



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior de Jaén

Trabajo Fin de Grado

ANÁLISIS NUMÉRICO DEL COMPORTAMIENTO TRIDIMENSIONAL DE COMPONENTES T-STUB DE

Alumno: David Jesús Ramírez Haro

Tutor: Daniel Carazo Álvarez
Dpto: Ingeniería Mecánica y Minera

Septiembre, 2018



Universidad de Jaén
Escuela Politécnica Superior de Jaén
Departamento de Ingeniería mecánica y minera

Don Daniel Carazo Álvarez, tutor del Trabajo Fin de Grado titulado: Análisis numérico del comportamiento tridimensional de componentes T-stub de uniones estructurales, que presenta David Jesús Ramírez Haro, autoriza su presentación para defensa y evaluación en la Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Jaén, Septiembre de 2018

El alumno:

David Jesús Ramírez Haro

El tutor:

Daniel Carazo Álvarez

Índice

Resumen.....	8
Abstract.....	9
1. Introducción.....	10
2. Revisión Bibliográfica	11
2.1. El modelo T-stub.....	11
2.1.1. Definición del modelo	17
2.1.2. Resistencia y modos de fallos	20
2.1.3. Influencia de las dimensiones del tornillo	23
2.1.4. Rigidez Inicial. Modelo de comportamiento de la T-stub.....	23
2.2. El método de los elementos finitos.....	25
2.3. Correlación Digital de Imágenes.	26
3. Objetivos	28
4. Programa experimental	29
4.1. Objetivo	29
4.2. Descripción del modelo numérico en elementos finitos utilizado	29
4.3. Descripción del programa experimental	35
4.3.1. Descripción de los especímenes	36
4.3.2. Descripción del equipo de medición	40
4.3.3. Procedimiento de ensayo	41
4.4. Ensayo de rotura del modelo T-stub	42
4.5. Análisis de resultados y comparación con el modelo en elementos finitos	52
4.5.1. Mapas de desplazamiento.....	53
4.5.2. Mapas de deformación.....	57
4.5.3. Deformación en el lateral del perfil.	63
4.5.4. Deformación en las caras del alma.	64
4.5.5. Curvas Fuerza-Desplazamiento	68
4.5.6. Modo de fallo.....	74
4.6. Conclusiones	76
5. Estudio Paramétrico	78
5.1. Objetivo	78
5.2. Estudio para un valor λ constante	79
5.3. Estudio para un valor l constante	82
5.4. Estudio de tendencia hacia valores máximos	86
5.5. Conclusiones	88

6.	Conclusiones y propuestas para estudios posteriores	89
7.	Bibliografía	91
8.	Anexo A: Caracterización del material.....	93
8.1.	Objetivo	93
8.2.	Normativas	94
8.3.	Desarrollo experimental	97
8.4.	Resultados.....	99
8.5.	Conclusiones	104
9.	Anexo B: Planos.....	106

Índice de Figuras

Figura 1: Tipos de uniones en una estructura [1].	11
Figura 2: Ejemplo 1 identificación y orientación de la T-stub [5].	12
Figura 3: Ejemplo 2 identificación y orientación de la T-stub [5].	12
Figura 4: Ejemplo 3 identificación y orientación de la T-stub, a partir de los ángulos de asiento [5].	13
Figura 5: Componente T-stub o T equivalente [1].	13
Figura 6: Componentes que forman una unión según EC3 (a) [1].	14
Figura 7: Componentes que forman una unión según EC3 (b) [1].	15
Figura 8: Componentes que forman una unión según EC3 (c) [1].	16
Figura 9: Definición de los parámetros geométricos del modelo T-stub.	17
Figura 10: Modelo de mecanismo de colapso de la T-stub [3].	18
Figura 11: Patrones de plastificación para una fila de tornillos [5].	18
Figura 12: Patrones de plastificación para una más de una fila de tornillos [5].	19
Figura 13: Modos de fallo de la T-stub: a) Modo 1, b) Modo 2 y c) Modo 3 [5].	20
Figura 14: Modelo Fuerza-Desplazamiento propuesto por EC3 [3].	24
Figura 15: Mapa de tensiones en elementos finitos.	25
Figura 16: Principio de funcionamiento del DIC.	26
Figura 17: Desplazamiento obtenido mediante DIC.	27
Figura 18: Probeta tipo hueso con moteado para método DIC.	27
Figura 19: Tornillo modelado en Abaqus.	30
Figura 20: Mitad de un perfil T modelado en Abaqus.	30
Figura 21: Plano rígido modelado en Abaqus.	30
Figura 22: Curva Tensión-Deformación de los aceros del alma y el ala.	31
Figura 23: Captura de los datos de la curva introducidos en Abaqus.	32
Figura 24: Curva bilineal elastoplástica con endurecimiento por deformación.	32
Figura 25: Modelo ensamblado mallado.	34
Figura 26: Mallado del tornillo.	35
Figura 27: Mallado en la zona del tornillo del perfil.	35
Figura 28: Proceso de taladrado sobre la T.	36
Figura 29: Perfil T con los agujeros realizados.	37
Figura 30: Tornillos utilizados en el ensayo de acero inoxidable A2-70.	38
Figura 31: Perfiles T pintadas con moteado.	38
Figura 32: Galgas utilizadas.	39
Figura 33: Probeta con dos galgas extensométricas.	39
Figura 34: Perfil ensamblado en el soporte.	40
Figura 35: Equipo de ensayo.	41
Figura 36: Imagen de referencia (Izquierda) y última imagen (derecha) del ensayo 35.1.	42
Figura 37: Curva Fuerza-Desplazamiento del modelo 35.1.	43
Figura 38: Componentes del modelo 35.1 después del ensayo.	43
Figura 39: Imagen de referencia (Izquierda) y última imagen (derecha) del ensayo 35.2.	44
Figura 40: Curva Fuerza-Desplazamiento del modelo 35.2.	44
Figura 41: Deformación medidas por las galgas del modelo 35.2.	45
Figura 42: Modelo 35.2 montado en el soporte después del ensayo.	45
Figura 43: Componentes del modelo 35.2 después del ensayo.	45
Figura 44: Imagen de referencia (Izquierda) y última imagen (derecha) del ensayo 25.1.	46
Figura 45: Curva Fuerza-Desplazamiento del modelo 25.1.	46
Figura 46: Deformación medidas por las galgas del modelo 25.1.	47
Figura 47: Componentes del modelo 25.1 después del ensayo.	47
Figura 48: Imagen de referencia (Izquierda) y última imagen (derecha) del ensayo 25.2.	48
Figura 49: Curva Fuerza-Desplazamiento del modelo 25.2.	48
Figura 50: Componentes del modelo 25.2 después del ensayo.	49
Figura 51: Imagen de referencia (Izquierda) y última imagen (derecha) del ensayo 15.1.	49
Figura 52: Curva Fuerza-Desplazamiento del modelo 15.1.	50
Figura 53: Deformación medidas por las galgas del modelo 15.1.	50
Figura 54: Componentes del modelo 15.1 después del ensayo.	51
Figura 55: Imagen de referencia (Izquierda) y última imagen (derecha) del ensayo 15.2.	51
Figura 56: Curva Fuerza-Desplazamiento del modelo 15.2.	52
Figura 57: Componentes del modelo 15.2 después del ensayo.	52

Figura 58: Desplazamiento según MEF (izquierda) y DIC (derecha) para el modelo 15.1 en mm.....	53
Figura 59: Desplazamiento según MEF (izquierda) y DIC (derecha) para el modelo 15.2 en mm.....	54
Figura 60: Desplazamiento según MEF (izquierda) y DIC (derecha) para el modelo 25.1 en mm.....	55
Figura 61: Desplazamiento según MEF (izquierda) y DIC (derecha) para el modelo 25.2 en mm.....	55
Figura 62: Desplazamiento según MEF (izquierda) y DIC (derecha) para el modelo 35.1 en mm.....	56
Figura 63: Desplazamiento según MEF (izquierda) y DIC (derecha) para el modelo 35.2 en mm.....	57
Figura 64: Deformación según MEF (izquierda) y DIC (derecha) para el modelo 15.1.....	58
Figura 65: Deformación según MEF (izquierda) y DIC (derecha) para el modelo 15.2.....	58
Figura 66: Deformación según MEF (izquierda) y DIC (derecha) para el modelo 25.1.....	59
Figura 67: Deformación según MEF (izquierda) y DIC (derecha) para el modelo 25.2.....	60
Figura 68: Deformación según MEF (izquierda) y DIC (derecha) para el modelo 35.1.....	60
Figura 69: Deformación según MEF (izquierda) y DIC (derecha) para el modelo 35.2.....	61
Figura 70: Localización de la rótula de plastificación del modelo 15.2 obtenido por el mapa de deformaciones en Abaqus.	62
Figura 71: Imágenes capturadas para el DIC 3D.	63
Figura 72: Mapa de deformación plástica en el ala.	64
Figura 73: Deformación registrada por la galga frontal y los obtenidos por DIC y MEF del modelo 15.1.	64
Figura 74: Deformación registrada por la galga lateral y la obtenida por MEF del modelo 15.1.	65
Figura 75: Deformación registrada por la galga frontal y los obtenidos por DIC y MEF del modelo 25.1.	66
Figura 76: Deformación registrada por la galga lateral y la obtenida por MEF del modelo 25.1.	66
Figura 77: Deformación registrada por la galga frontal y los obtenidos por DIC y MEF del modelo 35.2.	67
Figura 78: Deformación registrada por la galga lateral y la obtenida por MEF del modelo 25.1.	67
Figura 79: Curvas Fuerza-Desplazamiento del modelo 15.1.....	68
Figura 80: Curvas Fuerza-Desplazamiento del modelo 15.2.....	69
Figura 81: Curvas Fuerza-Desplazamiento del modelo 25.1.....	70
Figura 82: Curvas Fuerza-Desplazamiento del modelo 25.2.....	71
Figura 83: Curvas Fuerza-Desplazamiento del modelo 35.1.....	72
Figura 84: Curvas Fuerza-Desplazamiento del modelo 35.2.....	73
Figura 85: Mapa de tensiones (Von Mises) en el tornillo.	74
Figura 86: Deformación plástica en el modelo 35.2. Sección de corte.....	75
Figura 87: Tornillos deformados correspondientes al modelo 25.1 (arriba) y del modelo 35.2 (abajo).	75
Figura 88: Mensaje de error del DIC 3D.	76
Figura 89: Curva Fuerza-Desplazamiento para un ancho disponible de 25 mm. Obtención del valor de la resistencia del modelo.	80
Figura 90: Grafica Fuerza-Ancho disponible según MEF y EC3 para $\lambda \approx 1.25$	80
Figura 91: Grafica Fuerza-Ancho disponible según MEF y EC3 para $\lambda = 1.1$	81
Figura 92: Curva teórica de la fuerza resistente según λ	82
Figura 93: Curva Fuerza Resistente- λ para un ancho de 15 mm.....	83
Figura 94: Nueva curva Fuerza Resistente- λ para un ancho de 15 mm.	84
Figura 95: Curva Fuerza Resistente- λ para un ancho de 25 mm.....	84
Figura 96: Curva Fuerza Resistente- λ para un ancho de 35 mm.....	85
Figura 97: Curva Fuerza Resistente- λ para un ancho de 42 mm.....	86
Figura 98: Curva Fuerza Resistente- λ con tendencia a valores máximos.....	87
Figura 99: Curvas Fuerza-Desplazamiento para distintos valores de n.	88
Figura 100: Curvas Fuerza-Desplazamiento para todas las curvas del Estudio 1.....	89
Figura 101: Localización de las probetas para los ensayos de tracción para perfiles [15].....	94
Figura 102: Dimensiones probeta tipo hueso del Ala.....	95
Figura 103: Dimensiones probeta tipo hueso del Alma.....	95
Figura 104: Probetas del ala mecanizadas.....	95
Figura 105: Probetas del alma mecanizadas.....	95
Figura 106: Geometría de las probetas [14].....	96
Figura 107: Equipo de ensayo.....	97
Figura 108: Probetas del alma pintadas.	98
Figura 109: Probetas del ala pintadas.	98
Figura 110: Probeta del alma después del ensayo.	99

Figura 111: Probeta después del ensayo con pintura despegada.	99
Figura 112: Imagen de referencia de la probeta Ala 1.....	100
Figura 113: Parámetros del análisis en VIC-2D	101
Figura 114: Curva Tensión-Deformación para distintas máscaras.	102
Figura 115: Curva Tensión-Deformación de las probetas del Ala.....	102
Figura 116: Curva Tensión-Deformación de las probetas del Alma.....	103
Figura 117: Curva Tensión-Deformación de los aceros del alma y el ala	104

Índice de Tablas

Tabla 1: Diámetro d_0 del agujero en función del diámetro d del tornillo.....	20
Tabla 2: Valores de módulo de elasticidad y de Poisson introducidos en Abaqus	32
Tabla 3: Dimensiones en mm de los distintos modelos T-stub para el ensayo experimental	37
Tabla 4: Propiedades mecánicas del acero inoxidable A2-70.	37
Tabla 5: Valores de c obtenidos del modelo 15.2	62
Tabla 6: Valores de c obtenidos con modelos de distinto ancho efectivo.	63
Tabla 7: Valores de resistencia y rigidez inicial del modelo 15.1.	69
Tabla 8: Valores de resistencia y rigidez inicial del modelo 15.2.	70
Tabla 9: Valores de resistencia y rigidez inicial del modelo 25.1.	71
Tabla 10: Valores de resistencia y rigidez inicial del modelo 25.2.	72
Tabla 11: Valores de resistencia y rigidez inicial del modelo 35.1.	73
Tabla 12: Valores de resistencia y rigidez del modelo 31.2.	74
Tabla 13: Resistencia de todos los modelos.	78
Tabla 14: Rigidez inicial de todos los modelos.....	78
Tabla 15: Valores constantes para el Estudio 1 (λ constante)	79
Tabla 16: Valores constantes para el Estudio 2 (λ constante)	81
Tabla 17: Valores constantes para el Estudio 3 (l constante).....	82
Tabla 18: Valores constantes para el Estudio 4 (l constante).....	84
Tabla 19: Valores constantes para el Estudio 5 (l constante).....	85
Tabla 20: Valores constantes para el Estudio 6 (l constante).....	85
Tabla 21: Dimensiones finales de las probetas tipo hueso.	96
Tabla 22: Valores teóricos (mínimos) del acero S275.	97
Tabla 23: Propiedades mecánicas obtenidas.	104

Resumen

A día de hoy, y según la normativa vigente, las propiedades de uniones de estructuras metálicas se calculan dividiendo la unión en diferentes componentes básicas que se caracterizan por separado y se ensamblan posteriormente. Esta unión queda, en la práctica, definida por el componente T-stub (o T equivalente), cuyas propiedades se establecen a partir de las propiedades mecánicas de los materiales y la geometría frontal.

En el presente trabajo se estudia el comportamiento tridimensional del T-stub mediante métodos numéricos, el cual queda simplificado, según la normativa, a la adopción de un valor de longitud efectiva en función de los posibles criterios de plastificación en el ala. Se emplea un modelo numérico para indagar sobre los límites de los distintos criterios de plastificación, la relación con los diferentes parámetros geométricos del componente T-stub y la precisión de la formulación propuesta por la normativa vigente.

Para la construcción del modelo y la realización de las simulaciones se emplea el software Abaqus, modificando parámetros dimensionales como el ancho o la posición del tornillo, y manteniendo constantes el resto de variables geométricas y las propiedades del material. Todo ello se plasmó en un estudio paramétrico.

Además, se desarrolló un programa experimental para la validación del modelo utilizado que consistió en dos partes: una caracterización de material que determinó las propiedades mecánicas a introducir en el modelo numérico y un programa donde se ensayó varios modelos T-stub usando el sistema DIC-2D para medir los desplazamientos y las deformaciones. Los resultados de los ensayos de las T-stub se compararon con los resultados de los mismos modelos pero en elementos finitos.

Abstract

Today, and according to current regulations, the properties of metallic structures are calculated by dividing the joint into different basic components that are separately characterized and subsequently assembled. This union is, in practice, defined by the T-stub component, the properties are established from the mechanical properties of the materials and the frontal geometry.

In the present work, the three-dimensional behavior of the T-stub was studied by numerical methods. The three-dimensional behavior of the T-stub component is simplified to the adoption of an effective length value based on the possible yield line mechanisms in the wing. The limits of the different plasticizing criteria, the relation with the different geometrical parameters of the component and the precision of the formulation proposed by the current regulations were sought.

For this, a numerical model in finite elements was built using Abaqus software. Different simulations were made modifying dimensional parameters such as the width or the position of the bolt keeping the rest of the geometric variables and the properties of the material. All that is reflected in a parametric study.

In addition, it became an experimental program for the validation of the model used which consisted of two parts: a material characteristic that determines the mechanical properties in the numerical model and a program where several T-stub models using the DIC-2D system to measure displacements and deformations were tested. The results of the tests were compared with the results of the same models but in the finite elements.

1. Introducción

El uso de estructuras de acero atornilladas es muy habitual en construcción y cada vez es más utilizada frente a las estructuras soldadas debido a la rapidez de ensamblaje de los elementos. Las uniones de dichas estructuras son una parte crítica y presentan un comportamiento complejo debido a que es un conjunto de varios elementos de diferentes geometrías y materiales. En Europa, las uniones de elementos estructurales de acero se rigen por el Eurocódigo 3-Diseño de Estructuras metálicas (EC3) Parte 1-8: Diseño de Uniones [1]. En España, esta norma ha sido adaptada a través de la Instrucción de Acero Estructural del año 2011 [2].

Para establecer las propiedades de una unión, el componente utilizado principalmente es la T equivalente o T-stub, componente ampliamente estudiado en las últimas décadas, para el cual se han desarrollado modelos, utilizando distintitos materiales y aplicando distintas metodologías de ensayo, como por ejemplo, el uso de la simulación mediante elementos finitos.

La técnica de simulación más utilizada a la hora de resolver problemas ingenieriles es el método de los elementos finitos. Esta técnica ha evolucionado a lo largo de los últimos años gracias la mejora de los algoritmos y sobre todo al desarrollo de computación debido a la potencia de cálculo requerida para su resolución.

El método permite obtener una solución aproximada en un dominio original que es sustituido por un dominio discretizado según la malla de elementos y nodos. Para aproximar los valores en cada nodo se utiliza una formulación matricial, empleando funciones de forma, aplicando continuidad de desplazamientos en los nodos y considerando las restricciones o condiciones de contorno del problema [3].

Son muchos los autores que han aplicado MEF en sus estudios [3] [4] [6] [9], por lo tanto, existe bibliografía de donde partir para el desarrollo de este trabajo. Además, existen diversos programas informáticos para procesado y post-procesado de datos, los utilizados en el presente trabajo son ABAQUS CAE 6.12 y HIPERVIEW 2017.

2. Revisión Bibliográfica

2.1. El modelo T-stub

Según el EC3 [1], una unión en una estructura es una zona en la que dos o más elementos son interconectados. Desde el punto de vista del diseño, la unión es el ensamblaje de todos los componentes básicos necesarios para representar su comportamiento durante la transmisión de esfuerzos entre los elementos conectados.

En una estructura de acero, normalmente compuesta por vigas y columnas de perfiles laminados en I o H, se pueden presentar en diferentes tipos de uniones según los elementos que se conectan [3]:

- Unión viga-columna de un solo lado (1)
- Unión viga-columna a dos caras (doble) (2)
- Empalme de viga (3)
- Empalme de columna (4)
- Base de columna (5)

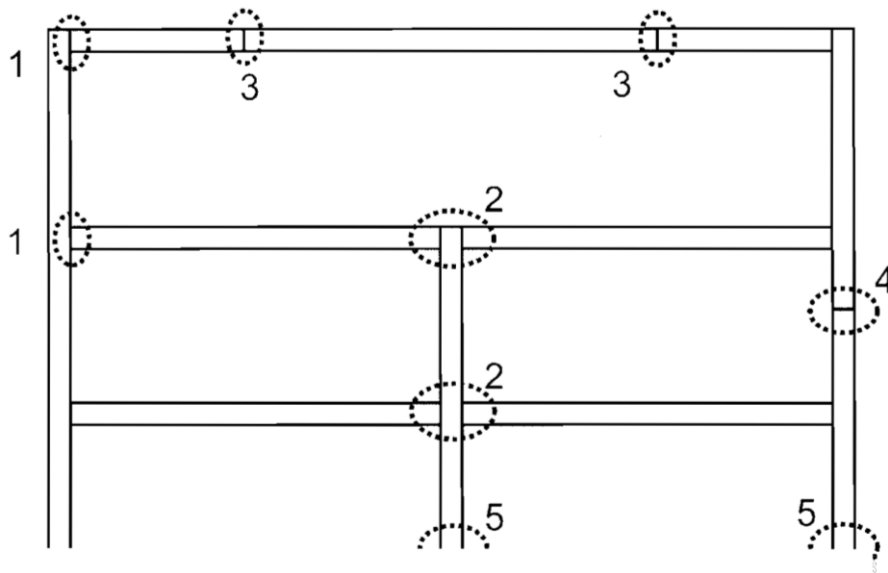


Figura 1: Tipos de uniones en una estructura [1].

Para el estudio de las uniones se utiliza el método de las componentes, donde uno de esos métodos que menciona el EC3 es el modelo T-stub.

El modelo T-stub es el modelo más utilizado para establecer las propiedades de una unión atornillada viga-columna. Existen diversos estudios sobre este modelo pero para este trabajo se usará el modelo T-stub según el Eurocódigo 3 [1].

El modelo T-stub consiste en dos elementos en T unidos por sus alas mediante una o más filas de tornillos. Este enfoque fue utilizado por Yee y Melchers para desarrollar un método para predecir la curva momento-rotación de las conexiones en chapa de testa. A continuación se pueden ver ejemplos en las Figura 2, Figura 3 y Figura 4; de identificación y orientación del T-stub en las uniones viga-columna [5].

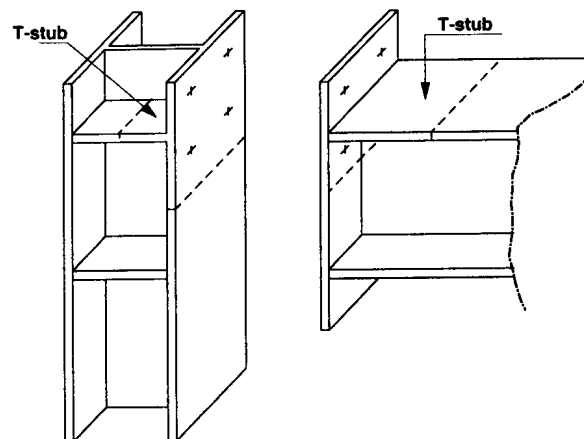


Figura 2: Ejemplo 1 identificación y orientación de la T-stub [5].

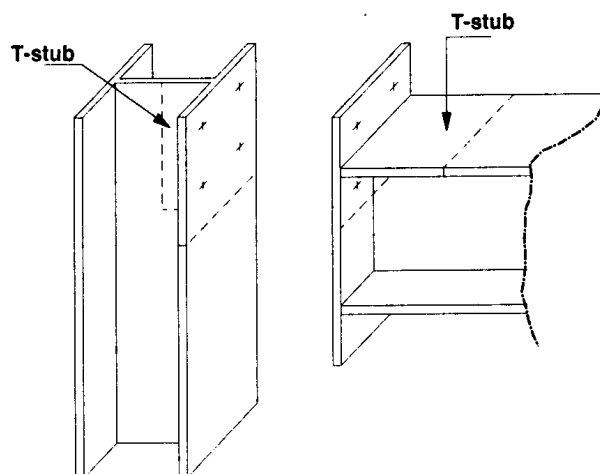


Figura 3: Ejemplo 2 identificación y orientación de la T-stub [5].

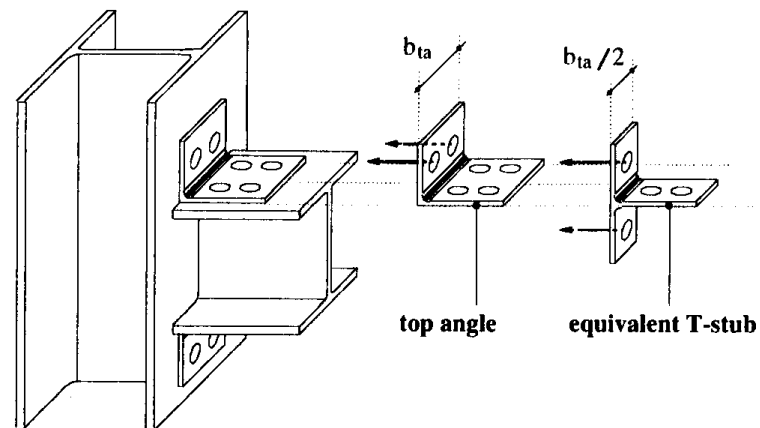


Figura 4: Ejemplo 3 identificación y orientación de la T-stub, a partir de los ángulos de asiento [5].

El resultado de la obtención de la T-stub queda ejemplarizada en la Figura 4.

