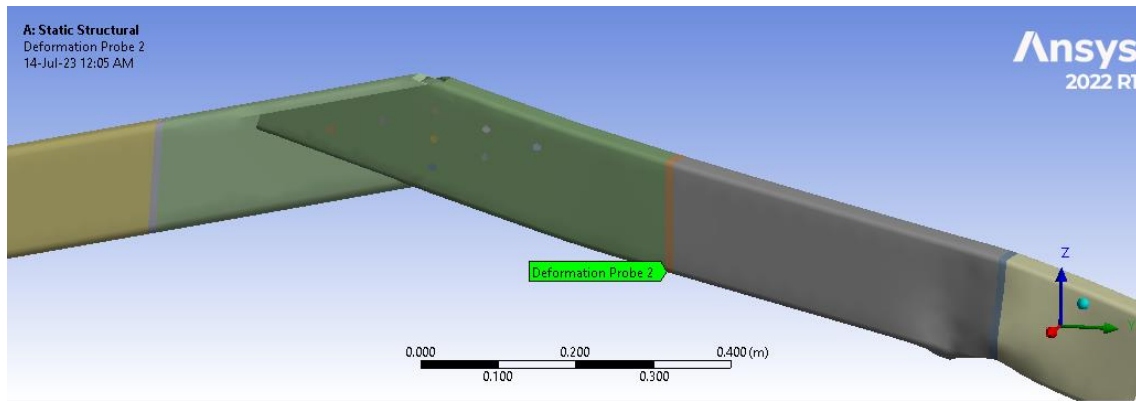


Figura 91.- Deformación inferior de la sección de la unión de cumbrera entre dinteles

Y, con toda esta información, se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 6.- Resultados de la unión de cumbrera entre dinteles

Deformación sup	Deformación inf	Rotación (º)	Rotación (mrad)	Momento (KNm)
-0,0178	0,0146	0,0133	0,2316	1,1974
-0,0357	0,0292	0,0266	0,4635	2,3945
-0,0535	0,0439	0,0399	0,6955	3,5934
-0,0711	0,0587	0,0531	0,9269	4,7880
-0,0874	0,0747	0,0663	1,1572	5,9927
-0,0969	0,0992	0,0802	1,4001	7,1796
-0,0953	0,1385	0,0957	1,6695	8,3581
-0,0764	0,1997	0,1130	1,9721	9,6561
0,0499	0,3751	0,1331	2,3223	10,7260
0,3047	0,7154	0,1681	2,9330	11,8620
0,4187	0,8755	0,1869	3,2617	12,1870
0,6429	1,1668	0,2144	3,7414	12,4840
4,0359	7,6079	1,4615	25,5039	11,2000

La Tabla 6 muestra la lectura obtenida del análisis no lineal ANSYS para calcular la rotación de la viga. En ella, cada columna representa el desplazamiento del punto de la sección superior, el desplazamiento del punto de la sección inferior, la rotación en grados, la rotación en mili radianes y el momento en KNm. Utilizando los datos de la tabla anterior, se generan los gráficos siguientes (Figura 92) al compararlos con los ensayos de laboratorio.