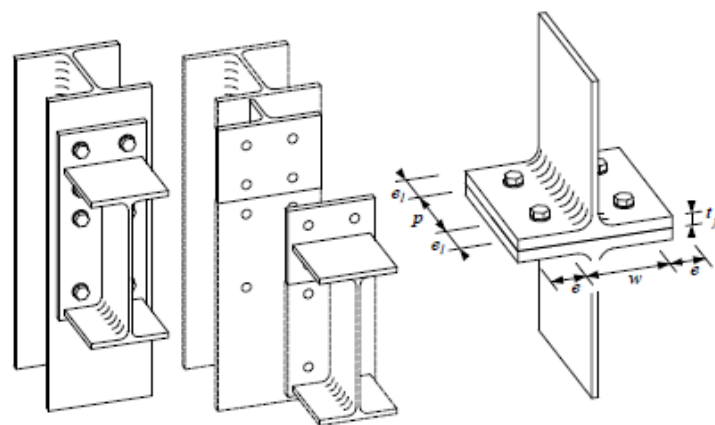


Figura 5: Componente T-stub o T equivalente [1].

Como se ha mencionado anteriormente, para el presente trabajo se estudiará el modelo T-stub según el Eurocódigo 3. Según dicha normativa, el comportamiento de algunos componentes que forman la unión estructural se estudia mediante este modelo. Estas componentes son la 4, 5, 6, 14 y 15; definidas en las Figuras 4, 5 y 6 [1]:

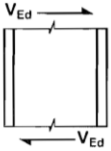
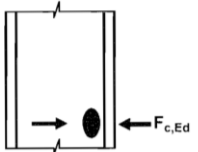
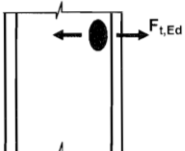
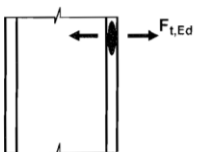
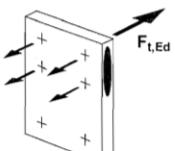
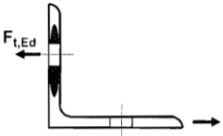
Component			Reference to application rules		
			Design Resistance	Stiffness coefficient	Rotation capacity
1	Column web panel in shear		6.2.6.1	6.3.2	6.4.2 and 6.4.3
2	Column web in transverse compression		6.2.6.2	6.3.2	6.4.2 and 6.4.3
3	Column web in transverse tension		6.2.6.3	6.3.2	6.4.2 and 6.4.3
4	Column flange in bending		6.2.6.4	6.3.2	6.4.2 and 6.4.3
5	End-plate in bending		6.2.6.5	6.3.2	6.4.2
6	Flange cleat in bending		6.2.6.6	6.3.2	6.4.2

Figura 6: Componentes que forman una unión según EC3 (a) [1].

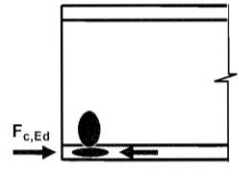
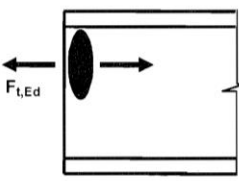
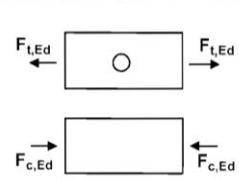
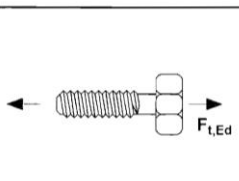
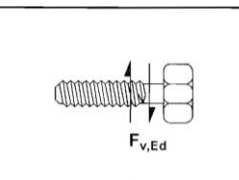
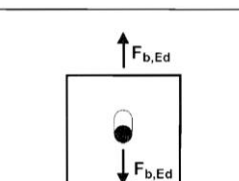
Component			Reference to application rules		
			Design Resistance	Stiffness coefficient	Rotation capacity
7	Beam or column flange and web in compression		6.2.6.7	6.3.2	*)
8	Beam web in tension		6.2.6.8	6.3.2	*)
9	Plate in tension or compression		in tension: - EN 1993-1-1 in compression: - EN 1993-1-1	6.3.2	*)
10	Bolts in tension		With column flange: - 6.2.6.4 with end-plate: - 6.2.6.5 with flange cleat: - 6.2.6.6	6.3.2	$\boxed{AC_2}$ 6.4.2 $\boxed{AC_2}$
11	Bolts in shear		3.6	6.3.2	6.4.2
12	Bolts in bearing (on beam flange, column flange, end-plate or cleat)		3.6	6.3.2	*)

Figura 7: Componentes que forman una unión según EC3 (b) [1].

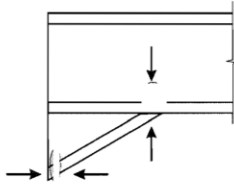
Component			Reference to application rules		
			Design Resistance	Stiffness coefficient	Rotation capacity
13	Concrete in compression including grout		6.2.6.9	6.3.2	*)
14	Base plate in bending under compression		6.2.6.10	6.3.2	*)
15	Base plate in bending under tension		6.2.6.11	6.3.2	*)
16	Anchor bolts in tension		6.2.6.12	6.3.2	*)
17	Anchor bolts in shear		6.2.2	*)	*)
18	Anchor bolts in bearing		6.2.2	*)	*)
19	Welds		4	6.3.2	*)
20	Haunched beam		6.2.6.7	6.3.2	*)

Figura 8: Componentes que forman una unión según EC3 (c) [1].

2.1.1. Definición del modelo

El modelo T-stub se define mediante sus dos elementos T unidos mediante dos tornillos por las alas. Los parámetros geométricos quedan definidos según la Figura 9.

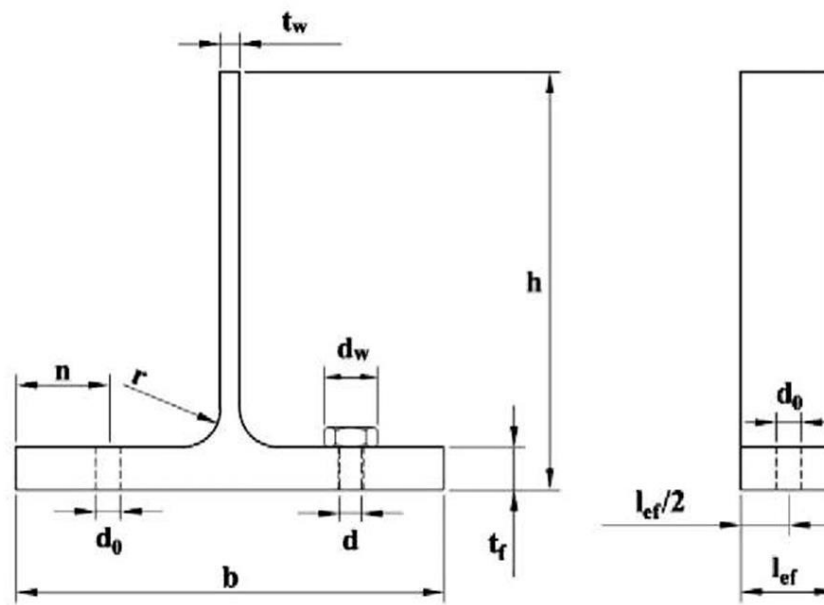


Figura 9: Definición de los parámetros geométricos del modelo T-stub.

Las dimensiones del perfil son: base b , altura h , espesor del alma t_w , espesor del ala t_f y radio r . El parámetro n define la posición del tornillo a lo largo del ala respecto al borde de esta. El sobre el modelo se ejerce una fuerza de tracción sobre el alma del perfil F_T .

El modelo de colapso de un T-stub establece la formación de rotulas plásticas localizadas en la posición donde se ejerza una fuerza: en la posición del tornillo y en el encuentro del ala con el alma (debido al esfuerzo axial en el alma, a la reacción de los tornillos y a las fuerzas de contacto en los extremos de las alas), aunque estas rotulas no tienen por qué aparecer siempre, se hace necesario prever la localización de las rótulas. La localización de la rótula plástica en el encuentro ala-alma se establece mediante el parámetro m (Figura 10) que es la distancia entre la rótula plástica y la posición del tornillo. Este parámetro queda asumido, según el EC3 [1]:

$$m = \frac{b}{2} - \frac{t_w}{2} - n - 0.8 \cdot r \quad (1)$$

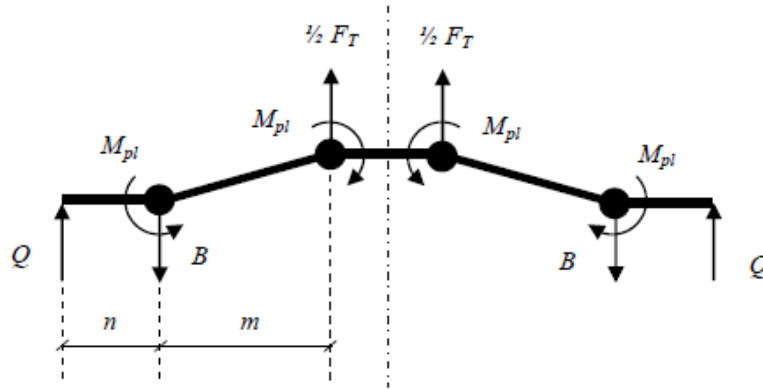


Figura 10: Modelo de mecanismo de colapso de la T-stub [3].

La relación entre m y n se llama λ y debe cumplir, según el Eurocódigo 3:

$$\lambda = \frac{n}{m} \leq 1.25 \quad (2)$$

La longitud efectiva l_{ef} representa el ancho de ala que contribuye a la transmisión de esfuerzos [3]. No debe confundirse con el ancho disponible l que es el ancho del que se dispone en realidad en la unión. La longitud efectiva depende de varios factores. Si disponemos de una fila de tornillos, existirán tres criterios de plastificación alrededor del agujero del tornillo:

- a) Patrón circular: $l_{ef,1} = 2 \cdot \pi \cdot m$
- b) Patrón no circular: $l_{ef,2} = 4 \cdot m + 1.25 \cdot n$
- c) Patrón de viga: $l_{ef,3} = l$ (ancho disponible)

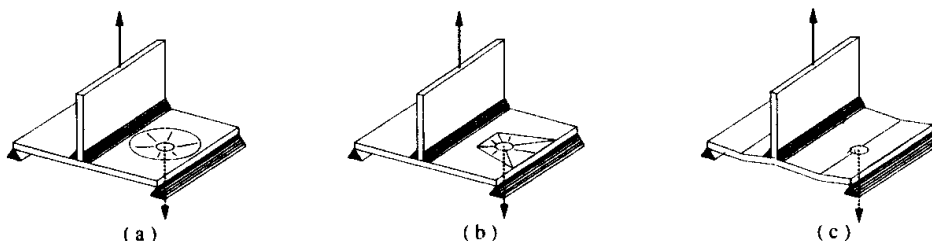


Figura 11: Patrones de plastificación para una fila de tornillos [5].

Se utiliza como longitud efectiva la menor de estas tres longitudes efectivas.

$$l_{ef} = \min\{l_{ef,1}, l_{ef,2}, l_{ef,3}\} \quad (3)$$

Si tenemos más de una fila de tornillos dependerá, adicionalmente, del paso entre tornillos p para presentarse de forma agrupada o individual. Los casos son:

- a) Patrón de viga: $l_{ef,3} = l$
- b) Patrón circular individual: $l_{ef,4} = 2 \cdot \pi \cdot m$
- c) Patrón circular agrupado: $l_{ef,5} = \pi \cdot m + 0.5 \cdot p$
- d) Patrón no circular individual: $l_{ef,6} = 4 \cdot m + 1.25 \cdot n$
- e) Patrón no circular agrupado: $l_{ef,7} = 2 \cdot m + 0.625 \cdot n + 0.5 \cdot p$

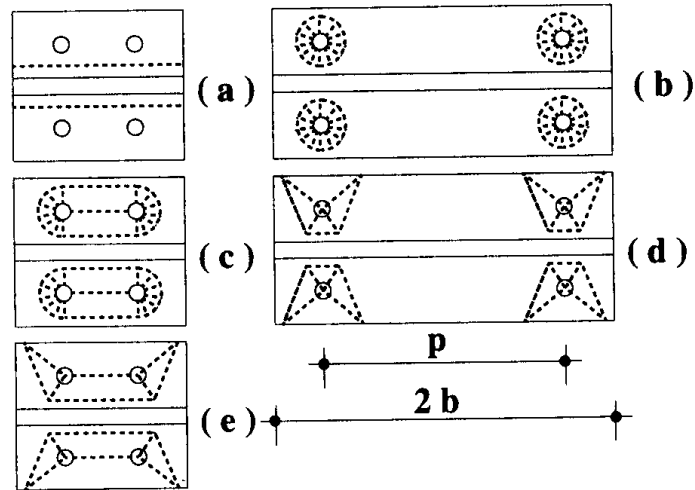


Figura 12: Patrones de plastificación para una más de una fila de tornillos [5].

De todas estas longitudes, se utilizará como longitud efectiva la menor de todas

$$l_{ef} = \min\{l_{ef,3}, l_{ef,4}, l_{ef,5}, l_{ef,6}, l_{ef,7}\} \quad (4)$$

El tornillo se define por su diámetro d y el diámetro de la cabeza d_w . El diámetro del agujero d_o se calcula, según la norma EN 1090-2:2008 [17], en función de d , reflejadas en la Tabla 1:

d	d_0
$d \leq 14 \text{ mm}$	$d + 1 \text{ mm}$
$14 \text{ mm} \leq d \leq 27 \text{ mm}$	$d + 2 \text{ mm}$
$d \leq 14 \text{ mm}$	$d + 3 \text{ mm}$

Tabla 1: Diámetro d_0 del agujero en función del diámetro d del tornillo

2.1.2. Resistencia y modos de fallos

La resistencia del modelo T-stub dependerá del modo de fallo que se presente, y este dependerá de los parámetros geométricos y del material del perfil y del tornillo. Para determinar la resistencia del modelo primero debe definirse la resistencia para cada uno de los posibles modos de fallo.

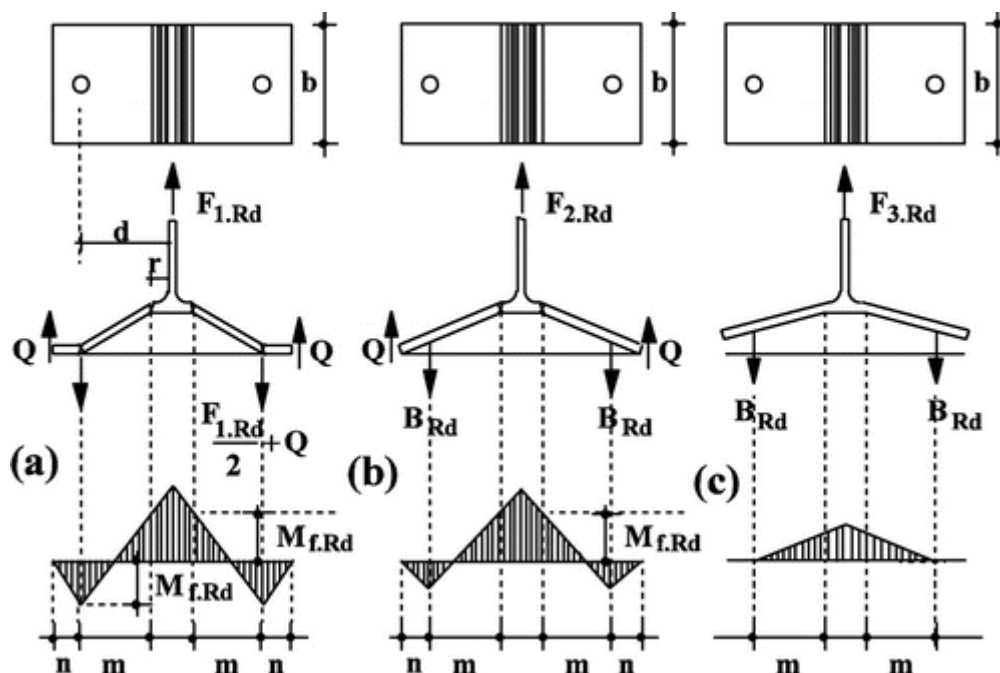


Figura 13: Modos de fallo de la T-stub: a) Modo 1, b) Modo 2 y c) Modo 3 [5].

- **Modo 1: Mecanismo de ruina flexible**

Se forman rotulas plásticas en el perfil, dos en la posición de los tornillos y las otras dos en el encuentro del ala con el alma, provocando el colapso del modelo. El fallo ocurre cuando se supera el momento resistente $M_{f,Rd}$ de la sección del ala en estas rotulas, este valor está definido:

$$M_{f,Rd} = f_y \cdot W_{pl,1} = \frac{f_y \cdot l_{ef,1} \cdot t_f^2}{4} \quad (5)$$

Dónde:

- W_{pl} es el modulo resistente plástico del ala
- f_y es el limite elástico del acero del perfil

Aplicando ecuaciones de equilibrio al modelo:

$$\sum F_V = 0 \rightarrow B = Q + \frac{F_{1,Rd}}{2} \quad (6)$$

$$\sum M = M_{f,Rd} \rightarrow B \cdot m - Q \cdot (n + m) = M_{f,Rd} \quad (7)$$

$$\sum M = M_{f,Rd} \rightarrow Q \cdot n = M_{f,Rd} \quad (8)$$

Dónde:

- B es la fuerza de reacción del tornillo
- Q es la fuerza de contacto en el extremo de las alas
- F_{Rd} es la resistencia de la T-stub, coincidente con la fuerza de tracción que se aplica al modelo en el alma

A partir de (7) y (8) se puede despejar B :

$$B = \frac{2 \cdot n + m}{m \cdot n} \cdot M_{f,Rd} \quad (9)$$

A partir de (9) y (6) se puede despejar $F_{1,Rd}$:

$$F_{1,Rd} = \frac{4 \cdot M_{f,Rd}}{m} = \frac{f_y \cdot l_{ef,1} \cdot t_f^2}{m} \quad (10)$$

- **Modo 2: Mecanismo de ruina semirrígido**

Se forman dos rotulas plásticas en el encuentro del ala con el alma. El fallo ocurre en el tornillo. Aplicando las ecuaciones de equilibrio al modelo:

$$\sum F_V = 0 \rightarrow B_{Rd} = Q + \frac{F_{2,Rd}}{2} \quad (11)$$

$$\sum M = M_{f,Rd} \rightarrow B_{Rd} \cdot m - Q \cdot (n + m) = M_{f,Rd} \quad (12)$$

$$\sum M = M_{f,Rd} \rightarrow Q \cdot n = M_{f,Rd} \quad (13)$$

Dónde B_{Rd} es la resistencia plástica del tornillo, siendo igual a la fuerza del tornillo debido a que en este modo se rompe el tornillo.

$$B_{Rd} = \frac{0.9 \cdot f_{u,b} \cdot A_s}{\gamma_{M2}} \quad (14)$$

Dónde:

- $f_{u,b}$ es el límite elástico del acero
- A_s es el área efectiva del tornillo a tracción
- γ_{M2} es el coeficiente de seguridad sobre la resistencia. Este valor adquiere el valor recomendado en el Eurocódigo 2 o en las normas nacionales. En España, el valor adoptado por la EAE [2] es 1.25.

Al igual que en el modo anterior, se obtiene la fuerza resistente $F_{2,Rd}$

$$F_{1,Rd} = \frac{2 \cdot M_{f,Rd} + 2 \cdot n \cdot B_{Rd}}{m + n} = \frac{\frac{1}{2} \cdot f_y \cdot l_{ef} \cdot t_f^2 + 2 \cdot n \cdot B_{Rd}}{m + n} \quad (15)$$

- **Modo 3: Mecanismo de ruina rígido.**

La rotura se produce por el fallo de los tornillos antes de que exista plastificación en el perfil. La resistencia del modelo $F_{3,Rd}$ será por tanto la suma de la resistencia de los tornillos.

$$F_{3,Rd} = \sum B_{Rd} \quad (16)$$

Una vez calculadas las resistencias en cada modo, la resistencia del modelo se determina tomando la menor de las tres resistencias.

$$F_{T,Rd} = \min\{F_{1,Rd}, F_{2,Rd}, F_{3,Rd}\} \quad (17)$$

Existe un posible cuarto modo de fallo correspondiente al desgarro por cortante en la zona de la cabeza del tornillo o en su defecto, la tuerca. Viene dada por

$$F_{4,Rd} = 2 \cdot \pi \cdot d_w \cdot \tau_{y,f} \cdot t_f \quad \text{Donde} \quad \tau_{y,f} = \frac{f_{y,f}}{\sqrt{3}} \quad (18)$$

Para el presente trabajo no se va a considerar este cuarto modo de fallo.

2.1.3. Influencia de las dimensiones del tornillo

Hasta ahora, no se ha tenido en cuenta la acción del tornillo en la zona de contacto entre la cabeza del tornillo y el ala. Considerarlas modifica la resistencia del modelo en los modos 1 y 2. Para el presente trabajo se va a despreciar dichos efectos pero el EC3 reconoce estos efectos y los denomina método 2 o alternativo.

2.1.4. Rigidez Inicial. Modelo de comportamiento de la T-stub

Para estudiar la rigidez inicial del modelo T-stub es necesario estudiar el comportamiento elástico de la unión. Para ello, el modelo se simplifica a una barra apoyada en los extremos a la que se le aplica una fuerza de tracción en el centro, correspondiente a la fuerza de tracción aplicada a la T; y dos fuerzas, correspondientes a las reacciones de los tornillos, colocadas en el eje de los tornillos.

Aplicando la teoría de flexión se obtiene el desplazamiento vertical Δ . La rigidez es la fuerza ejercida dividida entre el desplazamiento. La rigidez inicial k_0 se obtiene a partir de la rigidez del elemento T $k_{0,T}$ y la rigidez del tornillo $k_{b,0}$. La rigidez inicial queda definida por:

$$k_0 = \frac{1}{\frac{1}{k_{b,0}} + \frac{1}{k_{0,T}}} \quad (19)$$

$$k_{b,0} = \frac{F}{\Delta_{b,0}} \approx 1.6 \cdot \frac{E \cdot A_s}{L_b} \quad (20)$$

$$k_{0,T} = \frac{F}{\Delta_{e,0}} \approx \frac{1}{2} \cdot \frac{E \cdot l'_{ef} \cdot t_f^3}{m^3} \quad (21)$$

Dónde:

- $\Delta_{b,0}$ es el desplazamiento elástico del tornillo.
- $\Delta_{e,0}$ es el desplazamiento total en el centro del modelo T-stub.
- E es el módulo de elasticidad.
- A_s es el área efectiva del tornillo a tracción.
- L_b es la longitud de elongación del tornillo.
- l'_{ef} es la longitud efectiva para la rigidez del modelo T-stub, siendo
 $l'_{ef} = 0.93 \cdot l_{ef}$

Para definir el comportamiento de la T-stub se utiliza la curva Fuerza-Desplazamiento. A pesar de conocer la fuerza resistente $F_{T,Rd}$, esta curva es compleja y difícil de modelar, por eso se hace necesario buscar una simplificación. El Eurocódigo 3 propone una curva bilineal elástico-plástico puro [1], con un régimen elástico que tiene de pendiente la rigidez inicial k_0 un régimen plástico puro de valor $F_{T,Rd}$.

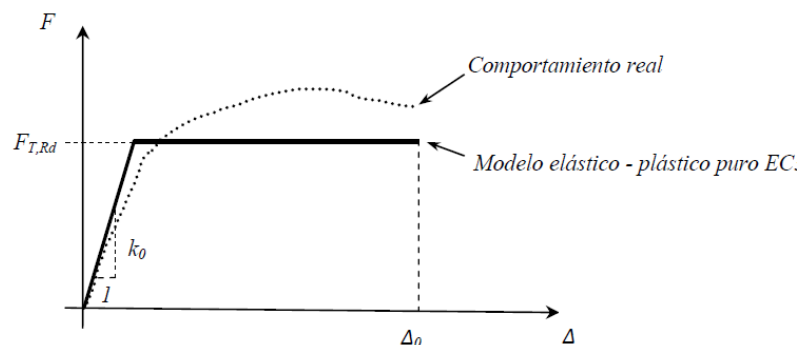


Figura 14: Modelo Fuerza-Desplazamiento propuesto por EC3 [3].

2.2. El método de los elementos finitos

El método de los elementos finitos (Finite element modeling o FEM, MEF abreviado en español) es un método numérico para la aproximación de soluciones de ecuaciones diferenciales parciales muy complejas [7]. Este método permite obtener soluciones numéricas aproximadas (no exactas) sobre medio continuo. Mediante un proceso de discretización (mallado), se divide el problema en un número finito de subdominios que da lugar al nombre del método: elementos finitos. Estos elementos se representan mediante unos puntos llamados nodos.

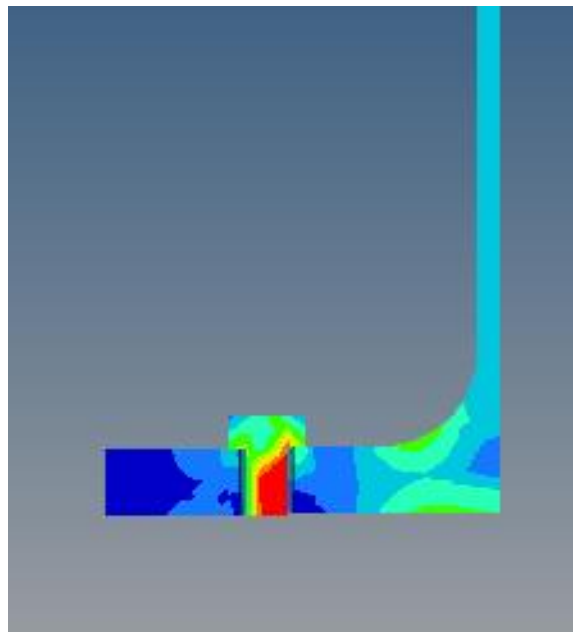


Figura 15: Mapa de tensiones en elementos finitos.

Aunque este método se desarrolló a mediados del siglo XX, ha sido en los últimos años debido al avance de la tecnología de la computación y de la simplificación de los algoritmos ya que este método tiene un gasto computacional elevado ya que requiere la resolución de ecuaciones matriciales de gran dimensión.

El análisis mediante este método se puede dividir en varias etapas [3]:

- Preprocesado: definición de la geometría y de las propiedades de los materiales a intervenir, generación de la malla e implementación de condiciones de contorno.

- Procesado: Cálculo de la matriz y definición del sistema de ecuaciones. Se obtiene el desplazamiento de los nodos.
- Posprocesado: a partir de los desplazamientos, obtención y visualización del resto de variables

A día de hoy, es uno de los métodos más empleados en la simulación de problemas ingenieriles en comparación con otros métodos numéricos. Además es un método muy estudiado y desarrollado, por lo tanto, existen diversos programas informáticos capaces de procesar este método.

2.3. Correlación Digital de Imágenes.

El método DIC (*Digital Image Correlation*), traducido, Correlación Digital de Imágenes, es un método óptico de cálculo de desplazamientos y deformaciones a través de una serie de imágenes tomadas durante el ensayo. Este método identifica un pixel (o una serie de ellos) en una imagen de referencia y lo sigue a lo largo de las distintas imágenes obteniendo un desplazamiento y por tanto, una deformación.

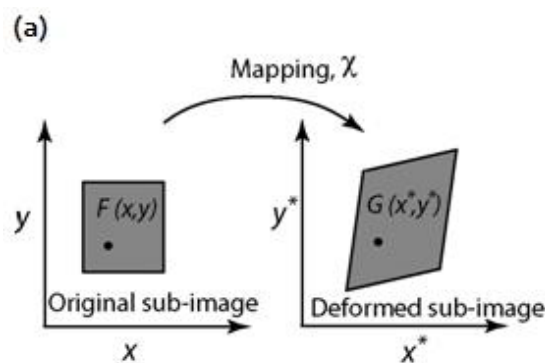


Figura 16: Principio de funcionamiento del DIC.

Esta técnica ya se utilizaba en imágenes digitales en los años 70, pero no fue hasta los años 80 cuando desarrolladores de la Universidad de Carolina del Sur utilizaron la técnica del DIC en el campo de la mecánica [8].

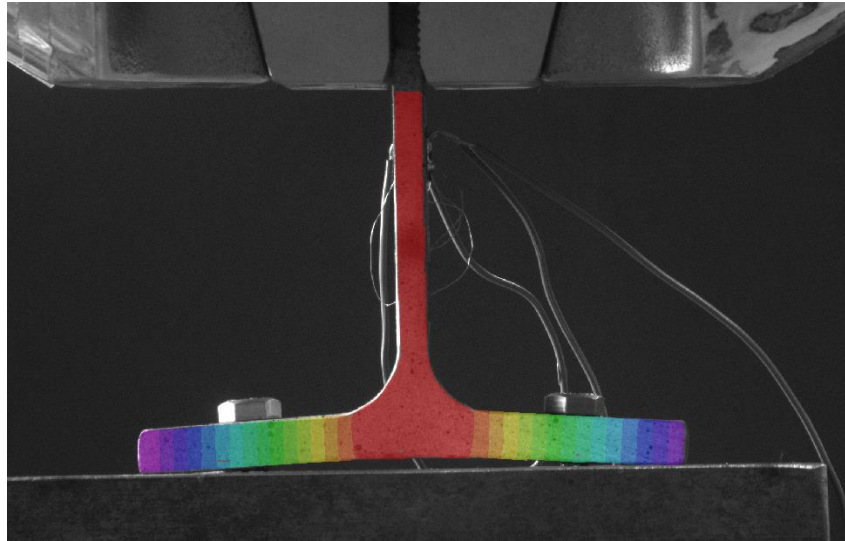


Figura 17: Desplazamiento obtenido mediante DIC

Es una técnica empleada para el cálculo de deformaciones, tanto en 2D como en 3D. Una de las ventajas de este método es que apenas es intrusivo, lo único que hay que realizar sobre la pieza a estudiar es una preparación de la superficie para el correcto funcionamiento del método. Par el presente trabajo, la superficie a estudiar deberá motearse en blanco y negro.

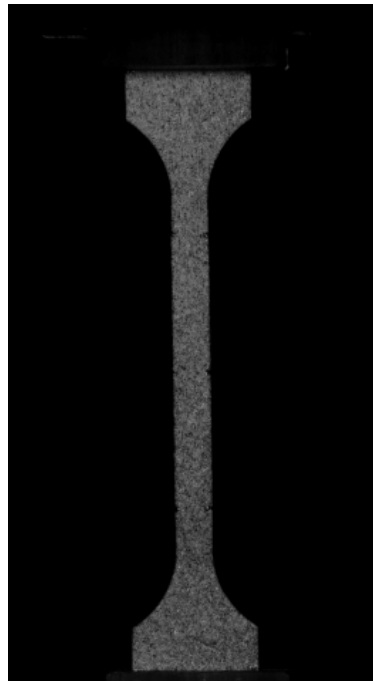


Figura 18: Probeta tipo hueso con moteado para método DIC

3. Objetivos

El objetivo principal del presente Trabajo de Fin de Grado es el estudio de la T equivalente o T-stub utilizando para ello el método de los elementos finitos (MEF). Para ello se va a crear un modelo utilizando el programa comercial Abaqus [11], de la compañía *Dassault Systèmes*.

Se pretende diseñar un programa experimental que pretenda comparar resultados y validar el modelo en elementos finitos. Este programa consiste ensayar a tracción 6 modelos T-stub con distintos anchos efectivos utilizando la Correlación Digital de Imágenes (DIC) para la obtención de los desplazamientos así como los mapas de deformación en el frontal del perfil usando DIC 2D y en la zona próxima al tornillo, en el lateral del perfil usando DIC 3D. Para ello se utilizarán dos programas comerciales, VIC-2D 6 para DIC 2D y VIC-3D 2012 para DIC 3D; ambos de la misma compañía “*Correlated Solutions*” [12][13].

Como complemento del programa experimental se diseña un programa de ensayo para la caracterización mecánica del acero del perfil con el fin de poder implementarlo en MEF como propiedad del material. Se pretende utilizar DIC para registrar con precisión la deformación de la probeta.

Por último, se diseña un estudio paramétrico que consiste en simular en Abaqus distintos modelos T-stub para comparar los valores de resistencia obtenidos con los obtenidos por la norma (EC3) y analizar su variación en función de alguna de las variables geométricas del modelo, en concreto la influencia sobre el comportamiento tridimensional y el patrón de plastificación en el ala.

4. Programa experimental

4.1. Objetivo

El objetivo principal es el ensayo de varios perfiles en forma de T que formen un modelo T-stub y utilizar los datos obtenidos para validar un modelo numérico en elementos finitos. Este modelo numérico se pretende utilizar para un estudio paramétrico, por lo que su validación es fundamental. Para complementar el programa experimental, se hace necesaria la caracterización mecánica a través del ensayo de tracción del acero que conforma el perfil T (ala y alma). Estas propiedades mecánicas servirán para caracterizar el material en el modelo numérico. La caracterización mecánica se describirá en el Anexo A.

4.2. Descripción del modelo numérico en elementos finitos utilizado

Para construir el modelo en elementos finitos se hace necesario mirar trabajos anteriores donde utilizasen elementos finitos para estudiar los parámetros a tener en cuenta y sus recomendaciones. En este trabajo se partirá del modelo propuesto por Juan José Jiménez de Cisneros [6] y será modificado a tenor del objetivo propuesto.

En general, se trata de un modelo 3D compuesto por tres componentes.

- Perfil T simplificado aplicando simetría respecto al eje vertical, lo que se traduce en imponer sobre ella determinadas condiciones de contorno. Destacar la diferenciación entre el alma y el ala para la asignación posterior del material.
- Tornillo de cabeza redondea que entra en un agujero realizado sobre la T con una tolerancia de 1mm.
- Plano rígido. Se trata de un soporte o base infinitamente rígida, cuerpo analítico donde todos sus nodos están restringidos.

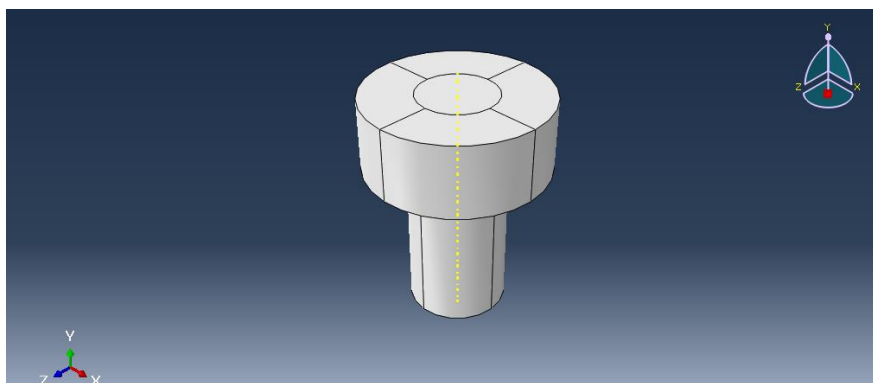


Figura 19: Tornillo modelado en Abaqus

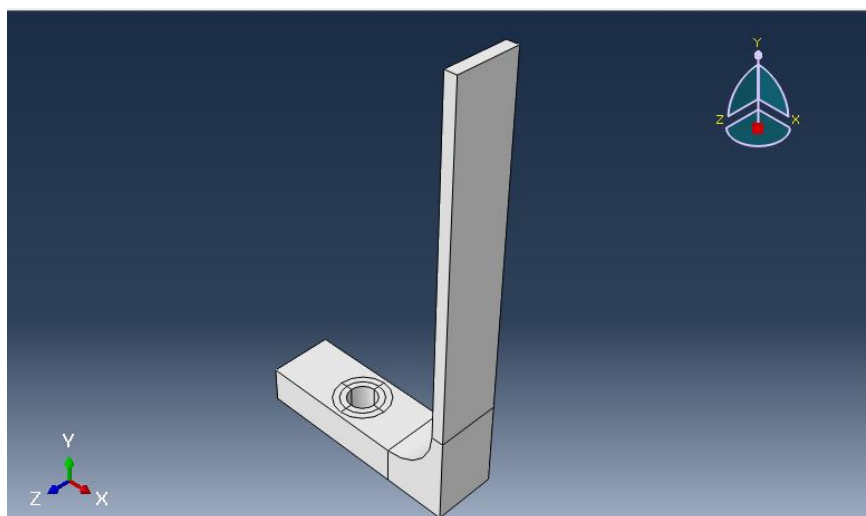


Figura 20: Mitad de un perfil T modelado en Abaqus.

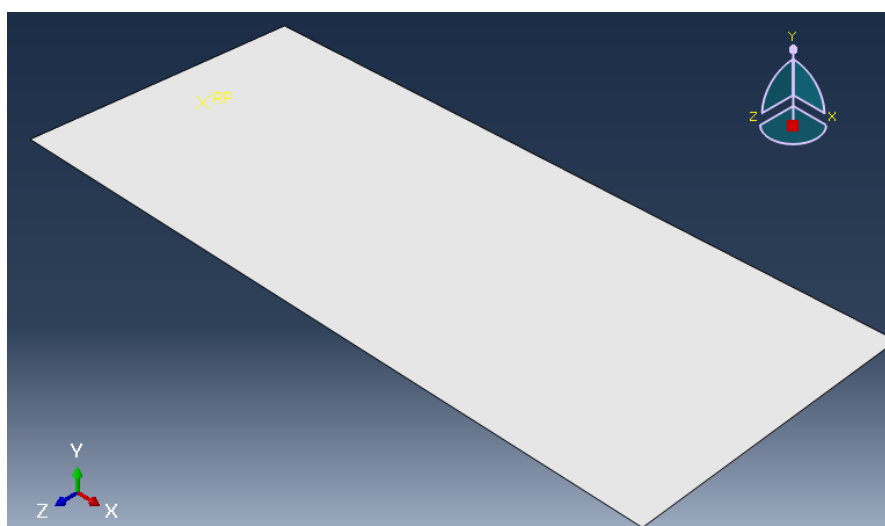


Figura 21: Plano rígido modelado en Abaqus.

ABAQUS trabaja con unidades no definidas. Es decir, no trabaja con unidades determinadas. Así que en función de la unidad de la longitud que introducimos, los valores derivados de ellos también variarán.

En este caso, las dimensiones introducidas en el modelo están en mm, por lo tanto, las unidades de las tensiones, sabiendo que para ABAQUS es unidad de fuerza dividido por unidad de área (siendo área unidad de longitud por unidad de longitud) y que la unidad de fuerza utilizada será N, las tensiones obtenidas así como los valores de resistencia a introducir estarán en MPa (N/mm^2)

- **Material**

En el modelo hay tres materiales distintos aplicados a distintas secciones del modelo:

- Material acero del alma (Steel-Web profile)
- Material acero del ala (Steel-Flange profile)
- Material acero del tornillo (Steel-Bolt)

Las propiedades del alma y del ala se obtienen de la caracterización mecánica del acero de estos (Anexo A). La curva característica del acero y las propiedades mecánicas obtenidas experimentalmente son:

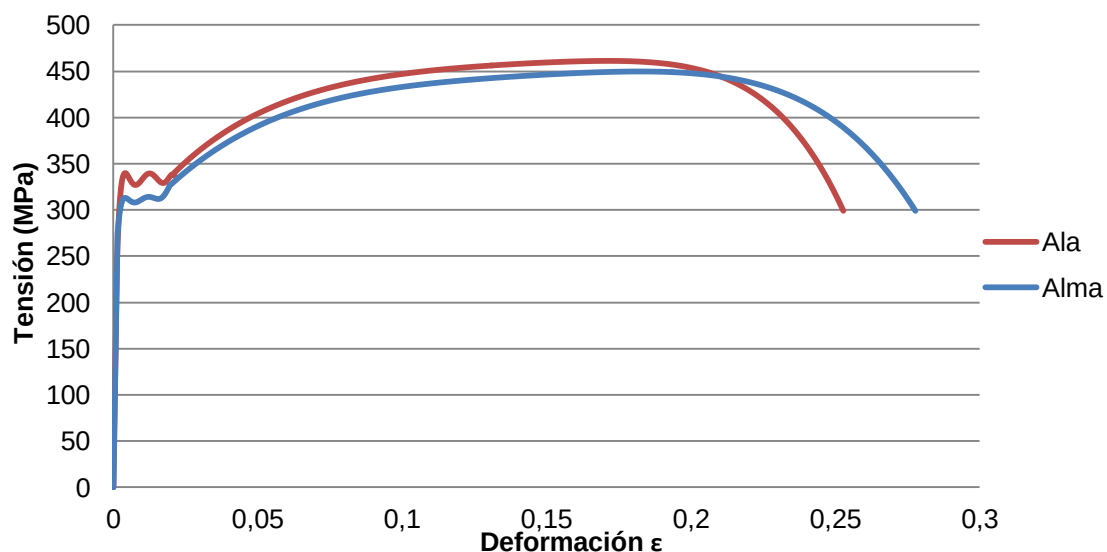


Figura 22: Curva Tensión-Deformación de los aceros del alma y el ala.

Para introducir estos datos en Abaqus hay que dividir la curva en dos. La primera parte es la parte elástica que será introducida en la pestaña *Elastic* mediante su módulo de Young y el coeficiente de Poisson.

	Ala	Alma
$E \text{ (MPa)}$	201288,6	191557
$\nu \text{ (MPa)}$	0.3	0.3

Tabla 2: Valores de módulo de elasticidad y de Poisson introducidos en Abaqus

La segunda parte corresponde a la parte no lineal de la curva (fluencia y plástica) cuya curva será introducida en Abaqus en la pestaña *Plastic* en una tabla que relaciona la tensión con su deformación plástica (corresponde a la deformación total menos la deformación en el límite elástico).

Data		
	Yield Stress	Plastic Strain
1	221.4175	0
2	241.1354	0.0001
3	250.4484	0.0002
4	259.1118	0.0003
5	267.1568	0.0004
6	274.6135	0.0005
7	281.5113	0.0006
8	287.8783	0.0007
9	293.7418	0.0008

Figura 23: Captura de los datos de la curva introducidos en Abaqus

Para el tornillo, como se desconoce la curva característica de este, se utilizará un modelo bilineal para representa la curva tensión-deformación teniendo en cuenta las características teóricas del acero del tornillo.

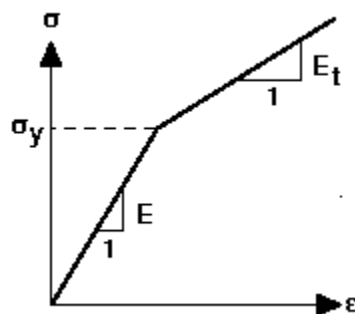


Figura 24: Curva bilineal elastoplástica con endurecimiento por deformación.

- **Función Step**

Para la aplicación de carga se implementa un step, que determinará el tipo de ensayo que se va a realizar (estacionario y transitorio), la duración del ensayo y el número de iteraciones. Para este modelo se va a establecer análisis transitorio durante 1 segundo. La simulación se ejecutará un máximo de 100 iteraciones. Los intervalos de tiempo de inicio y durante la simulación no van a ser constantes en todas las simulaciones. El valor de intervalo máximo será modificado para conseguir resultados más precisos.

- **Interacciones**

Las superficies de un componente que se encuentren en contacto con superficies de otros componentes deben ser consideradas como interacciones. Las interacciones propuestas son:

- Tornillo-Agujero
- Cabeza tornillo-Superficie del ala
- Superficie del ala-Plano Rígido

Todas ellas utilizan el método de discretización de superficie a superficie.

- **Aplicación de la carga**

Para simular la aplicación de la carga se aplica un desplazamiento vertical según la dirección y en la parte superior del alma. Se hace así porque se obtiene una mejor curva fuerza-desplazamiento que ejerciendo una fuerza determinada sobre el modelo. Esta aplicación se introduce como si fuera una condición de contorno en Abaqus (*Load-Boundary Conditions*)

- **Condiciones de contorno**

Las condiciones de contorno consideradas son:

- Simetría respecto al plano yz sobre el alma restringiendo desplazamiento en x. Esto es debido a que estamos simulando solo la mitad de una T-stub

- Restringir nodos en la base del tornillo en dirección y
- Restringir el movimiento del plano rígido mediante empotramiento

Estas condiciones se implementan en Abaqus en el apartado *Load-Boundary Conditions*.

- **Mallado**

Existen diversos trabajos que han estudiado el efecto del mallado. En teoría, cuanto mayor número de nodos en el mallado, mejor y más preciso será el resultado, pero también será más costoso computacionalmente. Por lo tanto hay que buscar un equilibrio entre obtención de resultados precisos y un tiempo de simulación asequible. Para ello, el mallado no será homogéneo en todo el modelo, sino que la malla será más fina en la zona del tornillo y en el propio tornillo, donde se presentan campos de deformaciones importantes y en la zona del alma, donde el desplazamiento es el mismo y la sección no varía, el mallado es más grueso.

El mallado utilizado para el modelo es de elementos hexaédricos de 8 nudos (C3D8R) para un análisis transitorio.

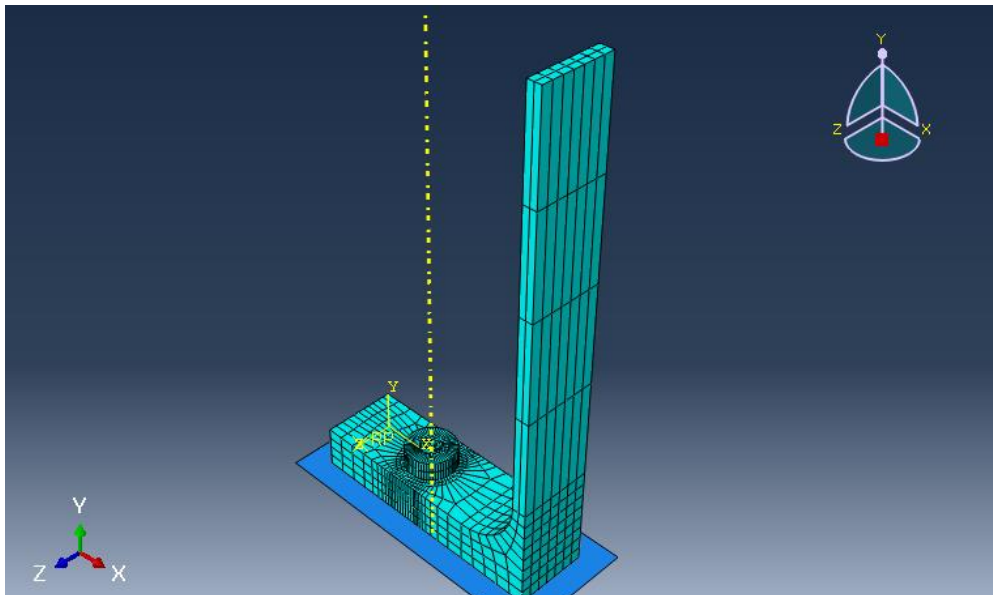


Figura 25: Modelo ensamblado mallado.

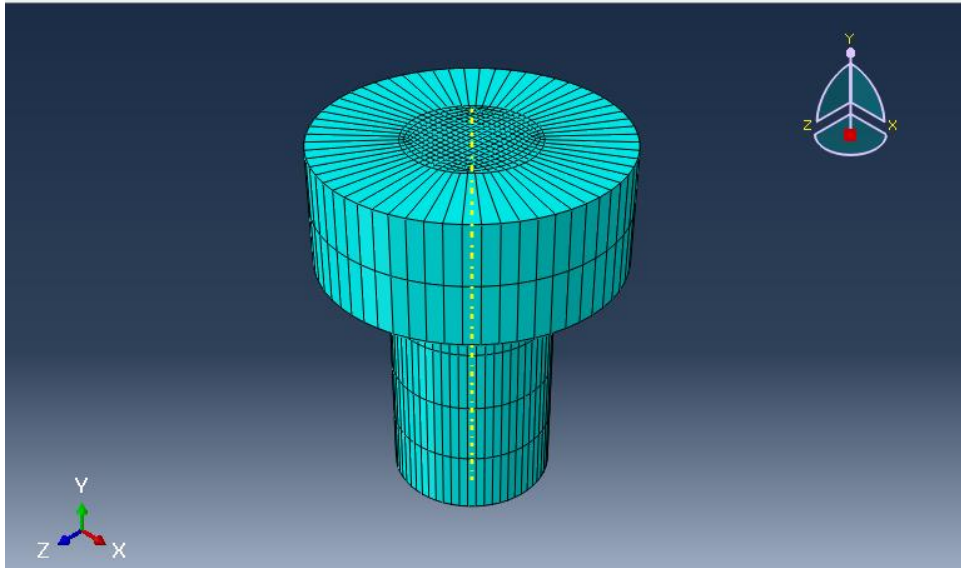


Figura 26: Mallado del tornillo.

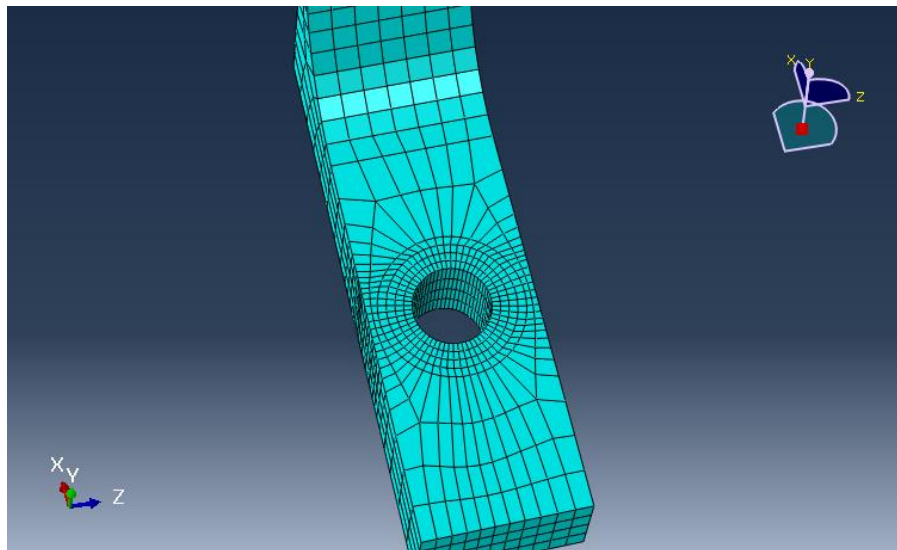


Figura 27: Mallado en la zona del tornillo del perfil.