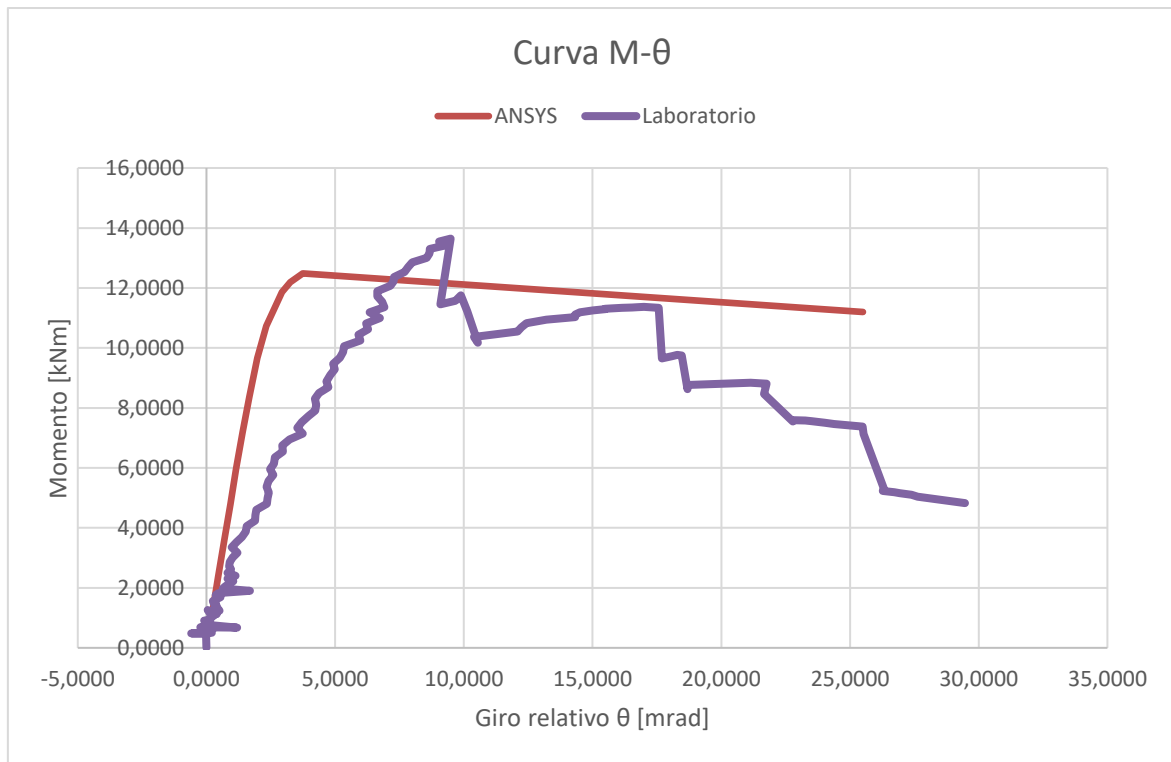


Figura 92.- Comparación resultados ANSYS con resultados laboratorio de la unión de cumbrera entre dinteles

## 7 Conclusiones

En este proyecto, se llevaron a cabo simulaciones utilizando el software ANSYS para analizar el comportamiento de diferentes uniones estructurales. A partir de los resultados obtenidos y las gráficas momento-deformación, se han identificado patrones y discrepancias entre los modelos simulados y los ensayos de laboratorio.

En el caso del modelo 1 de la unión ortogonal viga-pilar, los resultados y la gráfica momento-deformación mostraron una similitud considerable con los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio. Esto indica que el modelo en ANSYS fue capaz de capturar de manera precisa el comportamiento estructural de esta unión. La coincidencia en los resultados puede atribuirse a una adecuada selección de las propiedades del material, una correcta definición de las condiciones de contorno y una buena representación de la geometría en el modelo de ANSYS.

En contraste, el modelo 2 de la unión ortogonal no arrojó los mismos resultados que los ensayos de laboratorio. Esta discrepancia podría atribuirse a varias razones. Es posible que el modelo en ANSYS haya presentado simplificaciones o suposiciones que no reflejaban completamente el comportamiento real de la unión. Además, las propiedades del material en el modelo podrían no haber coincidido con las utilizadas en los ensayos de laboratorio, y las condiciones de contorno podrían haber sido inadecuadas. Estos factores podrían haber contribuido a las diferencias observadas entre los resultados del modelo y los ensayos de laboratorio.

En relación con la unión de cumbrera entre dinteles, los resultados obtenidos en ANSYS y los ensayos de laboratorio fueron similares. Esto sugiere que el modelo en ANSYS fue capaz de representar adecuadamente el comportamiento de esta unión. La coincidencia en los resultados indica una buena selección de propiedades del material, condiciones de contorno y una representación precisa de la geometría en el modelo de ANSYS.

Si bien se ha observado una similitud considerable entre los resultados y las gráficas momento-deformación del modelo 1 de la unión ortogonal viga-pilar y la unión de

cumbrera entre dinteles en ANSYS y los ensayos de laboratorio, es importante destacar que aún existen diferencias entre ellos. Esto sugiere que aún se requiere mejorar el modelado en este software o explorar alternativas adicionales para obtener resultados más precisos y confiables.