Este modelo en elementos finitos será utilizado tanto para la validación experimental de este como para un posterior estudio paramétrico, por lo tanto, las dimensiones del modelo serán distintas pero el resto de parámetros (aplicación de carga, mallado, material...) serán los mismos.

4.3. Descripción del programa experimental

En este programa experimental se van a ensayar 6 modelos T-stub con distintas geometrías. Para ello se utilizará una máquina de tracción y un equipo para el análisis DIC. Este equipo consiste en una cámara colocada en dirección

perpendicular al plano frontal del perfil T para el análisis DIC 2D y otras dos cámaras colocadas en la parte superior enfocando una de las zonas del tornillo (cara superior del ala) para su estudio en DIC 3D. Además, para validar las deformaciones obtenidas en DIC, se colocarán en algunos modelos galgas extensométricas.

4.3.1. Descripción de los especímenes

Como se ha mencionado antes, se van a ensayar 6 modelos T-stub. Compuesto por un perfil T con una fila de tornillos que, para simular la situación de doble T, se colocará el perfil T sobre un soporte con la suficiente rigidez como para soportar los esfuerzos sometidos sin deformarse.

Los perfiles T fueron obtenidos de una viga IPE 200 partida por la mitad en su eje longitudinal y se cortaron 6 rebanadas de distinto espesor: dos de espesor 15 mm, dos de 25 mm y otros dos de 35 mm. Este espesor será el ancho disponible de la T-stub.

Después, se le realizan los agujeros sobre el ala de la T donde irán alojados los tornillos. La distancia n para todos los modelos es de 20.5 mm, siendo entonces λ un valor próximo al límite 1.25. Este proceso se realizó con un taladro vertical en el taller del Departamento.

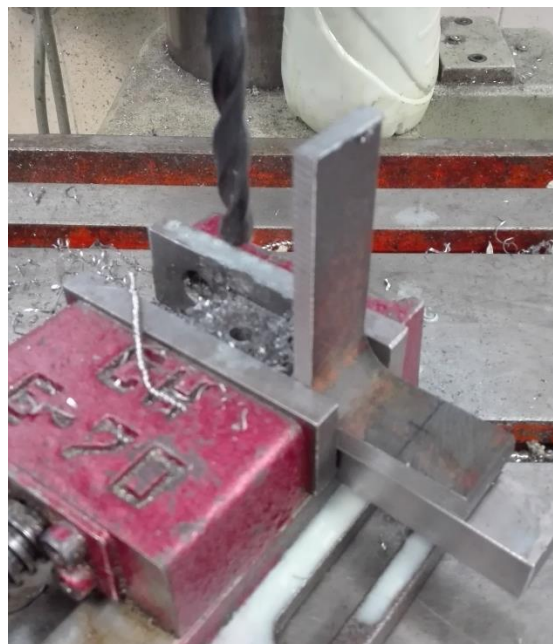


Figura 28: Proceso de taladrado sobre la T.



Figura 29: Perfil T con los agujeros realizados.

Las dimensiones finales del modelo así como los tornillos a utilizar se indican en la siguiente tabla:

Modelo	l	t_f	t_w	r	h	n	m	Tornillo	d_0	d_w
15.1	15	8.5	5.6	12	81.76	20.19	17.41	M 6 x 1	7	10
15.2	15	8.5	5.6	12	85.38	20.22	17.38	M 6 x 1	7	10
25.1	25	8.5	5.6	12	81.4	19.79	17.81	M 8 x 1,25	9	13
25.2	25	8.5	5.6	12	81.5	20.11	17.49	M 8 x 1,25	9	13
35.1	35	8.5	5.6	12	80.1	19.96	17.64	M 10 x 1,5	11	16
35.2	35	8.5	5.6	12	79.16	20.16	17.44	M 10 x 1,5	11	16

Tabla 3: Dimensiones en mm de los distintos modelos T-stub para el ensayo experimental

Los tornillos utilizados son de distintas métricas pero del mismo material, acero inoxidable A2-70. Las propiedades mecánicas de este material se indican en la Tabla 4 [10] [16].

E (Mpa)	ν	f_y (Mpa)	f_u (Mpa)	Elongación (%)
193000	0,3	450	700	20

Tabla 4: Propiedades mecánicas del acero inoxidable A2-70.



Figura 30: Tornillos utilizados en el ensayo de acero inoxidable A2-70.

Las probetas son pintadas en un frontal y en una de los laterales del perfil con un moteado en blanco y negro para el análisis DIC 2D y 3D.



Figura 31: Perfiles T pintadas con moteado.

En los modelos 15.1, 25.1 y 35.2 se colocarán dos galgas extensométricas en las caras opuestas del alma donde se halla realizado el moteado. Una pequeña de modelo FAE-125-35-S6E-J, 350 Ω y 2.01 de factor de galga colocado en el modelo 35.2, otras dos pequeñas colocadas en 15.1 y 25.1 con modelo FAE-125-35-S15E-J, 350 Ω y 2.10 de factor de galga, estas galgas están colocadas en el frontal de la T. Para el lateral se utilizarán galgas más grandes de modelo FLA-6-1000-23, 1000 Ω y 2.12 de factor de galga.

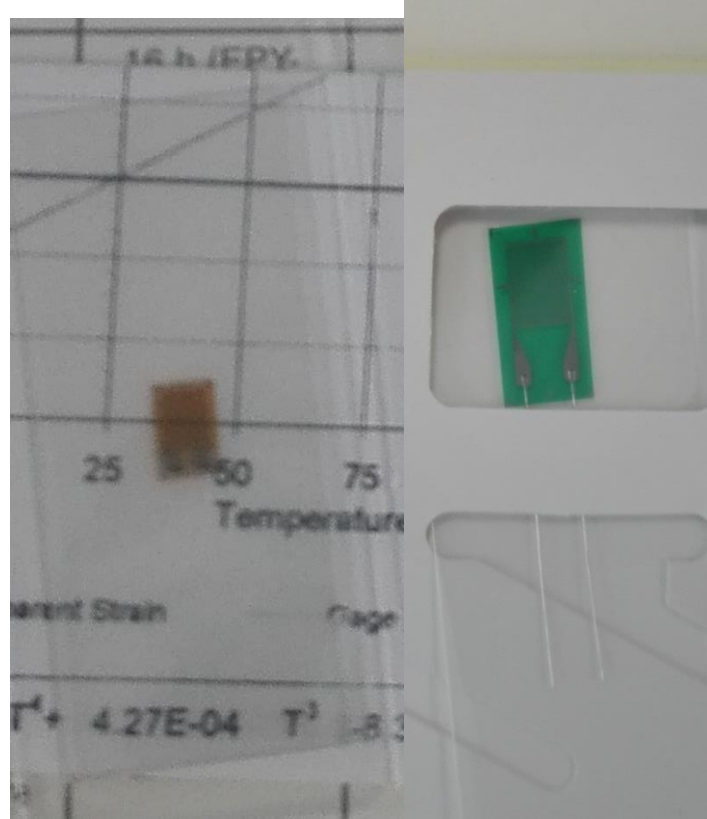


Figura 32: Galgas utilizadas.

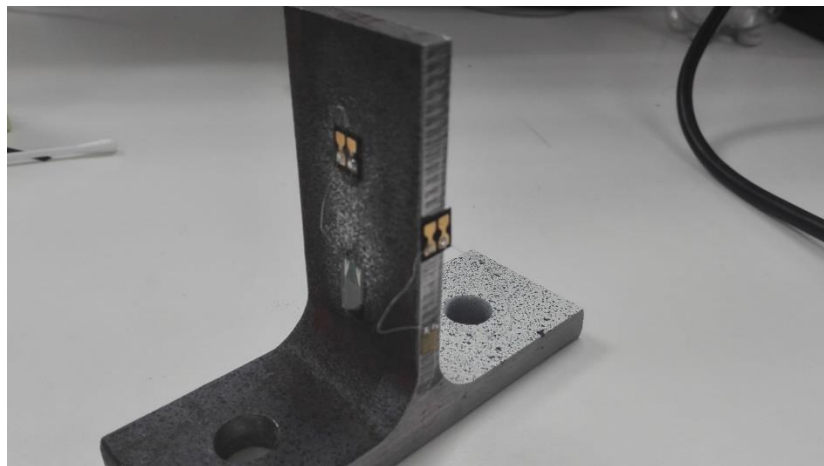


Figura 33: Probeta con dos galgas extensométricas.

Al realizar el ensamblaje se aprieta los tornillos con una tuerca. Como es soporte tiene hendidura de diámetro 11mm, se utilizarán arandelas para los tornillos de métrica M6 y M8. El proceso de apriete se lleva a cabo en dos partes. Primero se

aprieta con la mano hasta el máximo posible y después con una llave se aprietan ambos con un mismo giro entre 90 y 180 grados.



Figura 34: Perfil ensamblado en el soporte.

4.3.2. Descripción del equipo de medición

Para aplicar la fuerza de tracción se utilizó una máquina de tracción de MTS Systems Corporation, modelo 810 de 100 kN de capacidad de carga. La máquina se controla a través de un software. Los datos obtenidos son fuerza y desplazamiento de las mordazas.

Para registrar las deformaciones se utilizó un equipo P3 Strain Indicator de Vishay Micro-Measurements, que recopiló y almacenó las lecturas de las galgas durante los ensayos.

Para los datos de DIC, el equipo está formado por:

- Dos cámaras *acA2440-75um - Basler ace* de la compañía Basler con dos objetivos para DIC 3D.
- Una cámara *Grasshopper3 5.0 MP Mono USB3 Vision (GS3-U3-51S5M-C)* de la compañía FLIR con un objetivo para el DIC 2D.
- Un foco de luz.
- Dos trípodes, uno de ellos adaptado para soportar dos cámaras.
- Un PC con el software de las cámaras para la recepción de datos.
- Un PC para el procesado en DIC que tenga el programa VIC-2D 6 y VIC-3D 2012.

- Una placa de calibrado de tamaño 10x8 con espaciado de 10mm.

Los pasos para el análisis DIC son: calibrado, toma de imágenes, procesamiento y análisis de resultados. Para la calibración en 2D solo se necesita una distancia conocida, sin embargo, para el 3D es necesario la toma de una serie de imágenes de la placa de calibrado que será introducida posteriormente en el programa. Esta placa será movida haciéndola girar en los tres ejes principales mientras las cámaras para 3D capturan simultáneamente las imágenes.

Además, para una mejor toma de imágenes para el DIC 2D se coloca un fondo negro detrás de la pieza.

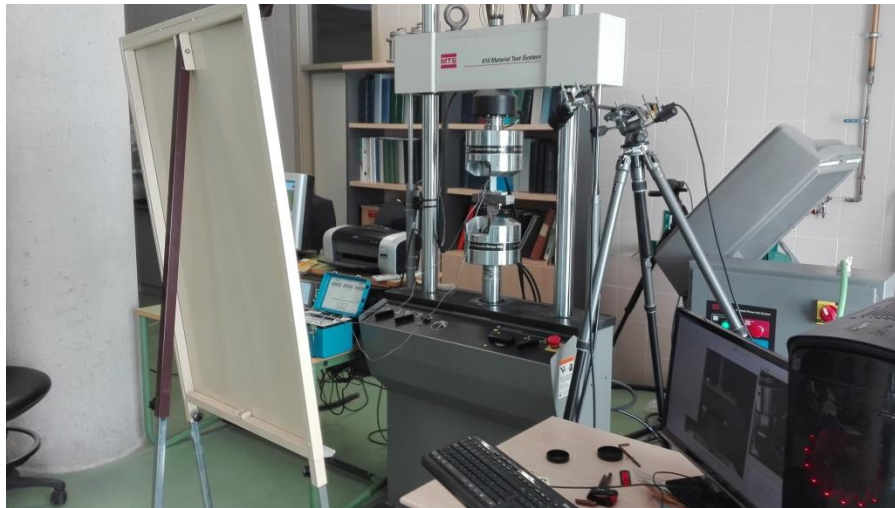


Figura 35: Equipo de ensayo.

4.3.3. Procedimiento de ensayo

El procedimiento de ensayo es el siguiente. Se realizará un solo ensayo por probeta de rotura en donde se tomarán los datos simultáneamente de las tres cámaras, de la máquina de tracción y de las galgas si se usasen.

La toma de datos se realiza cada segundo en las tres cámaras, al igual que para los datos procedentes de las galgas. Es aconsejable, para una mejor precisión, que se inicie la toma de datos en el mismo momento para minimizar posibles retrasos o delays inferiores al segundo..

Una vez hecho esto, se comprueba el funcionamiento de todo el equipo y se prepara el programa de ensayo en el software de la máquina de tracción. Una vez

que esté todo listo, se sincroniza la toma de datos de las cámaras y de las galgas con el inicio del ensayo.

4.4. Ensayo de rotura del modelo T-stub

- **Modelo 35.1**

En el primer ensayo se utilizó una velocidad de ensayo de 0.5mm/min, velocidad a la que se separan las mordazas. No se usaron galgas extensométricas. Se obtuvieron 550 imágenes obtenidas cada segundo por cada cámara. El ensayo se detuvo manualmente cuando la fuerza aplicada empezó a decrecer.

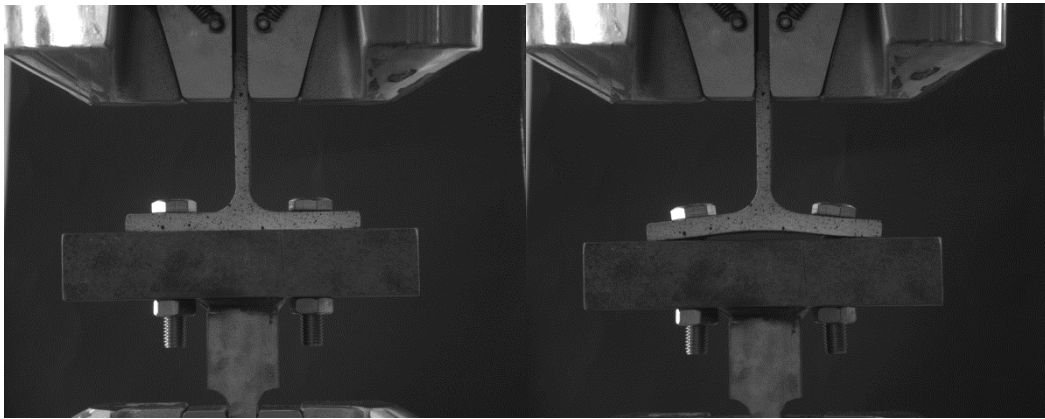


Figura 36: Imagen de referencia (Izquierda) y última imagen (derecha) del ensayo 35.1.

La curva fuerza-desplazamiento se obtiene de los datos de fuerza dada por la máquina de tracción y por los datos de desplazamiento procesados por DIC 2D. La fuerza máxima fue de 56.11 kN para 3.241 mm de desplazamiento. El ensayo se detuvo con un desplazamiento de 4.25396 mm.

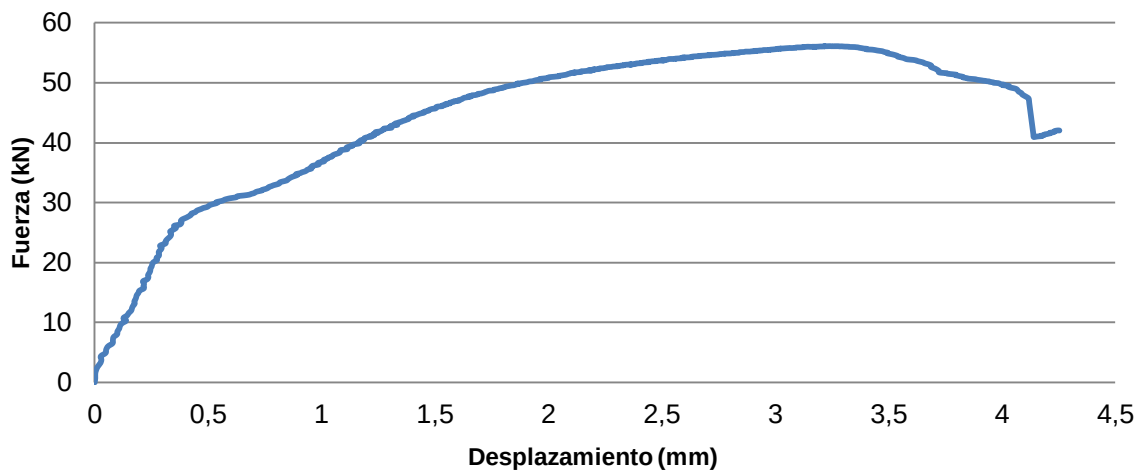


Figura 37: Curva Fuerza-Desplazamiento del modelo 35.1.

Tras el ensayo se puede ver la deformación del perfil en los sitios donde aparecerían rotulas plásticas. Además, se muestra plastificación en el tornillo y en la tuerca.



Figura 38: Componentes del modelo 35.1 después del ensayo.

- **Modelo 35.2**

En este ensayo se utilizó una velocidad de ensayo de 0.5mm/min. Para este ensayo se usaron galgas extensométricas. Se obtuvieron 651 imágenes útiles captadas cada segundo por cada cámara. El ensayo se detuvo cuando ocurrió el fallo en el modelo.

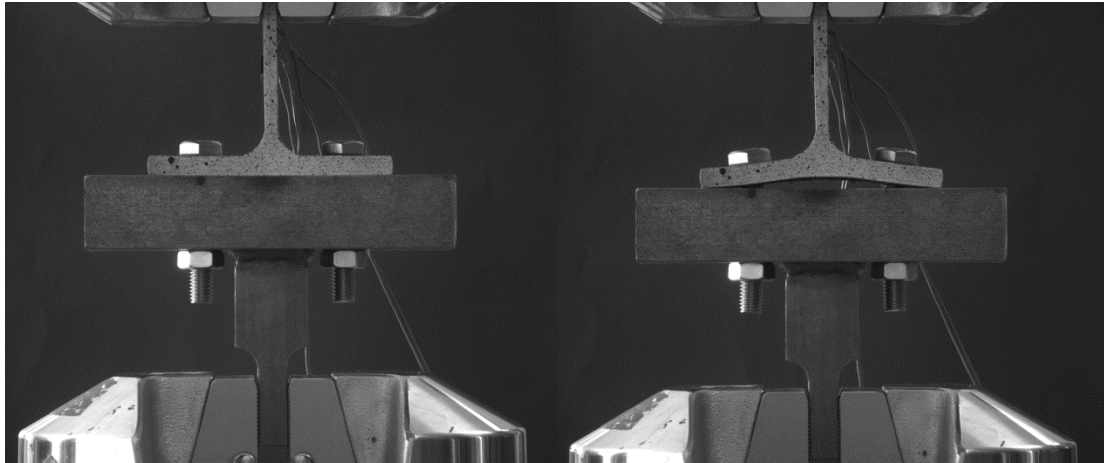


Figura 39: Imagen de referencia (izquierda) y última imagen (derecha) del ensayo 35.2.

En curva fuerza-desplazamiento, la fuerza máxima fue de 56.15 kN para 3.45 mm de desplazamiento. El ensayo se detuvo con un desplazamiento de 4.86 mm debido a un fallo en un filete de la tuerca.

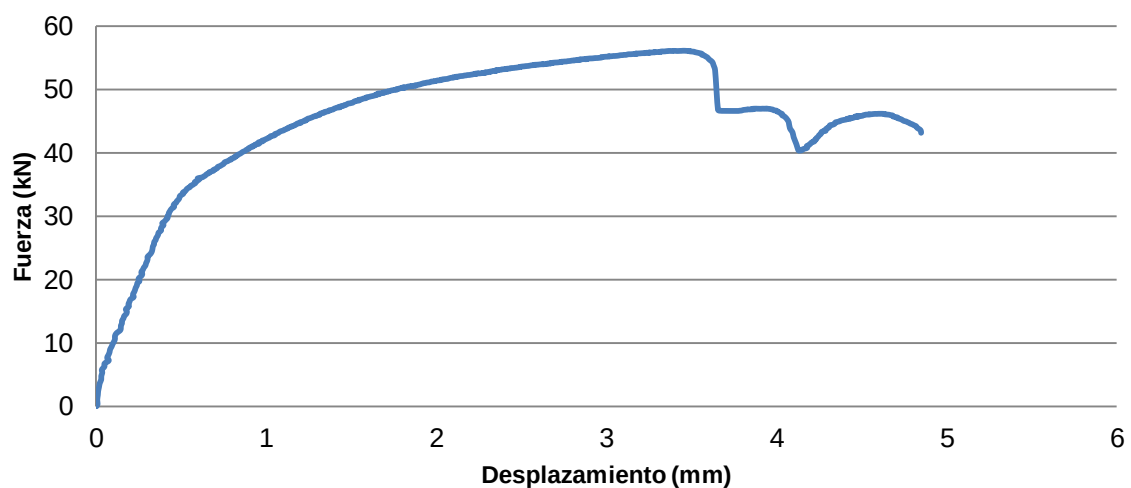


Figura 40: Curva Fuerza-Desplazamiento del modelo 35.2.

En la Figura siguiente se puede ver la deformación medida por las galgas en las dos caras del alma. La tendencia de ambas medidas es lineal hasta que empieza a fallar el adhesivo de la galga, lo que ocurre ya en régimen plástico, por lo que se dispone de datos suficientes y este efecto no supone mayor inconveniente.

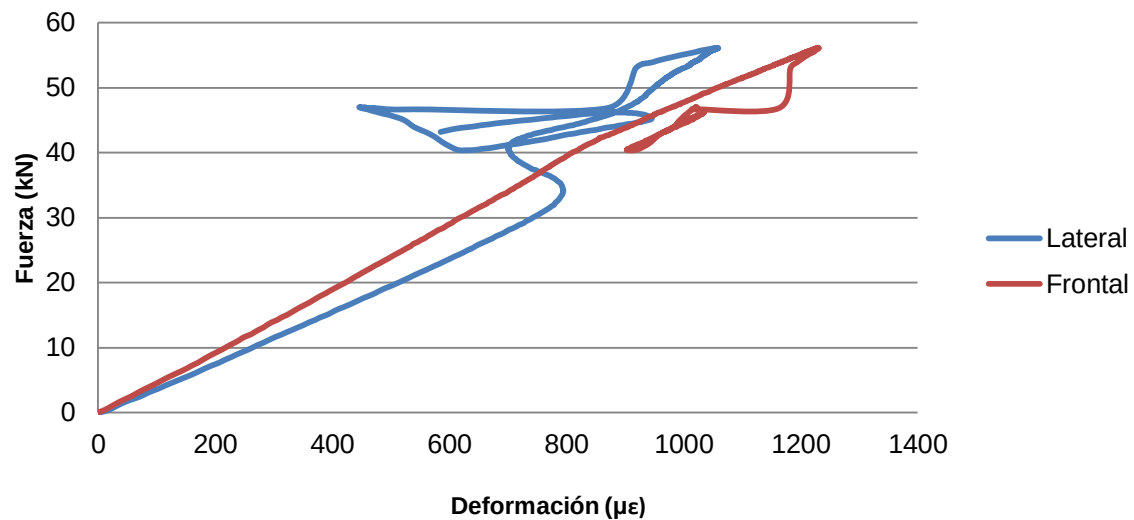


Figura 41: Deformación medidas por las galgas del modelo 35.2.

Tras el ensayo se puede observar la deformación de la T equivalente y las rotulas plásticas. Además, se aprecia plastificación en el tornillo e incluso en los filetes de la tuerca.



Figura 42: Modelo 35.2 montado en el soporte después del ensayo.



Figura 43: Componentes del modelo 35.2 después del ensayo.

- **Modelo 25.1**

En este ensayo se utilizó una velocidad de aplicación de carga de 0.3 mm/min. La velocidad se redujo debido a que el acho disponible era menor. Para este ensayo se usaron galgas extensométricas. Se obtuvieron 1949 imágenes útiles captadas cada segundo por cada cámara. Debido a la duración del ensayo (más de 30 minutos) en comparación con los ensayos anteriores (10-15 min), se detuvo el ensayo a pesar de que la fuerza se mantenía constante. Además, la velocidad en el resto de modelos se restablecería en 0.5 mm/min.