Este proyecto ha sentado una base sólida para futuras investigaciones sobre este tipo de uniones estructurales, que son de vital importancia para las estructuras actuales. La comparación entre los resultados del software y los ensayos de laboratorio proporciona información valiosa para continuar mejorando y refinando los modelos de simulación, así como para explorar otras herramientas o enfoques que puedan ofrecer una representación más precisa del comportamiento real de las uniones estructurales. Además, la parametrización de estos modelos facilitará una investigación mucho más extensa sobre estas uniones.

En este sentido, se recomienda seguir investigando y perfeccionando el modelado en ANSYS o explorar alternativas que puedan proporcionar una mayor precisión en los análisis de uniones estructurales. Esto permitirá una mejor comprensión de su comportamiento y contribuirá al diseño y desarrollo de estructuras más eficientes y seguras en el futuro.



## 8 Bibliografía

Gracia Rodríguez, J. & López-Colina Pérez, C. (2022). MODELADO AVANZADO DE UNIONES ESTRUCTURALES LIGERAS.

V.Sutharsan. (2020, 7 septiembre). Column and Beam system in construction - Basic Civil Engineering. <https://basiccivilengineering.com/2015/03/column-and-beam-system-in-construction.html>

Admin. (2022, 16 noviembre). What Are Beams and Columns in Structural Engineering? - Martin Perry Associates - Structural Engineering and Surveys in Cornwall. Martin Perry Associates - Structural Engineering and Surveys in Cornwall. <https://mperryassociates.com/2022/11/16/what-beams-columns-structural-engineering/>

Planes, E. F. (2021, 5 agosto). El precio del acero: ¿por qué ha aumentado con la pandemia de Covid-19? - ferrosplanes. ferrosplanes. <https://ferrosplanes.com/precio-acero-pandemia-covid-19/>

Remaches y Soldadura — Steemit. (s. f.). Steemit. <https://steemit.com/spanish/@aarauz/remaches-y-soldadura>

APSEd. (2022, 21 enero). Design of Bolted Connections | Concept and Formulas with Example. APSEd. <https://www.apsed.in/post/design-of-bolted-connections-concept-and-formulas-with-example#:~:text=Bolted%20connections%20are%20a%20type,female%20thread%2C%20such%20as%20nuts.>

Davies JM, Bryan ER. Manual of stressed skin diaphragm design. Granada Publishing. 1982.

---

EN 1993-1-3 Eurocode 3 - Design of steel structures - Part 1-3: General rules - Supplementary rules for cold-formed members and sheeting. European Committee for Standardization. 2006.

López-Colina, C., Serrano López, M., Blanco Viñuela, R., & López Gayarre, F. (2012). Simulación numérica de la soldadura en uniones con perfiles huecos estructurales RHS. VII International Scientific Conference of Mechanical Engineering. Villa Clara, Cuba: Departamente Construcción Universidad de Oviedo.

ECCS. European recommendations for the application of metal sheeting acting as a diaphragm. Stressed Skin Design. European Convention for Constructional Steelwork. 1995;88.

Budziński, R., & Ślęczka, L. (2020). Behaviour of steel sheeting connections with self-drilling screws under variable loading. *Open Engineering*, 10(1), 527-535. <https://doi.org/10.1515/eng-2020-0058>

Eugen, R., & Gavril, G. (2010). FINITE ELEMENT ANALYSIS OF A FORMING PROCESS, USING STATIC STRUCTURAL (ANSYS) AND ANSYS LS-DYNA. *Annals of the Oradea University: Fascicle Management and Technological Engineering*, XIX (IX), 2010/2(2). <https://doi.org/10.15660/auofmte.2010-2.1876>

*Home Page*. (2023, 7 junio). <https://www.ansys.com/>

Dundu, M. (2012). Base connections of single cold-formed steel portal frames.

EAE, M. d. (2012). Instrucción del Acero Estructural.

EN-10210. (2007). Perfiles huecos para construcción, acabados en caliente, de acero no aleado y de grano fino. Parte 1: Condiciones técnicas de suministro.

EN-10219. (2010). Perfiles huecos para construcción soldados, conformados en frío de acero no aleado y de grano fino. Parte 1: Condiciones técnicas de suministro.

CEN. Eurocode 3: Design of Steel Structures. Part 1-8: Design of Joints. EN-1993-1-8:2005. European Committee for Standardization; 2005.

Miranda de Oliveria M., Roquete L. Bearing failure in bolted sleeve connections with circular hollow sections under compression. Ouro Preto, 2020