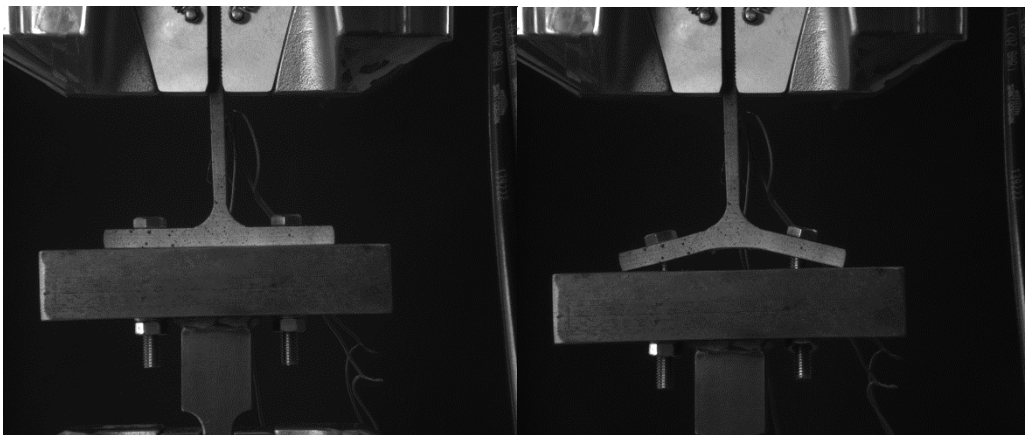


Figura 44: Imagen de referencia (izquierda) y última imagen (derecha) del ensayo 25.1.

En curva fuerza-desplazamiento, la fuerza máxima fue de 35.64 kN para 8.78 mm de desplazamiento. El ensayo se detuvo con un desplazamiento de 9.29 mm.

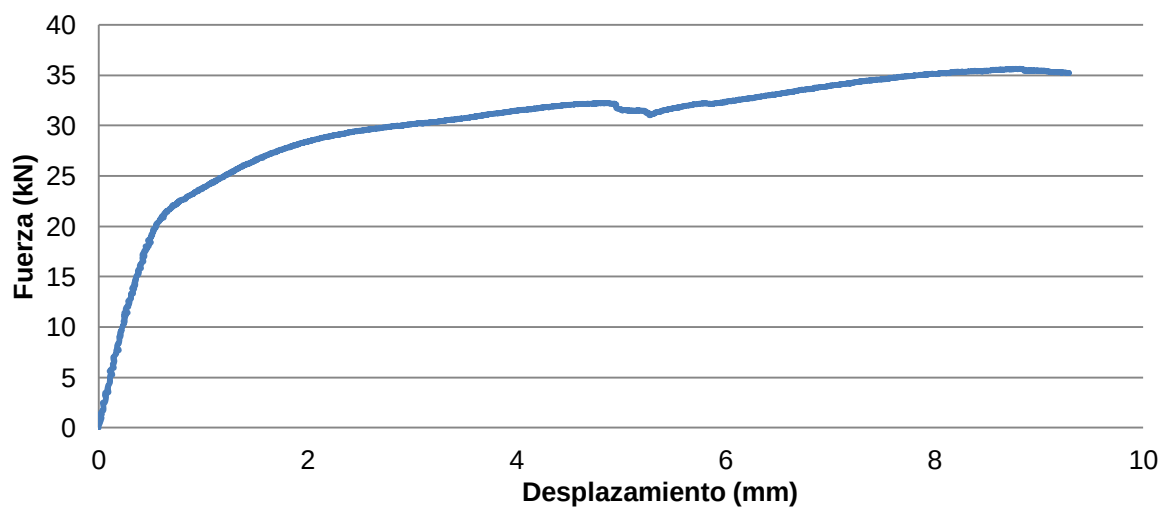


Figura 45: Curva Fuerza-Desplazamiento del modelo 25.1.

En la figura siguiente se puede ver la deformación medida por las galgas en las dos caras del alma. La tendencia de ambas medidas es lineal hasta que empieza a fallar el adhesivo de la galga. Como nos importa la deformación en régimen elástico del modelo no importa.

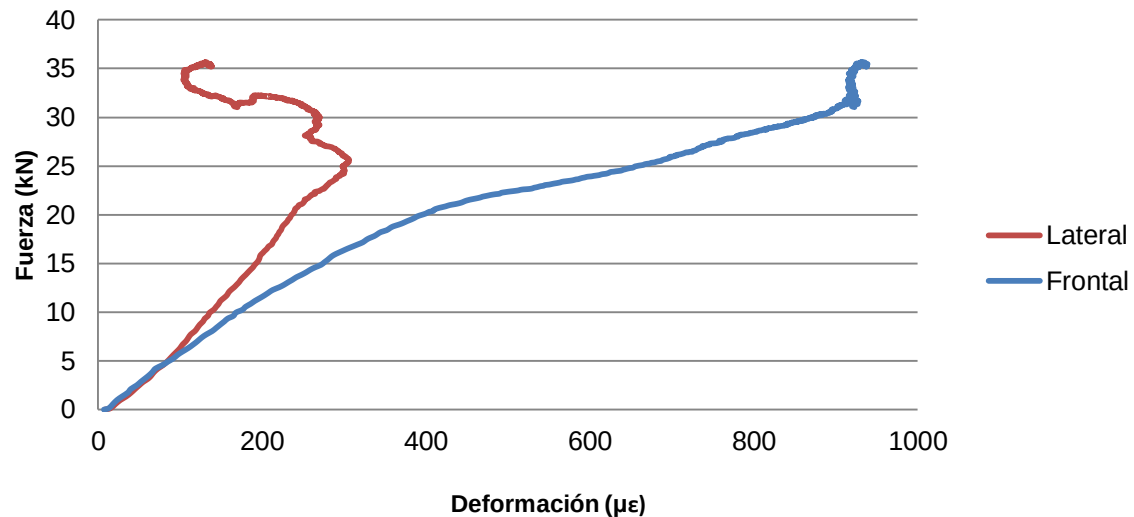


Figura 46: Deformación medidas por las galgas del modelo 25.1.

Tras el ensayo se puede ver la deformación del perfil en los sitios donde aparecerían rotulas plásticas. Además, se muestra plastificación en el tornillo, sobretodo en uno de ellos y en las arandelas utilizadas. La deformación de las arandelas fue la razón de la gran duración del ensayo sin llegar a romper. Para los posteriores ensayos se tuvo en cuenta la deformación de las arandelas, llegando a detener el ensayo si estas mostrasen una gran deformación y a evitar la plastificación, incluso, del soporte.



Figura 47: Componentes del modelo 25.1 después del ensayo.

- **Modelo 25.2**

En este ensayo se utilizó una velocidad de 0.5 mm/min. No se usaron galgas extensométricas. Se obtuvieron 935 imágenes útiles captadas cada segundo por cada cámara. El ensayo se detuvo cuando ocurrió el fallo en el modelo.

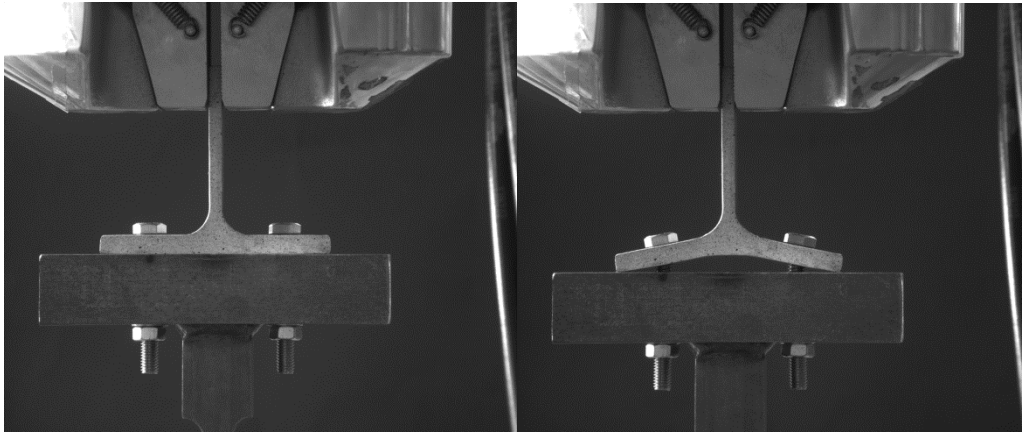


Figura 48: Imagen de referencia (izquierda) y última imagen (derecha) del ensayo 25.2.

En curva fuerza-desplazamiento, la fuerza máxima fue de 37.88 kN para 6.86 mm de desplazamiento. El ensayo se detuvo con un desplazamiento de 7.48 mm debido a un fallo en un filete de la tuerca.

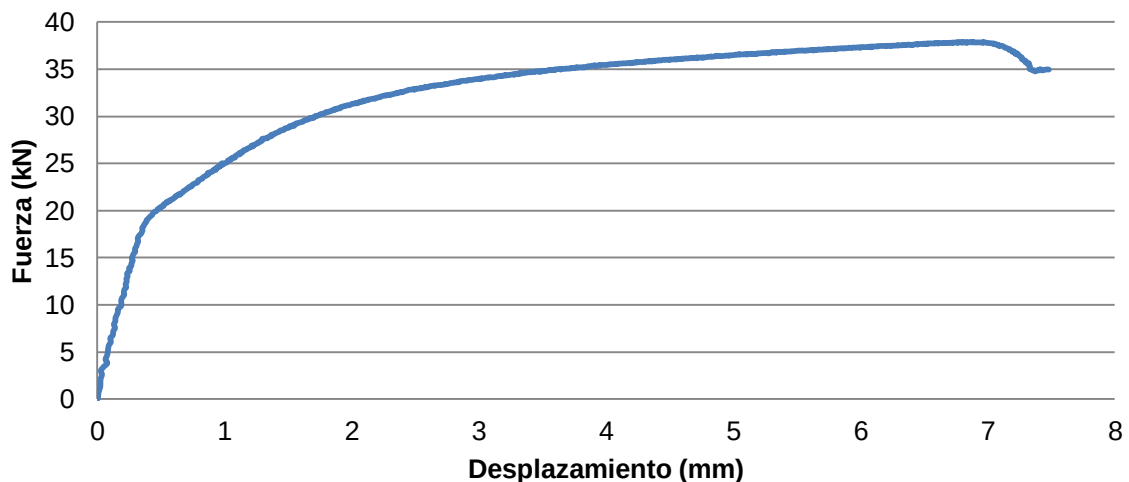


Figura 49: Curva Fuerza-Desplazamiento del modelo 25.2.

Tras el ensayo se puede ver la deformación del perfil en los sitios donde aparecerían rotulas plásticas. Además, se muestra plastificación en el tornillo y en los filetes de la tuerca, además de una ligera deformación en las arandelas.



Figura 50: Componentes del modelo 25.2 después del ensayo.

- **Modelo 15.1**

En este ensayo se utilizó una velocidad de ensayo de 0.5 mm/min. Para este ensayo se usaron galgas extensométricas. Se obtuvieron 721 imágenes útiles captadas cada segundo por cada cámara. El ensayo se detuvo cuando ocurrió el fallo en el modelo.



Figura 51: Imagen de referencia (izquierda) y última imagen (derecha) del ensayo 15.1.

En curva fuerza-desplazamiento, la fuerza máxima fue 20.06 kN depara 5.48 mm de desplazamiento. El ensayo se detuvo con un desplazamiento de 6.05 mm debido a un fallo en un filete de la tuerca.

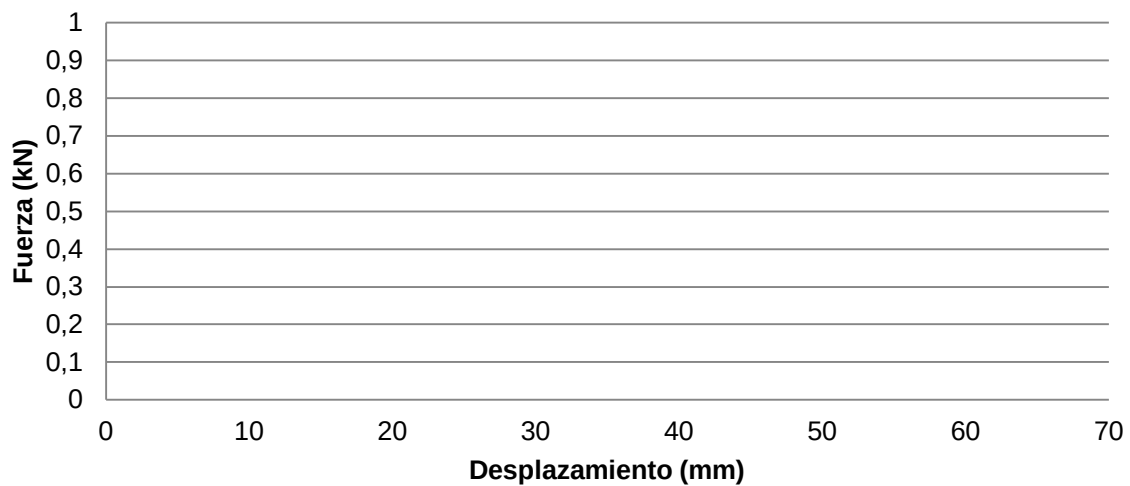


Figura 52: Curva Fuerza-Desplazamiento del modelo 15.1.

En la figura siguiente se puede ver la deformación medida por las galgas en las dos caras del alma. La tendencia de ambas medidas es lineal hasta que empieza a fallar el adhesivo de la galga. Como nos importa la deformación en régimen elástico del modelo no importa.

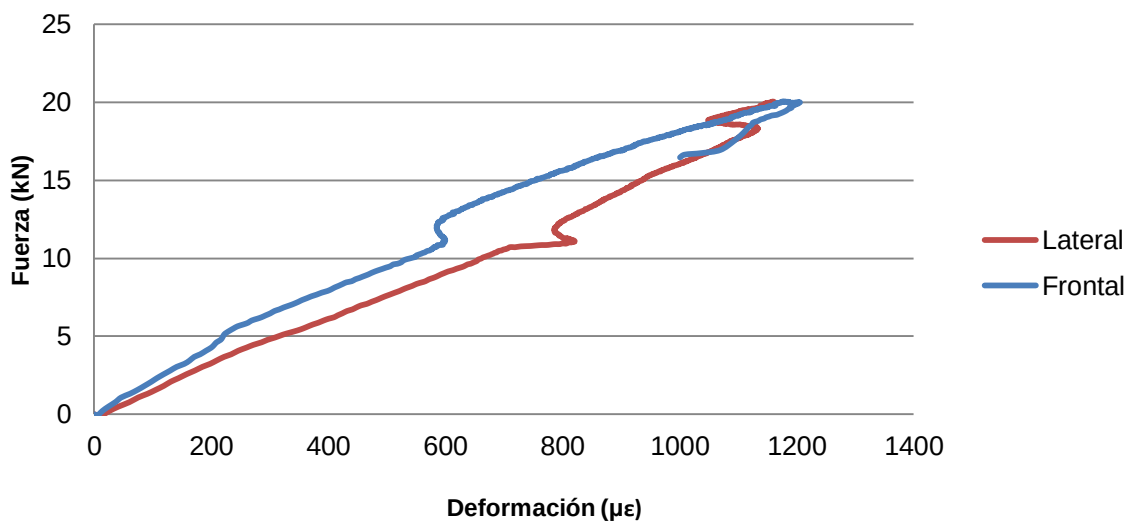


Figura 53: Deformación medidas por las galgas del modelo 15.1.

Tras el ensayo se puede ver la deformación del perfil en los sitios donde aparecerían rotulas plásticas. Además, se muestra plastificación en el tornillo, en las arandelas y en los filetes de la tuerca, debido al fallo de esta.

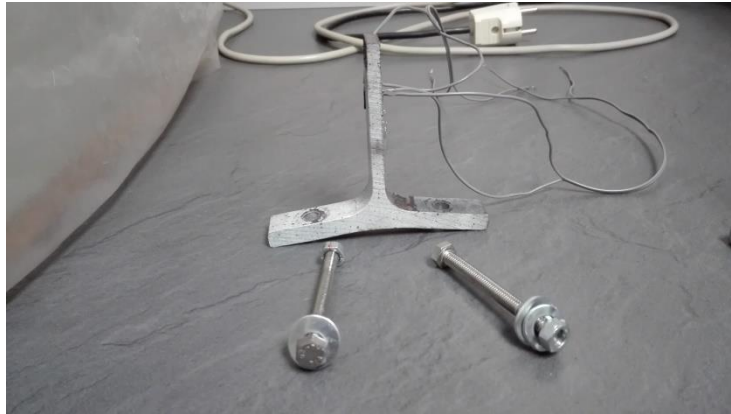


Figura 54: Componentes del modelo 15.1 después del ensayo.

- **Modelo 15.2**

En este ensayo se utilizó una velocidad de ensayo de 0.5mm/min. No se usaron galgas extensométricas. Se obtuvieron 759 imágenes útiles captadas cada segundo por cada cámara. El ensayo se detuvo cuando ocurrió el fallo en el modelo.

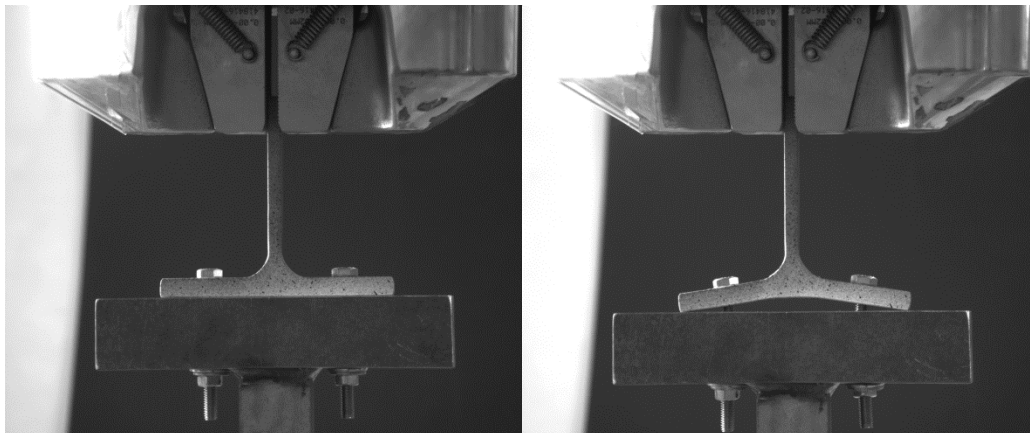


Figura 55: Imagen de referencia (izquierda) y última imagen (derecha) del ensayo 15.2.

En curva fuerza-desplazamiento, la fuerza máxima fue de 20.5 kN para 4.99 mm de desplazamiento. El ensayo se detuvo con un desplazamiento de 5.93 mm debido a un fallo en un filete del tornillo.

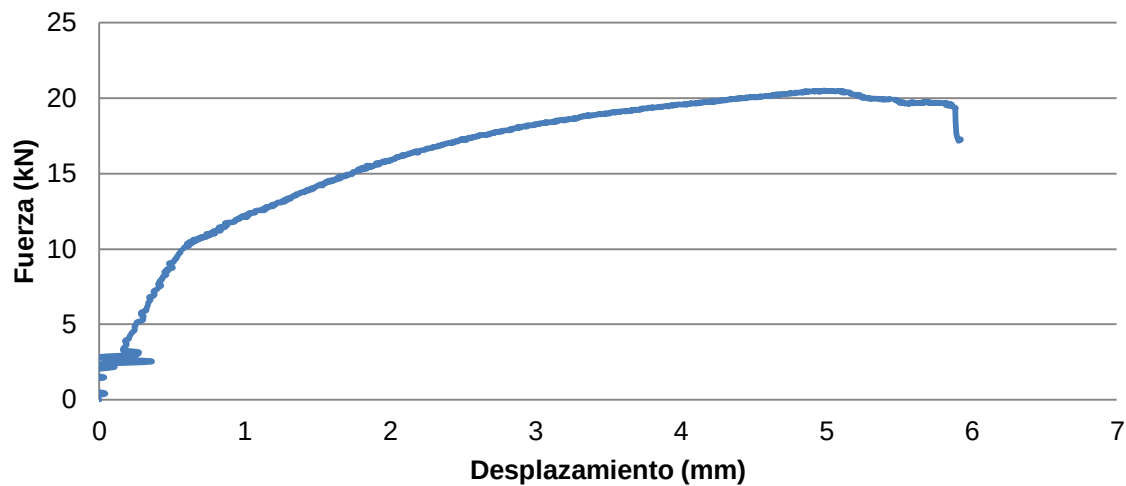


Figura 56: Curva Fuerza-Desplazamiento del modelo 15.2.

Se puede ver en la Figura anterior como hay un ruido inicial que se disipa después. Este ruido procede de la correlación en DIC.

Tras el ensayo se puede ver la deformación del perfil en los sitios donde aparecerían rotulas plásticas. Además, se muestra plastificación en el tornillo, en las arandelas y en las tuercas.



Figura 57: Componentes del modelo 15.2 después del ensayo.

4.5. Análisis de resultados y comparación con el modelo en elementos finitos

Tras realizar los ensayos y obtener los datos, se comparan a continuación los resultados experimentales con los datos obtenidos de las simulaciones realizadas con los modelos de elementos finitos. Estos modelos tienen la misma geometría que los utilizados en los ensayos y tienen caracterizados el mismo material. Para el

tornillo, como se desconoce la curva tensión-deformación, se supondrá un modelo de comportamiento elástico-plástico bilineal basado en los datos de límite elástico y de resistencia.

4.5.1. Mapas de desplazamiento

Tras simular los modelos en Abaqus, se obtienen los mapas de desplazamiento vertical en la superficie frontal de los modelos. Inicialmente se realiza una comparación cualitativa de la distribución de desplazamientos, más adelante en apartados posteriores se discuten los valores obtenidos.

- **Modelo 15.1**

En la siguiente Figura se representan los mapas de desplazamiento vertical obtenidos para el modelo numérico y el experimental, para un valor de carga correspondiente al fin de la relación lineal entre fuerza y desplazamiento.

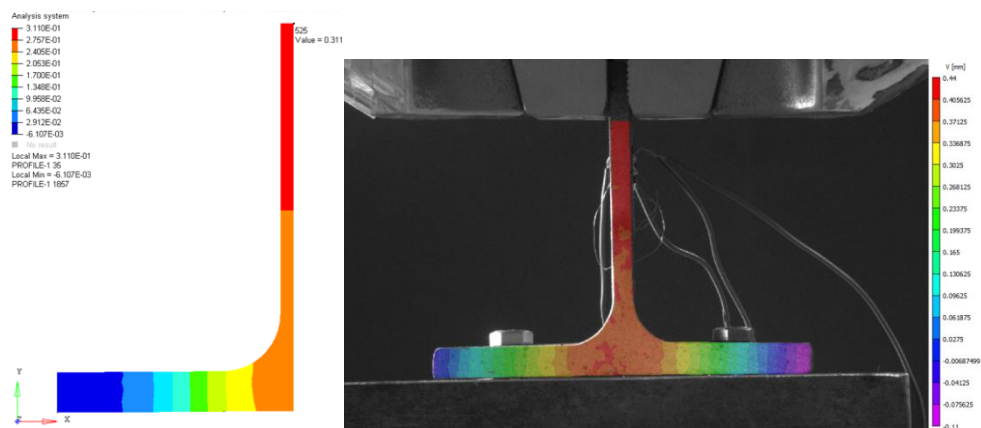


Figura 58: Desplazamiento según MEF (izquierda) y DIC (derecha) para el modelo 15.1 en mm.

Se puede ver como la distribución de valores es muy similar, lineal a lo largo del ala (según asume el Eurocódigo) y valores máximos en el alma que evolucionan debido a que esta también se deforma. La única diferencia es que el modelo experimental presenta una pequeña asimetría en los extremos de las alas, debido con probabilidad a una pequeña diferencia en el par de apriete aplicado a cada tornillo.

- **Modelo 15.2**

En la siguiente Figura se puede ver el desplazamiento en un instante común en DIC y en MEF, el fin del crecimiento lineal de la fuerza respecto al desplazamiento.

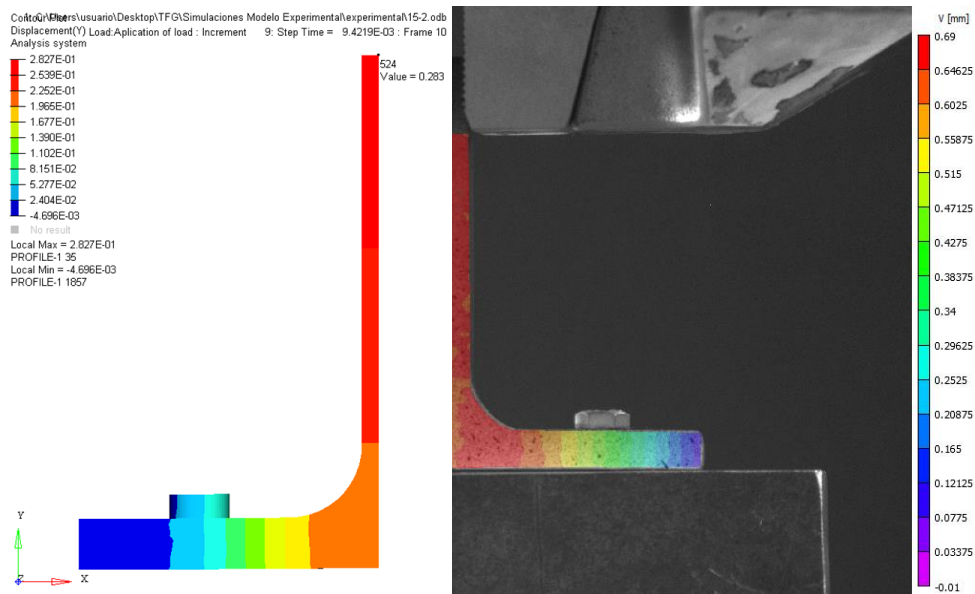


Figura 59: Desplazamiento según MEF (izquierda) y DIC (derecha) para el modelo 15.2 en mm.

Se puede ver como el desplazamiento es lineal de ambos casos. En la zona del tornillo, es desplazamiento se ve irregular en ambas imágenes, es decir, no es lineal. En términos numéricos, existe una diferencia de desplazamiento en la cabeza del modelo de 4 décimas de mm.

- **Modelo 25.1**

En la siguiente Figura se puede ver el desplazamiento en un instante común en DIC y en MEF, el fin del crecimiento lineal de la fuerza respecto al desplazamiento.

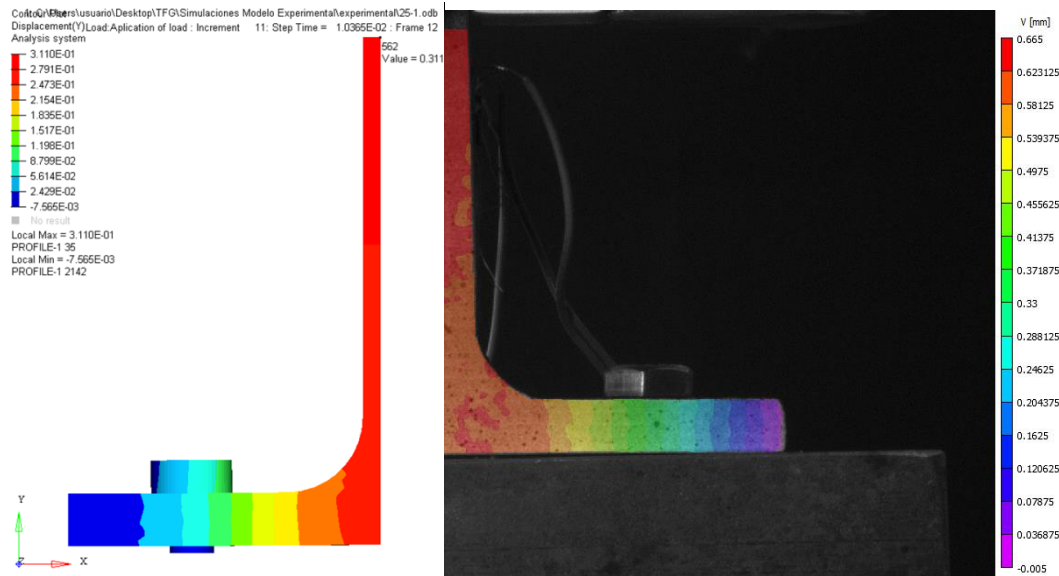


Figura 60: Desplazamiento según MEF (izquierda) y DIC (derecha) para el modelo 25.1 en mm.

Se puede ver como el desplazamiento es lineal de ambos casos. En la zona del tornillo, es desplazamiento se ve irregular en ambas imágenes, es decir, no es lineal. En términos numéricos, existe una diferencia de desplazamiento en la cabeza del modelo de 3 décimas de mm.

- **Modelo 25.2**

En la siguiente Figura se puede ver el desplazamiento en un instante común en DIC y en MEF, el fin del crecimiento lineal de la fuerza respecto al desplazamiento.

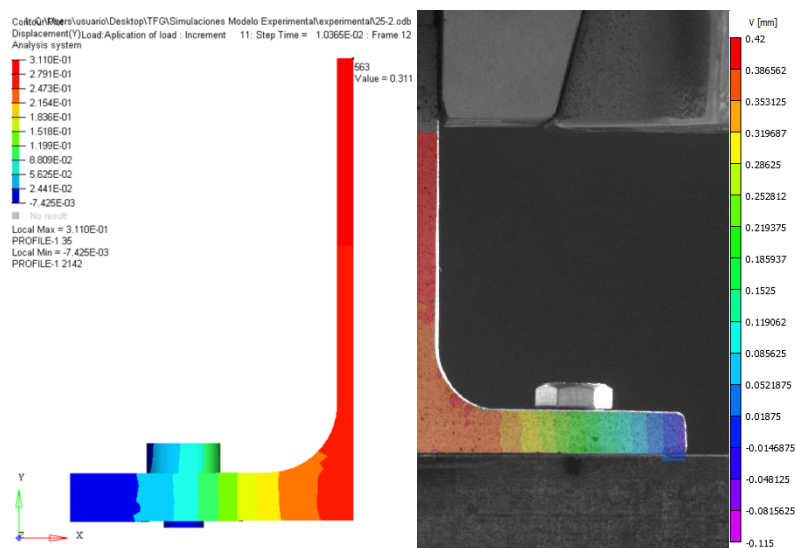


Figura 61: Desplazamiento según MEF (izquierda) y DIC (derecha) para el modelo 25.2 en mm.

Se puede ver como el desplazamiento es lineal de ambos casos. En la zona del tornillo, es desplazamiento se ve irregular en ambas imágenes, es decir, no es lineal. En términos numéricos, existe una diferencia de desplazamiento en la cabeza del modelo de aproximadamente 1 décima de mm.

- **Modelo 35.1**

En la siguiente Figura se puede ver el desplazamiento en un instante común en DIC y en MEF, el fin del crecimiento lineal de la fuerza respecto al desplazamiento.

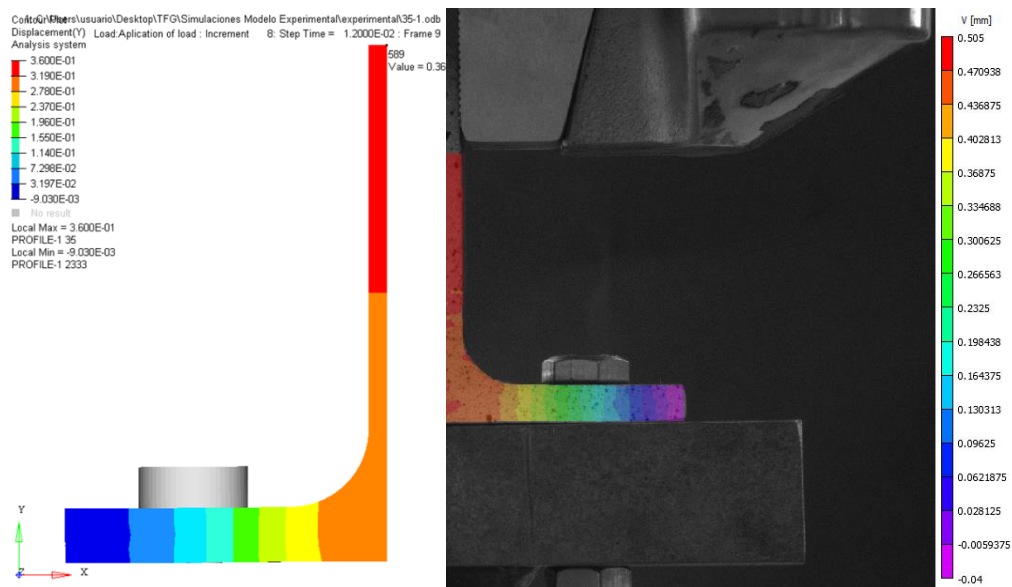


Figura 62: Desplazamiento según MEF (izquierda) y DIC (derecha) para el modelo 35.1 en mm.

Se puede ver como el desplazamiento es lineal de ambos casos. En la zona del tornillo, es desplazamiento se ve irregular en ambas imágenes, es decir, no es lineal. En términos numéricos, existe una diferencia de desplazamiento en la cabeza del modelo de aproximadamente 2 décimas de mm.

- **Modelo 35.2**

En la siguiente Figura se puede ver el desplazamiento en un instante común en DIC y en MEF, el fin del crecimiento lineal de la fuerza respecto al desplazamiento.

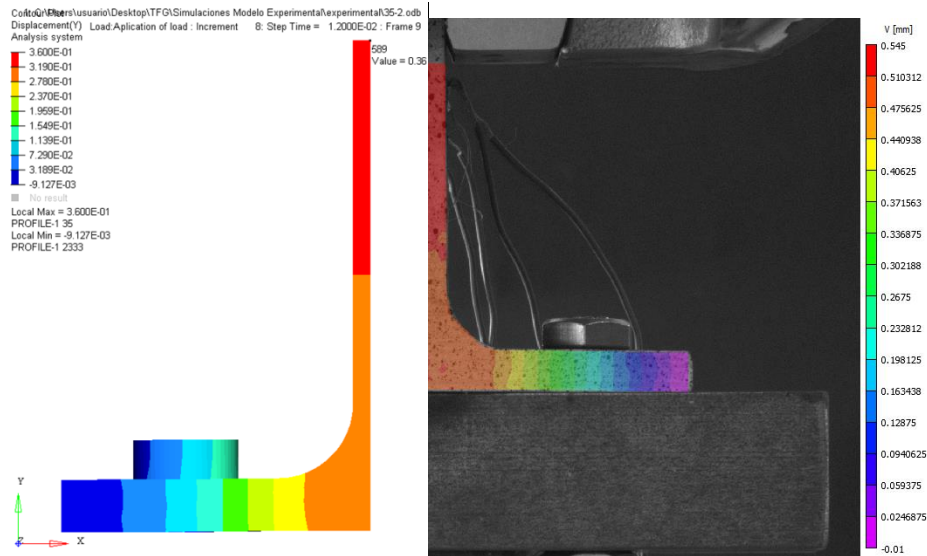


Figura 63: Desplazamiento según MEF (izquierda) y DIC (derecha) para el modelo 35.2 en mm.

Se puede ver como el desplazamiento es lineal de ambos casos. En la zona del tornillo, es desplazamiento se ve irregular en ambas imágenes, es decir, no es lineal. En términos numéricos, existe una diferencia de desplazamiento en la cabeza del modelo de 2 décimas de mm.

4.5.2. Mapas de deformación

De igual modo que para los mapas de desplazamiento, se obtienen los mapas de deformación en MEF y DIC. Las deformaciones en DIC se calculan durante el análisis mediante una opción disponible, pero para esta comparación se van a utilizar la deformación en Von Mises.

- **Modelo 15.1**

En la siguiente Figura se puede ver la deformación en el instante común en DIC y en MEF, el punto máximo de fuerza de la curva Fuerza-Desplazamiento.

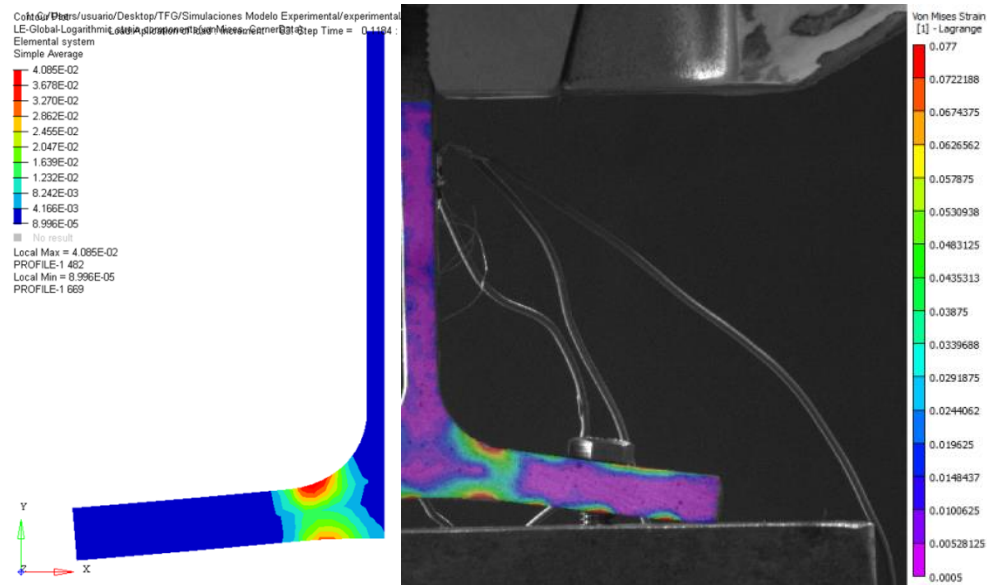


Figura 64: Deformación según MEF (izquierda) y DIC (derecha) para el modelo 15.1.

Se puede apreciar una mayor deformación en el encuentro del ala y del alma en ambas imágenes tanto en la parte superior como en la base del perfil. En la imagen experimental se aprecia algo de ruido en el borde de la máscara, lo cual puede ser debido a errores durante el procesamiento,. Los valores son semejantes pero no iguales, del orden de 3 centésimas de deformación en tanto por uno.

- **Modelo 15.2**

En la siguiente Figura se puede ver la deformación en el instante común en DIC y en MEF, el punto máximo de fuerza de la curva Fuerza-Desplazamiento.

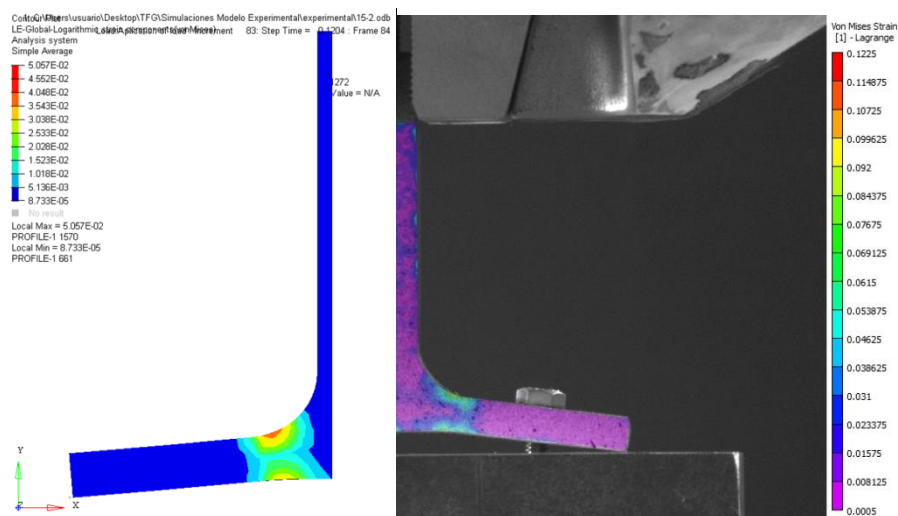


Figura 65: Deformación según MEF (izquierda) y DIC (derecha) para el modelo 15.2.

Se puede apreciar una mayor deformación en el encuentro del ala y del alma en ambas imágenes tanto en la parte superior como en la base del perfil. Los valores son semejantes pero no iguales, del orden de 1 centésima de deformación en tanto por uno.

- **Modelo 25.1**

En la siguiente Figura se puede ver la deformación en el instante común en DIC y en MEF, el punto máximo de fuerza de la curva Fuerza-Desplazamiento.

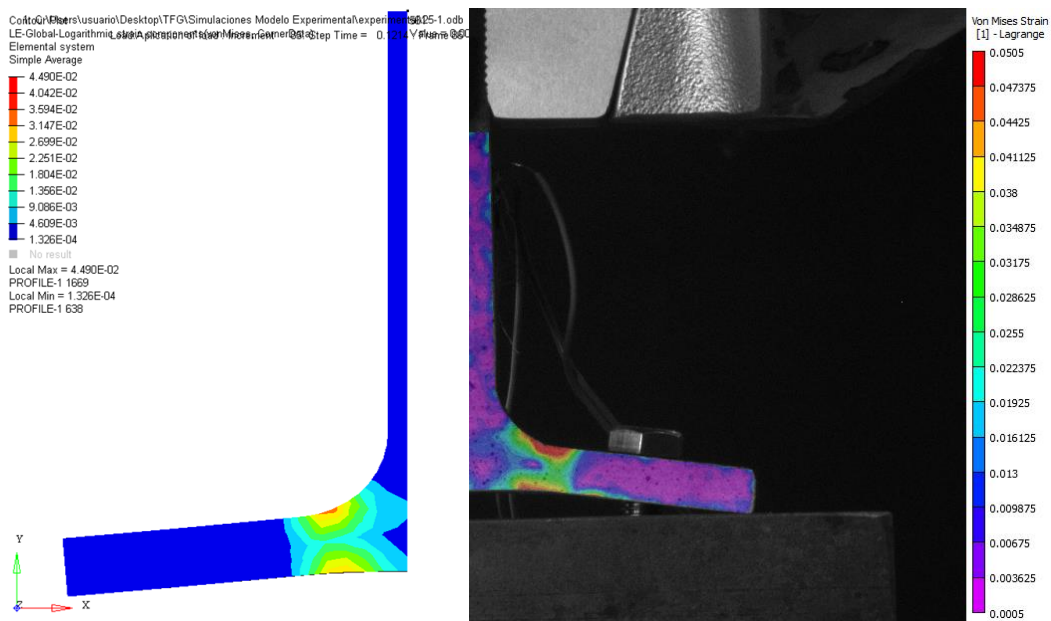


Figura 66: Deformación según MEF (izquierda) y DIC (derecha) para el modelo 25.1.

Se puede apreciar una mayor deformación en el encuentro del ala y del alma en ambas imágenes tanto en la parte superior como en la base del perfil. También aquí se aprecia algo de ruido perimetral en la imagen experimental. Los valores son semejantes pero no iguales, con una diferencia de unas 2 centésimas de deformación en tanto por uno.

- **Modelo 25.2**

En la siguiente Figura se puede ver la deformación en el instante común en DIC y en MEF, el punto máximo de fuerza de la curva Fuerza-Desplazamiento.

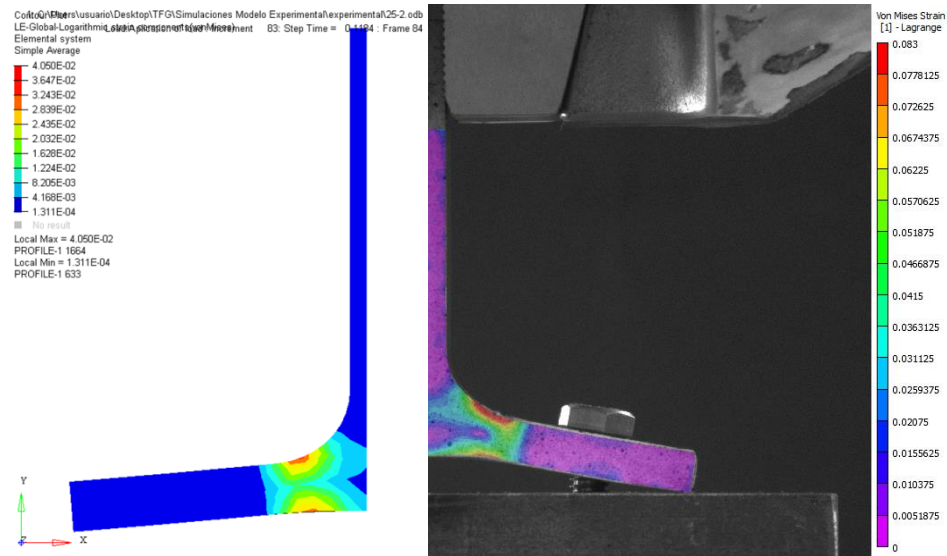


Figura 67: Deformación según MEF (izquierda) y DIC (derecha) para el modelo 25.2.

Se puede apreciar una mayor deformación en el encuentro del ala y del alma en ambas imágenes tanto en la parte superior como en la base del perfil. La forma del mapa sin embargo es distinta en el borde del perfil. Los valores difieren unos de otros debido a que el modelo experimental soportó más esfuerzos que el modelo numérico, como se podrá ver más adelante en la curva Fuerza-Desplazamiento.

- **Modelo 35.1**

En la siguiente Figura se puede ver la deformación en el instante común en DIC y en MEF, el punto máximo de fuerza de la curva Fuerza-Desplazamiento.

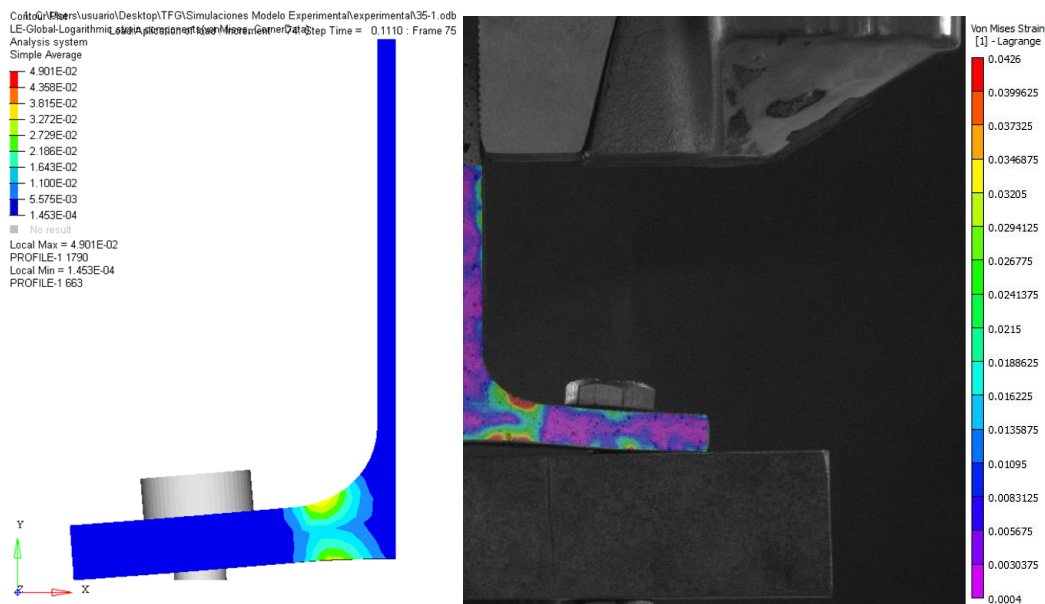


Figura 68: Deformación según MEF (izquierda) y DIC (derecha) para el modelo 35.1.

Se puede apreciar una mayor deformación en el encuentro del ala y del alma en ambas imágenes tanto en la parte superior como en la base del perfil. A diferencia del MEF, en DIC aparecen deformaciones en la zona del tornillo y la zona del alma, aunque esta deformación por estar localizada en el borde puede ser por errores de procesamiento (el método de correlación utilizado analiza los bordes de máscara con el riesgo de tener datos no fiables). No hay mucha diferencia de valores entre los dos métodos. En las rotulas hay una diferencia aproximada de 1 centésima de deformación (0.037 en MEF y 0.042 en DIC)

- **Modelo 35.2**

En la siguiente Figura se puede ver la deformación en el instante común en DIC y en MEF, el punto máximo de fuerza de la curva Fuerza-Desplazamiento.

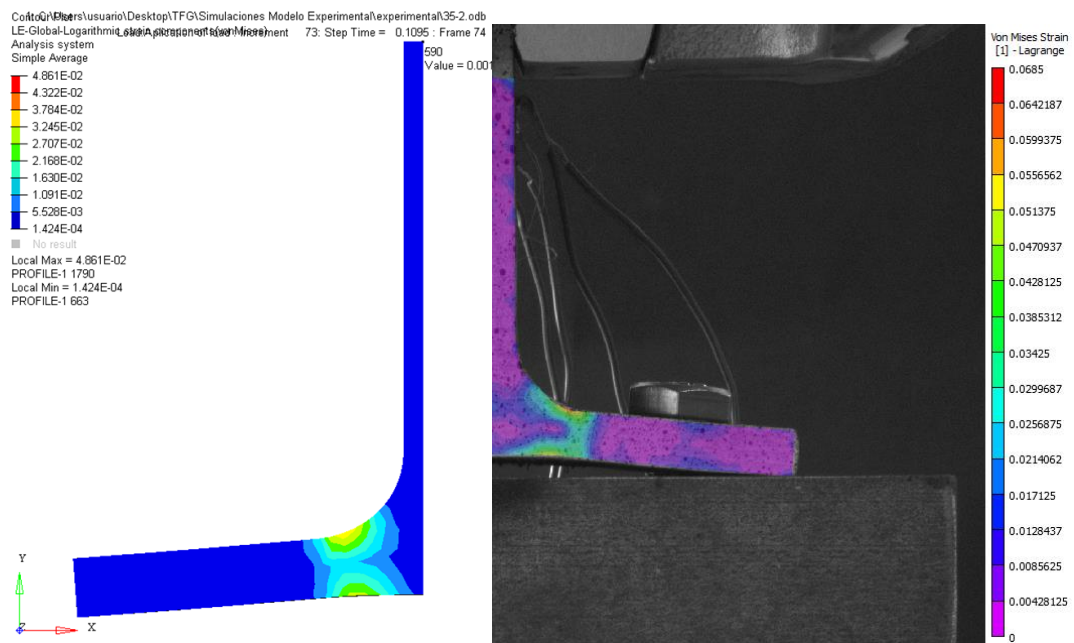


Figura 69: Deformación según MEF (izquierda) y DIC (derecha) para el modelo 35.2.

Se puede apreciar una mayor deformación en el encuentro del ala y del alma en ambas imágenes tanto en la parte superior como en la base del perfil. No hay mucha diferencia de valores entre los dos métodos. En las rotulas hay una diferencia aproximada de 2 centésimas de deformación (0.031 en MEF y 0.052 en DIC).

Con todos estos mapas se puede comprobar la localización de la rótula plástica que aparece en el encuentro del ala con el alma. Para ello se unen con una línea los

puntos de mayor deformación en las caras superior e inferior. De esa línea, se toma el punto medio y se mide con respecto a la cara del alma.

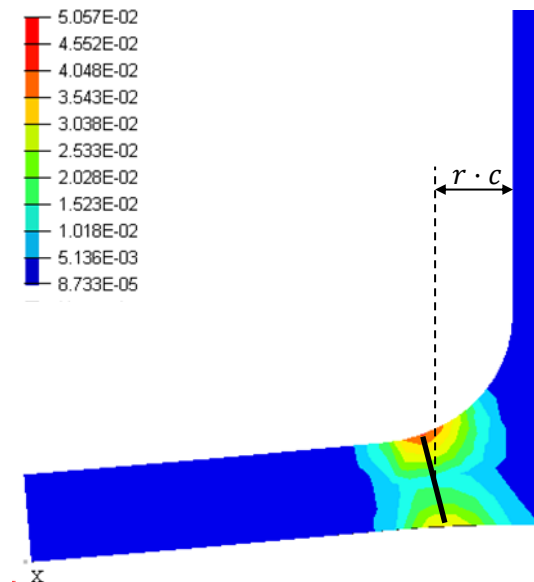


Figura 70: Localización de la rótula de plastificación del modelo 15.2 obtenido por el mapa de deformaciones en Abaqus.

Según el Eurocódigo 3, la distancia entre la línea de plastificación y el alma es $0.8 \cdot r$, es decir, el valor de c es 0.8. Se ha determinado el valor de c en el modelo experimental 15.2, obteniéndose los siguientes valores:

Método	c
EC3	0.8
MEF	0.69
DIC	0.66

Tabla 5: Valores de c obtenidos del modelo 15.2

Como se aprecia los valores experimental y numérico se parecen bastante, y ambos difieren ligeramente del valor propuesto por el Eurocódigo. Para comprobar la influencia del ancho efectivo en el valor de c , se obtienen los valores correspondientes a los modelos numéricos que se indican en la siguiente tabla:

Modelo	c
15.2	0.69
25.2	0.54
35.1	0.67

Tabla 6: Valores de c obtenidos con modelos de distinto ancho efectivo.

4.5.3. Deformación en el lateral del perfil.

La deformación (y también el desplazamiento) de lateral del perfil se determinan usando DIC 3D. Sin embargo, el procesamiento de las imágenes mediante DIC 3D no pudo llevarse a cabo, pues el software no es capaz de realizar la correlación entre las imágenes de las dos cámaras. El origen del error parece estar en el empleo de cámaras idénticas pero ópticas distintas (se emplearon los objetivos disponibles en el laboratorio, que tienen diferentes lentes), lo que ha generado unas imágenes con menor contraste y resolución que otras

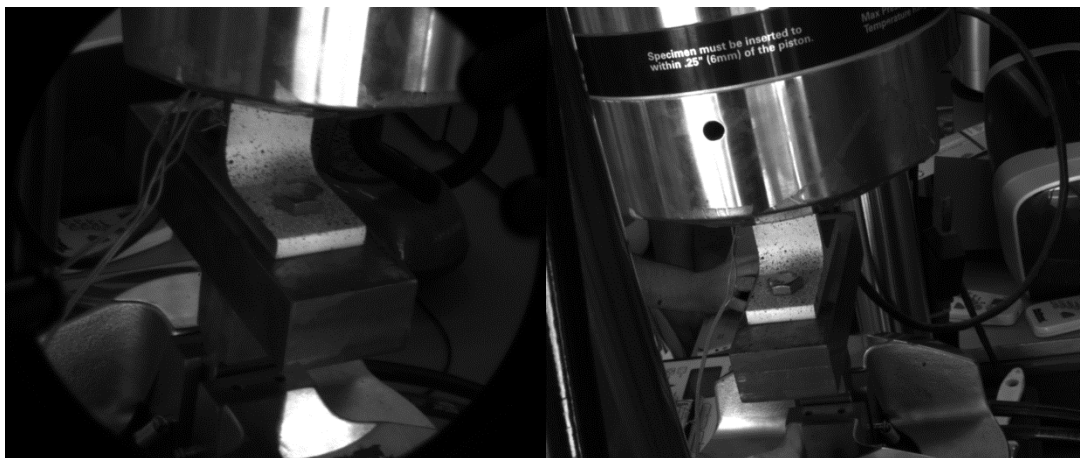


Figura 71: Imágenes capturadas para el DIC 3D.

Lo único que se puede comprobar es el modo de plastificación en la zona del tornillo con respecto a lo que dice el Eurocódigo. Todos los modelos, según el EC3, siguen el mecanismo de plastificación de patrón de viga. Esto se puede validar viendo el mapa de deformación plástica en la zona del tornillo. Todos los modelos tienen el mismo patrón de plastificación.

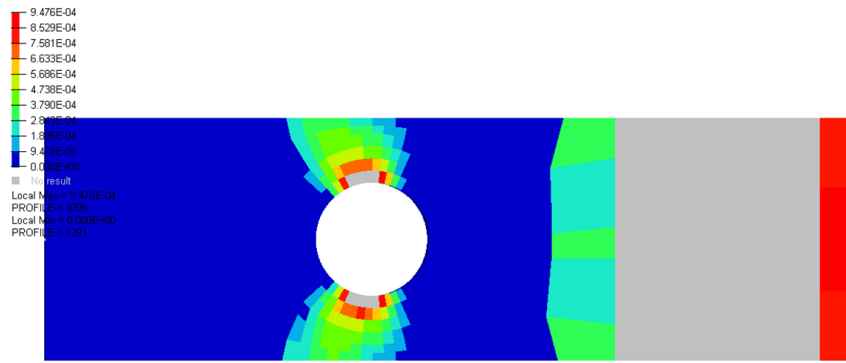


Figura 72: Mapa de deformación plástica en el ala.

4.5.4. Deformación en las caras del alma.

Utilizando la herramienta de extensómetro que dispone VIC-2D, podemos determinar la deformación en la cara frontal del perfil y compararlo con los datos de las galgas y los obtenidos por MEF. Solo se van a comparar en los tres modelos en los que se usaron galgas extensométricas.

- **Modelo 15.1**

Se va a comparar la deformación medida por DIC en el frontal del alma con la deformación de Von Mises obtenida del MEF y los datos de deformación de la galga frontal en régimen elástico del modelo.

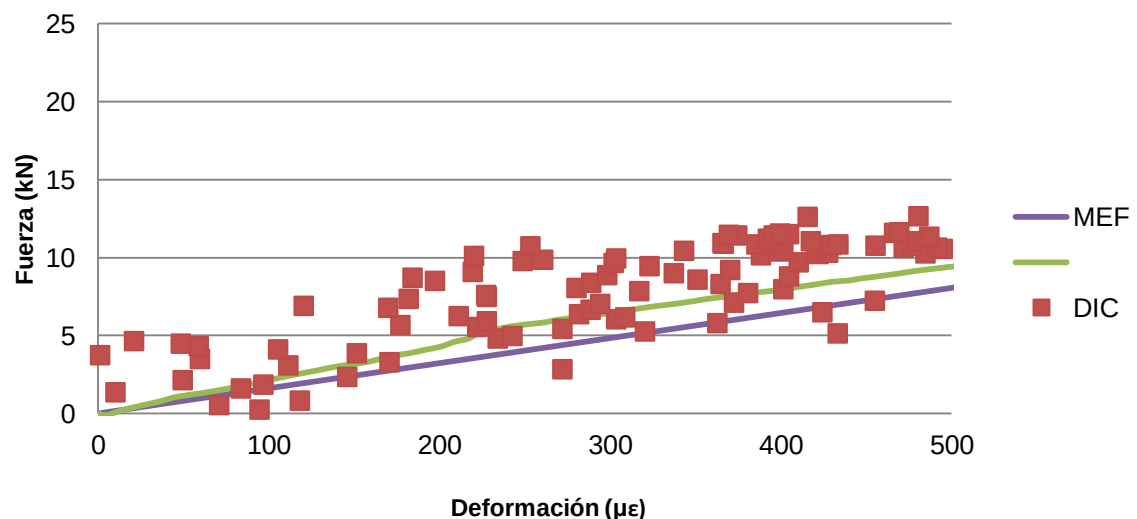


Figura 73: Deformación registrada por la galga frontal y los obtenidos por DIC y MEF del modelo 15.1.

Se puede apreciar que la deformación obtenida por MEF es casi igual que la registrada por las galgas. Sin embargo, los datos obtenidos por DIC siguen una tendencia igual que los otros datos pero con mayor dispersión.

Para el lateral del perfil se hace igual pero en este caso no hay datos en DIC, solo los datos de la galga lateral y los datos del MEF.

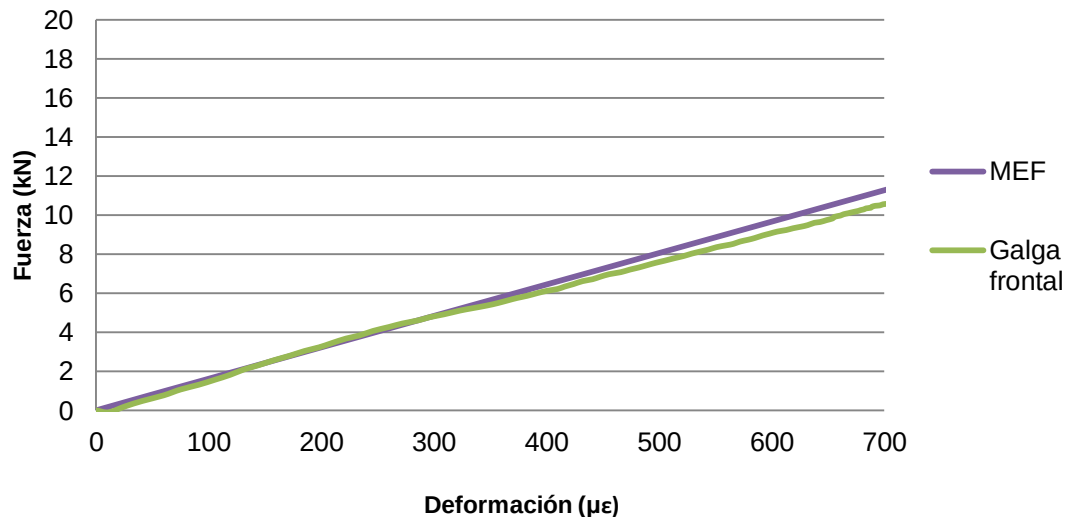


Figura 74: Deformación registrada por la galga lateral y la obtenida por MEF del modelo 15.1.

La deformación obtenida en MEF coincide prácticamente con la obtenida mediante la galga. Apenas hay diferencia salvo en un par de datos.

- **Modelo 25.1**

La deformación en el frontal del perfil medido por la galga, DIC y MEF es:

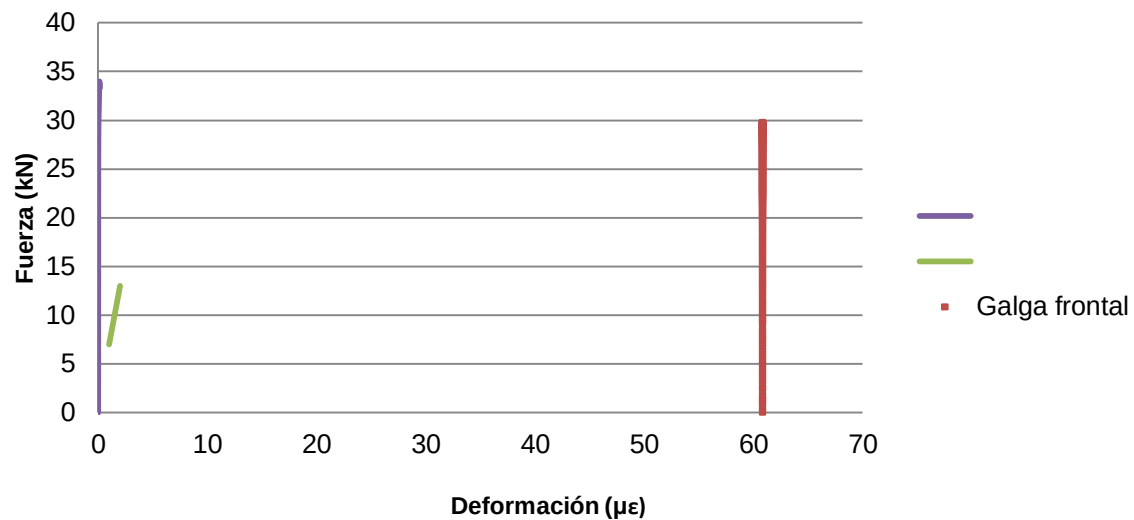


Figura 75: Deformación registrada por la galga frontal y los obtenidos por DIC y MEF del modelo 25.1.

Se puede apreciar que la deformación obtenida por MEF tiene la misma tendencia que la registrada por las galgas, aunque exista una diferencia entre ellas. Al igual que antes, datos obtenidos por DIC siguen una tendencia igual que los otros datos, sobre todo a la registrada por la galga, pero con mayor dispersión.

La deformación en el lateral del perfil medido por la galga y MEF es:

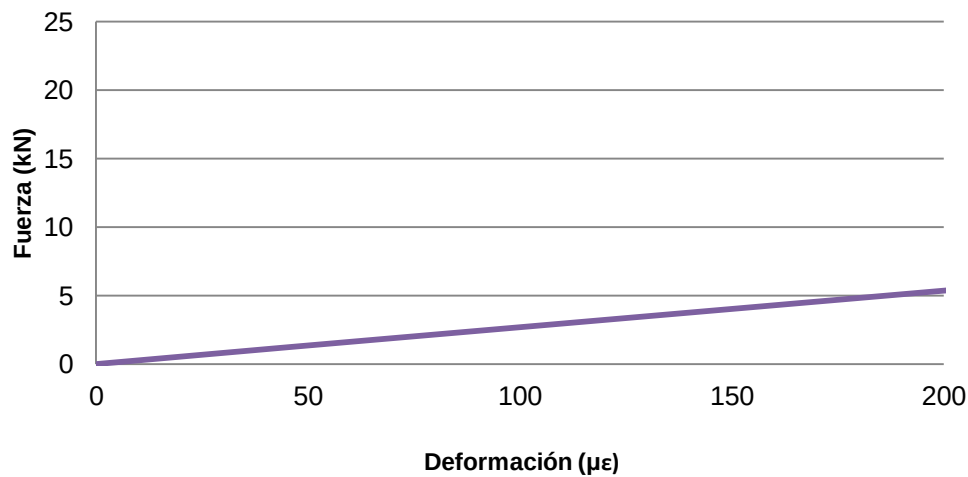


Figura 76: Deformación registrada por la galga lateral y la obtenida por MEF del modelo 25.1.

En este caso hay una gran diferencia entre la deformación de la galga y la del MEF. La galga en este ensayo empieza a fallar antes como se pudo ver en la gráfica donde se representaban ambas (Figura 46).

- **Modelo 35.2**

La deformación en el frontal del perfil medido por la galga, DIC y MEF es:

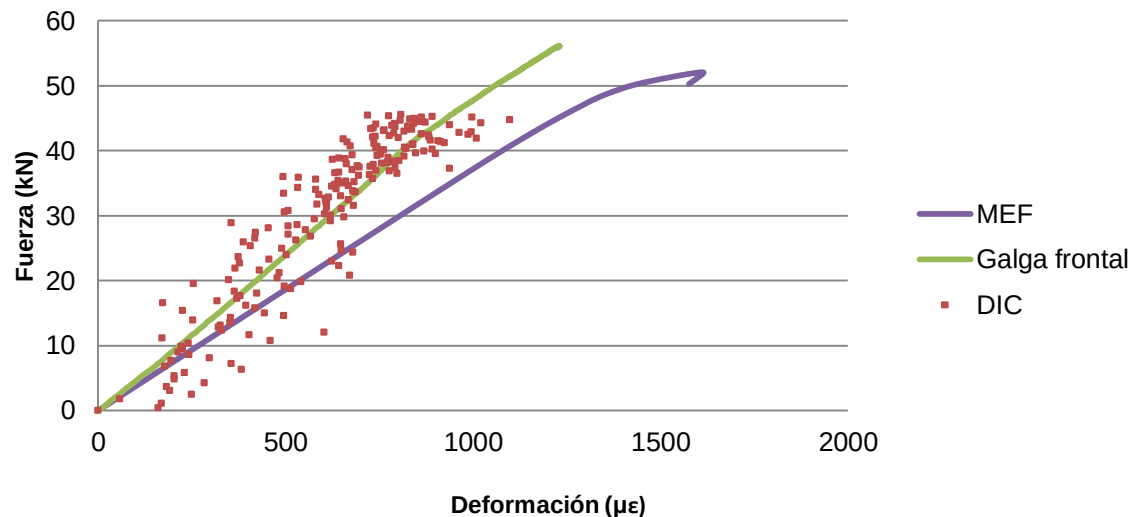


Figura 77: Deformación registrada por la galga frontal y los obtenidos por DIC y MEF del modelo 35.2.

Se puede apreciar que la deformación obtenida por MEF no tiene la misma tendencia que la registrada por las galgas mientras que los datos del DIC si siguen la tendencia de las galgas.

La deformación en el lateral del perfil medido por la galga y MEF es:

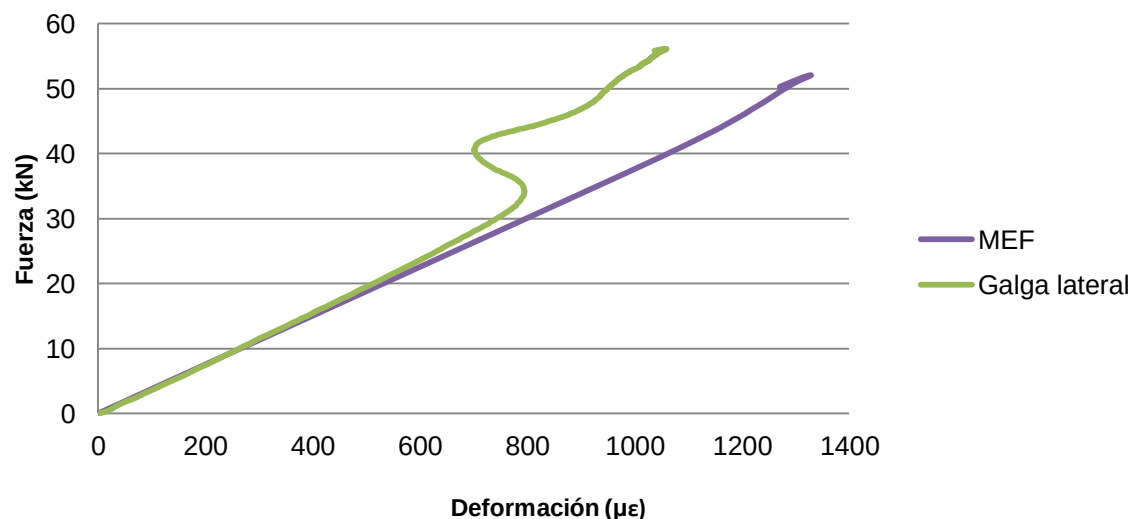


Figura 78: Deformación registrada por la galga lateral y la obtenida por MEF del modelo 25.1.

Se puede apreciar que la deformación obtenida por MEF sigue la misma tendencia que la registrada por la galga hasta que esta empieza a fallar.

4.5.5. Curvas Fuerza-Desplazamiento

Utilizando los datos de fuerza y desplazamiento obtenidos de los modelos experimentales se van a comparar con la curva obtenida por MEF y la curva de comportamiento propuesta por EC3. Las curvas Fuerza-Desplazamiento se pueden obtener fácilmente en MEF, ya que Abaqus da valores de fuerza de reacción en la cabeza del modelo y datos de desplazamiento en Y en todo el modelo. La curva de comportamiento según EC3 está formada usando los datos teóricos de la resistencia y geometría de los modelos.

La fuerza resistente del modelo se obtiene de la curva Fuerza-Desplazamiento. Dicha fuerza se identifica como el valor más alto del régimen elástico de la curva, es decir, de la zona lineal. Para ello se toma la rigidez inicial del modelo k_0 (pendiente del régimen lineal) y se representa una recta de pendiente $k = \frac{k_0}{3}$. El punto donde la recta corte con la curva Fuerza-Desplazamiento será el valor de la fuerza de resistencia. Esta consideración se aplica tanto para la curva experimental como para la obtenida por elementos finitos.

- **Modelo 15.1**

Las curvas del modelo se representan en la Figura siguiente.

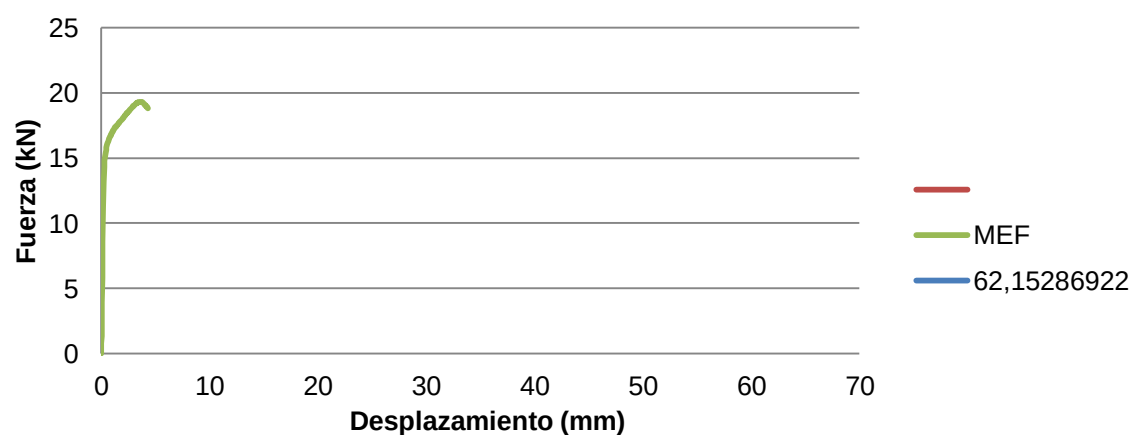


Figura 79: Curvas Fuerza-Desplazamiento del modelo 15.1.

Los valores numéricos se asemejan a la curva de comportamiento teórica del EC3, sin embargo no ocurre con la curva experimental. Presenta pendientes distintas y distintos valores en la zona de plastificación.

La fuerza resistente según el EC3 se determina según se ha explicado en el apartado 2.1.2. La inercia inicial se obtiene según el EC3, explicado en el apartado 2.1.4.

	Fuerza Resistente (kN)	Dif (%)	Rigidez Inicial (kN/mm)	Dif (%)
EC3	16.93	49.42	103.7	249.4
Experimental	11.33	-	29.73	-
MEF	16.59	46.43	62.15	109

Tabla 7: Valores de resistencia y rigidez inicial del modelo 15.1.

Los valores de resistencia de EC3 y de MEF son parecidas, como se puede ver en la gráfica. El valor de la resistencia experimental es menor en comparación con los otros métodos.

- **Modelo 15.2**

Las curvas del modelo se representan en la Figura siguiente.

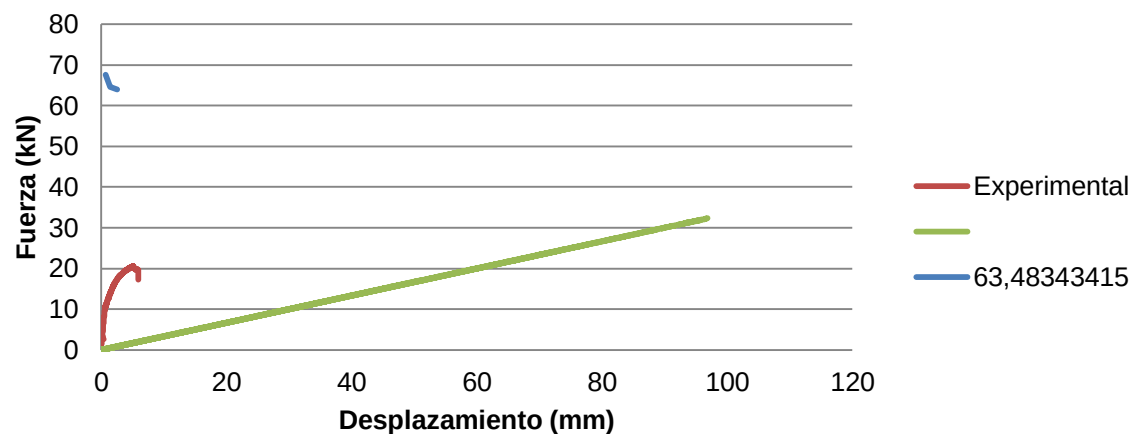


Figura 80: Curvas Fuerza-Desplazamiento del modelo 15.2.

Los valores numéricos se asemejan a la curva de comportamiento teórica del EC3 respecto a la zona elástica, sin embargo no ocurre con la curva experimental,

presenta pendientes distintas. En la zona plástica tampoco queda modelado correctamente.

La fuerza resistente según el EC3 se determina según se ha explicado en el apartado 2.1.2. La inercia inicial se obtiene según el EC3, explicado en el apartado 2.1.4.

	Fuerza Resistente (kN)	Dif (%)	Rigidez Inicial (kN/mm)	Dif (%)
EC3	16.93	43.84	103.7	535
Experimental	11.77	-	16.34	-
MEF	15.76	33.9	63.48	288

Tabla 8: Valores de resistencia y rigidez inicial del modelo 15.2.

Los valores de resistencia de EC3 y de MEF son parecidas pero existe cierta diferencia. El valor de la resistencia experimental es menor en comparación con los otros métodos.

- **Modelo 25.1**

Las curvas del modelo se representan en la Figura siguiente.

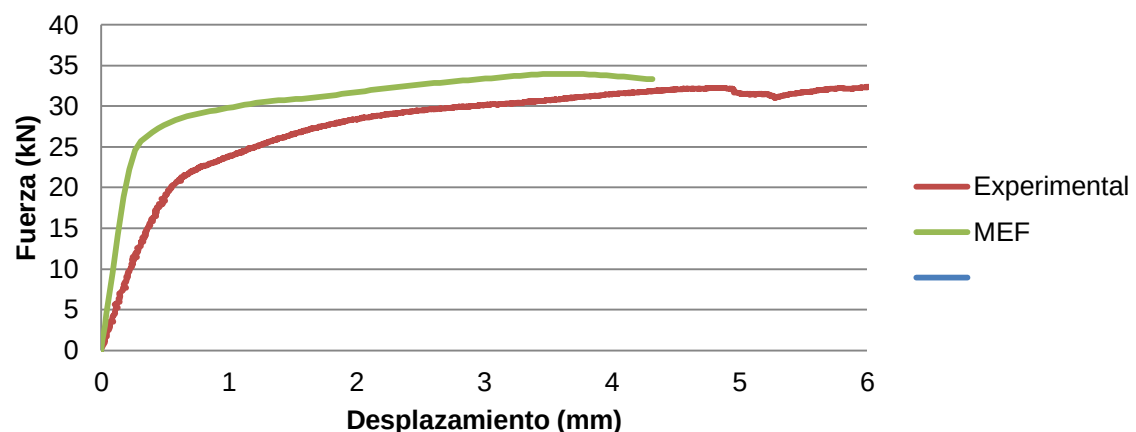


Figura 81: Curvas Fuerza-Desplazamiento del modelo 25.1.

Los valores numéricos se asemejan a la curva de comportamiento teórica del EC3 respecto a la zona elástica, sin embargo no ocurre con la curva experimental, presenta pendientes distintas. En la zona plástica el modelo del EC3 no se adapta

correctamente a la curva experimental y a la del MEF, unas curvas que siguen una tendencia de plastificación semejante aunque los valores no sean exactos

Se representa en una tabla la fuerza resistente y la rigidez inicial.

	Fuerza Resistente (kN)	Dif (%)	Rigidez Inicial (kN/mm)	Dif (%)
EC3	28.22	31.19	178.1	319
Experimental	21.51	-	42.52	-
MEF	27.66	27.89	108.6	155

Tabla 9: Valores de resistencia y rigidez inicial del modelo 25.1.

Entre los valores de resistencia existe cierta diferencia. El valor de la resistencia experimental es menor que la obtenida por MEF y esta menor que la propuesta por EC3. La rigidez inicial del modelo experimental varía bastante con respecto a los otros modelos.

- **Modelo 25.2**

Las curvas del modelo se representan en la Figura siguiente.

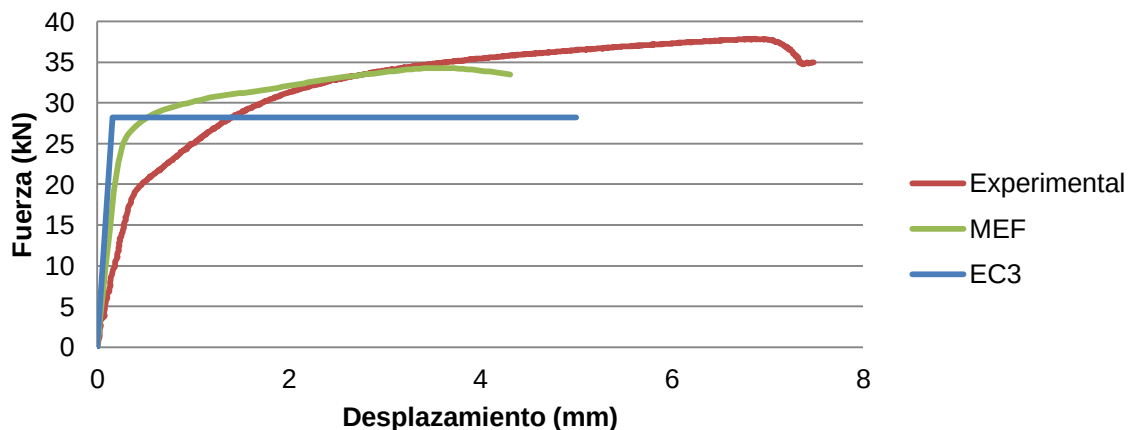


Figura 82: Curvas Fuerza-Desplazamiento del modelo 25.2.

Al igual que antes, la curva obtenida por MEF se asemeja a la curva de comportamiento teórica del EC3 en a la zona elástica y la curva experimental, presenta una pendiente distinta a estas. En la zona plástica el modelo del EC3 no se adapta correctamente a la curva experimental y a la del MEF, estas curvas tampoco se asemejan entre ellas.

Se representa en una tabla la fuerza resistente y la rigidez inicial.

	Fuerza Resistente (kN)	Dif (%)	Rigidez Inicial (kN/mm)	Dif (%)
EC3	28.22	36.99	178.1	246
Experimental	20.6	-	51.44	-
MEF	28.63	38.99	110.6	115

Tabla 10: Valores de resistencia y rigidez inicial del modelo 25.2.

• Modelo 35.1

Las curvas del modelo se representan en la Figura siguiente.

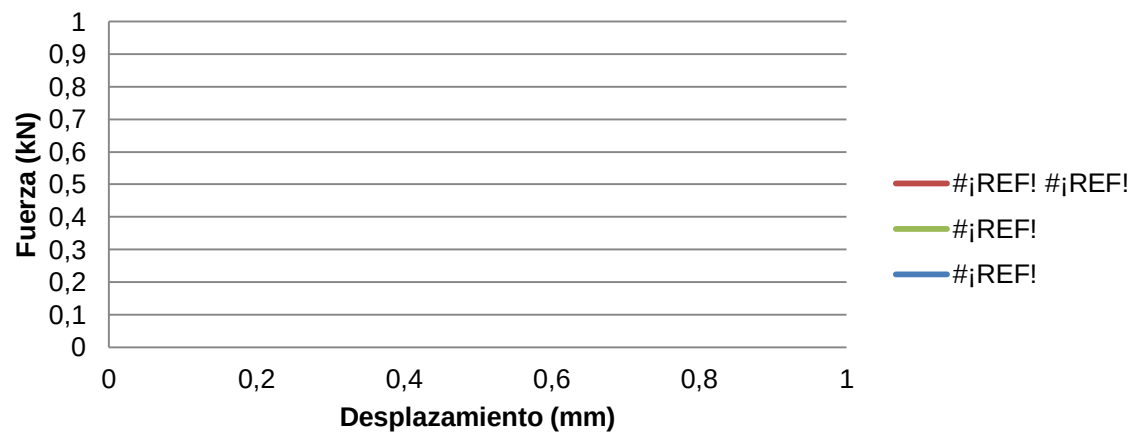


Figura 83: Curvas Fuerza-Desplazamiento del modelo 35.1.

Al igual que antes, la curva obtenida por MEF se asemeja a la curva de comportamiento teórica del EC3 en a la zona elástica y la curva experimental, presenta una pendiente distinta a estas. En la zona plástica el modelo del EC3 no se adapta correctamente a la curva experimental y a la del MEF, estas curvas tampoco se asemejan entre ellas.

Los valores de la fuerza resistente y de la rigidez inicial del modelo según el método son:

	Fuerza Resistente (kN)	Dif (%)	Rigidez Inicial (kN/mm)	Dif (%)
EC3	39.51	28.23	259.4	267
Experimental	30.74	-	70.62	-
MEF	43.64	41.96	139.6	97.66

Tabla 11: Valores de resistencia y rigidez inicial del modelo 35.1.

- **Modelo 35.2**

Las curvas del modelo se representan en la Figura siguiente.

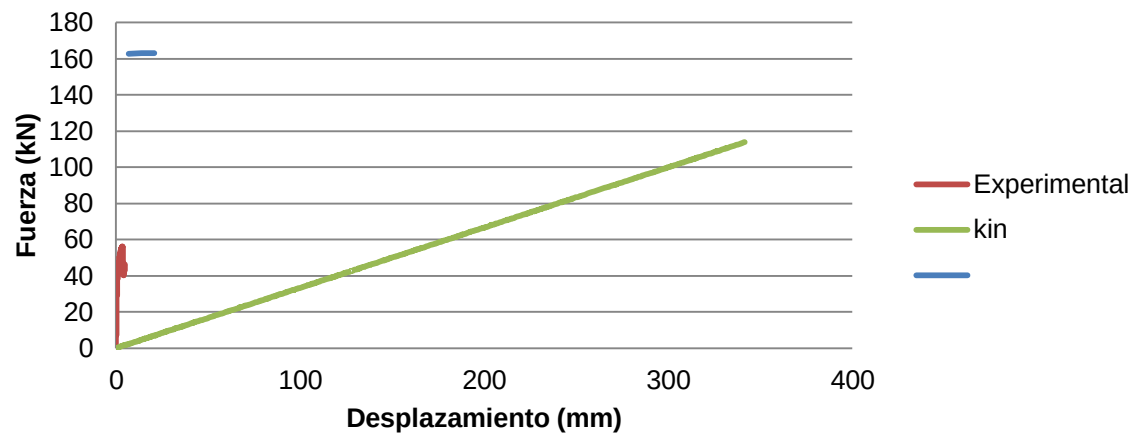


Figura 84: Curvas Fuerza-Desplazamiento del modelo 35.2.

Al igual que los casos anteriores, la curva obtenida por MEF se asemeja a la curva de comportamiento teórica del EC3 en a la zona elástica y la curva experimental, presenta una pendiente distinta a estas. En la zona plástica el modelo del EC3 no se adapta correctamente a la curva experimental y a la del MEF, estas curvas tampoco se asemejan entre ellas, aunque las fuerzas máximas alcanzadas sean parecidas.

Los valores de la fuerza resistente y de la rigidez inicial del modelo según el método son:

	Fuerza Resistente (kN)	Dif (%)	Rigidez Inicial (kN/mm)	Dif (%)
EC3	39.51	10.67	259.4	268
Experimental	35.7	-	70.41	-
MEF	43.2	21.01	154.60	119

Tabla 12: Valores de resistencia y rigidez del modelo 31.2.

4.5.6. Modo de fallo.

Por último, en este apartado se va a analizar el modo de fallo de los modelos ensayados. De los modelos que fueron ensayados hasta rotura, todos fallaron por el tornillo, mediante fallo en un filete. En MEF, la rotura no se representa, pero las mayores tensiones son alcanzadas en el tornillo y simulando más allá de la fuerza máxima, se puede ver como el tornillo se deforma exageradamente, estimando que la rotura se produciría en este.

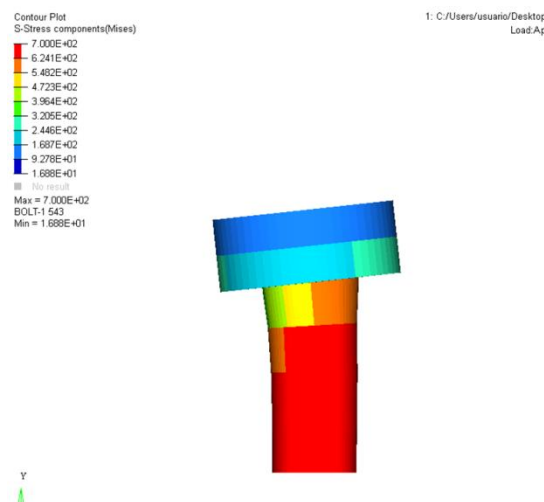


Figura 85: Mapa de tensiones (Von Mises) en el tornillo.

Y para terminar, estos modelos fueron diseñados según el EC3 para que rompieran en Modo 1 y en todos los modelos se han producido rotulas plásticas en el encuentro ala-alma, sin embargo, en todos los modelos experimentales la plastificación en la zona del tornillo o es nula o despreciable. Esto indica que algunos rompieron en modo 2, de hecho, se encuentran en el limite entre modo 1 y modo 2. Esto es debido a que el acero caracterizado ha resultado ser mas resistente que lo estipulado. En Abaqus la plastificación en la zona del tornillo ocurre durante poco tiempo.

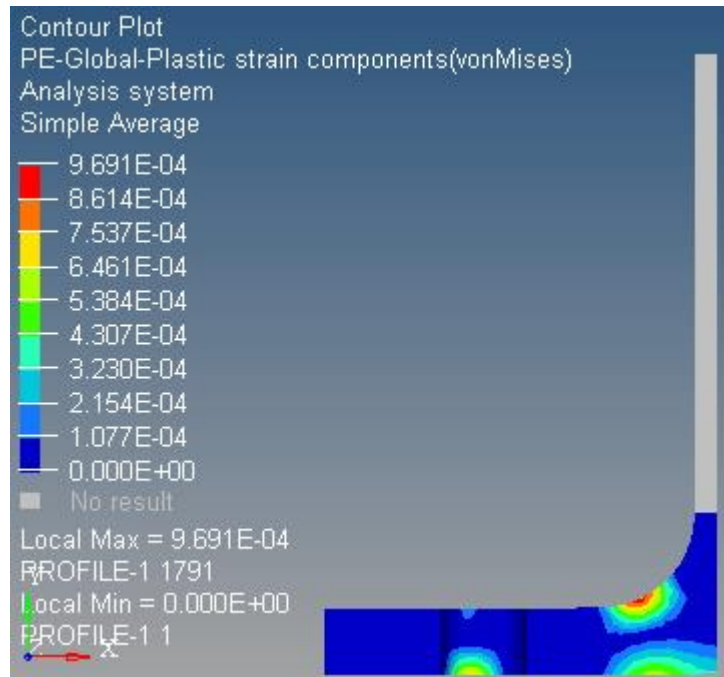


Figura 86: Deformación plástica en el modelo 35.2. Sección de corte.

En DIC apenas puede dicha plastificación salvo pequeñas deformaciones y según el EC3 y utilizando las propiedades mecánicas ensayadas, solo los modelos de 35 mm rompen en modo 1, los demás rompen en modo 2 por poca diferencia.

La mayoría de los tornillos presentaron deformación plástica aparente que, como se ha podido ver en las imágenes de los modelos después del ensayo, están doblados. Además presentan los fallos en los filetes, sobretodo en las tuercas utilizadas.



Figura 87: Tornillos deformados correspondientes al modelo 25.1 (arriba) y del modelo 35.2 (abajo).

4.6. Conclusiones

Tras ensayar, procesar y analizar los datos de los modelos, se pueden sacar varias conclusiones. En la metodología han aparecido problemas en los que algunos se han podido solucionar, las conclusiones a sacar son:

- Para poder realizar un ensayo DIC 3D es necesario tener los mismos objetivos y las mismas cámaras para establecer el mismo nivel de contraste, brillo, enfoque... en ambas cámaras y estudiar la iluminación tanto de la pieza como del entorno.
- Además, debe prepararse una cabeza de amarre específica para poder visualizar el lateral del alma o tener una altura de alma mayor.
- Hay que estudiar los parámetros de influencia del DIC en los resultados obtenidos. Desde moteado, características de la cámara, velocidad de ensayo hasta el propio análisis en el software (tamaño de subdominio, filtros...) para reducir el ruido y obtener resultados más precisos en consecuencia del fallo en DIC 3D.

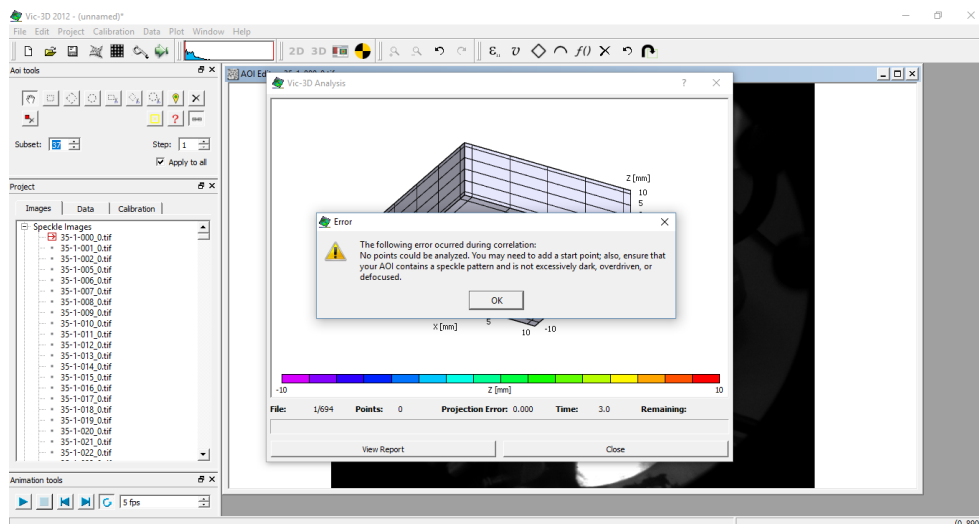


Figura 88: Mensaje de error del DIC 3D.

Respecto a los resultados, el modelo experimental, salvo contadas ocasiones, no corresponde con el modelo numérico respecto a los valores obtenidos. La razón probablemente sea la falta de información mecánica de los tornillos utilizados.

Para el modelo numérico se utilizó un modelo de comportamiento bilineal basándose en propiedades mecánicas teóricas. No obstante, los mapas de deformación y desplazamiento son bastantes similares en forma y distribución.

Entonces, como conclusiones:

- El EC3 se ajusta bien al modelo numérico en zona elástica. En la zona de plastificación, el modelo propuesto por EC3 ya no se adapta correctamente.
- El fallo no queda representado en el MEF pero se ha visto que experimentalmente el fallo ha llegado a distintos niveles de carga, aunque desde un principio no era el objetivo a seguir
- Se hace necesario caracterizar mecánicamente los tornillos. Además, se requiere que las tuercas utilizadas sean del mismo material que los tornillos.
- Las galgas han resultado útiles durante los primeros niveles de carga, pero después empezaron a fallar y dieron niveles de deformación aleatorios.
- Se puede comprobar en algunos modelos que la posición real de la línea de plastificación en el encuentro ala-alma difiere con lo establecido en la norma.
- Los datos de deformación dado por DIC, a pesar del ruido, siguen la misma tendencia que los datos registrados por las galgas.
- Existe una gran diferencia entre valores de resistencia y rigidez de los modelos experimentales respecto de los demás modelos

	15.1		15.2		25.1		25.2		35.1		35.2	
	F (kN)	Dif (%)	F (kN)	Dif (%)	F (kN)	Dif (%)	F (kN)	Dif (%)	F (kN)	Dif (%)	F (kN)	Dif (%)
Exp	11.33	-	11.77	-	21.51	-	20.6	-	30.74	-	35.7	-
EC3	16.93	49.42	16.93	43.84	28.22	31.19	28.22	36.99	39.51	28.23	39.51	10.67
MEF	16.59	46.43	15.76	33.9	27.66	27.89	28.63	38.99	43.64	41.96	43.2	21.01

Tabla 13: Resistencia de todos los modelos.

	15.1		15.2		25.1		25.2		35.1		35.2	
	k_0 (kN/mm)	Dif (%)	k_0 (kN/mm)	Dif (%)	k_0 (kN/mm)	Dif (%)	k_0 (kN/mm)	Dif (%)	k_0 (kN/mm)	Dif (%)	k_0 (kN/mm)	Dif (%)
Exp	29.73	-	16.34	-	42.52	-	51.44	-	70.62	-	70.41	-
EC3	103.74	249.4	103.74	535	178.13	319	178.13	246	259.35	267	259.35	268
MEF	62.15	109	63.48	288	108.55	155	110.57	115	139.59	97.66	154.60	119

Tabla 14: Rigidez inicial de todos los modelos.

- El modo de fallo se ha visto modificado respecto a cómo se había diseñado, presentándose modo de fallo 2 cuando se diseñó en modo 1.
- El tornillo ha presentado rotación en algunos de los modelos ensayados. En simulaciones a niveles altos de tiempo de ensayo también se presenta rotación en la cabeza del tornillo.

5. Estudio Paramétrico

5.1. Objetivo

En este estudio se utilizará el código en elementos finitos de Abaqus anteriormente descrito en el apartado 4.2. Para ello, se va a considerar unos parámetros constantes: el material para el ala y el alma será el mismo que el caracterizado para el programa experimental, el tornillo será supuesto como M6 de acero de grado 8.8 (la curva tensión deformación de este se simplificará como un comportamiento bilineal), el perfil T utilizado será la mitad de una IPE 200 (como en el programa experimental) y solo se dispondrá de una fila de tornillos.

Con estas especificaciones, se estudiara la influencia de la resistencia de la T-stub en función de distintos parámetros geométricos. Para ello, se variará un parámetro en particular manteniendo constantes el resto. Finalmente se representará dicha resistencia en función de la variable.

5.2. Estudio para un valor λ constante

El primer estudio consiste en estudiar la resistencia de la T-stub manteniendo constante la posición del tornillo, es decir, n y m permanecen constantes y por lo tanto λ también será constante, ya que según la ecuación (2) $\lambda = \frac{n}{m} \leq 1.25$.

El primer valor de λ a considerar es el valor límite impuesto por el EC3 [1]: 1.25. No obstante el valor tomado no será exacto, sino aproximado a este. Los valores a considerar de n , m y λ son:

Estudio	n (mm)	m (mm)	λ
1	20,5	17,10	1,199

Tabla 15: Valores constantes para el Estudio 1 (λ constante)

El valor que se variará es el ancho disponible l . Para conocer el rango de valores de l a ensayar se usará los criterios de fallo del de la T-stub. Al aumentar l , la resistencia del perfil irá aumentando y a su vez, la resistencia del modelo en modo 1 y en menor medida el modo 2. Sin embargo, la resistencia en modo 3 no cambia porque depende de la resistencia de los tornillos, por lo tanto, llegará un punto donde un valor de l suponga fallo en modo 3 y por lo tanto, la resistencia del modelo no variará por más que aumente l .

Los valores partirán desde 15 hasta 50 de cinco en cinco. Luego, si fuera necesario, se simularían anchos distintos para buscar más precisión.

Una vez simulados en Abaqus, se sacan los valores de fuerza y desplazamiento en la parte superior del alma, obteniendo así una curva Fuerza-Desplazamiento para cada ancho disponible.

Para determinar el valor de la resistencia del componente T-stub se observa la curva Fuerza-Desplazamiento y se toma el valor máximo del régimen lineal. Para

ello se toma la rigidez inicial del modelo k_0 (pendiente del régimen lineal) y se representa una recta de pendiente $k = \frac{k_0}{3}$. Esta recta corta con la curva Fuerza-Desplazamiento y el valor por donde corta es el valor de fuerza resisteste.

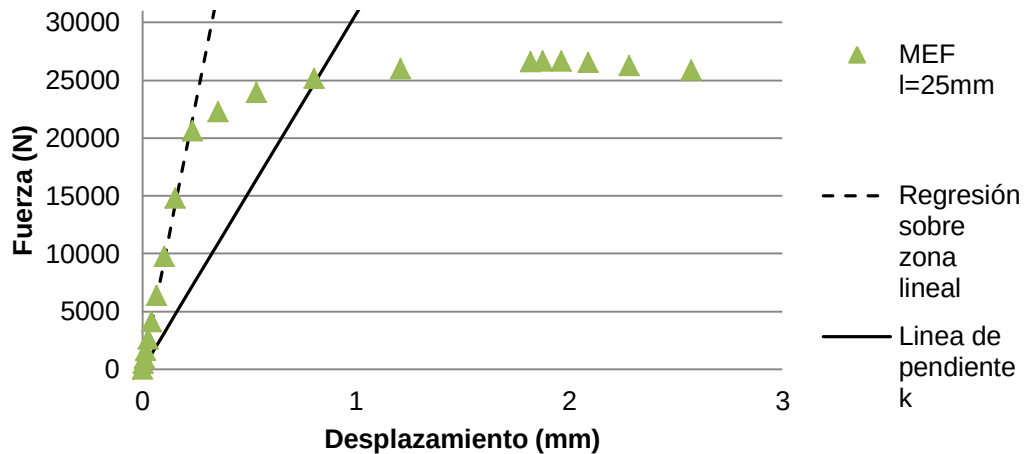


Figura 89: Curva Fuerza-Desplazamiento para un ancho disponible de 25 mm. Obtención del valor de la resistencia del modelo.

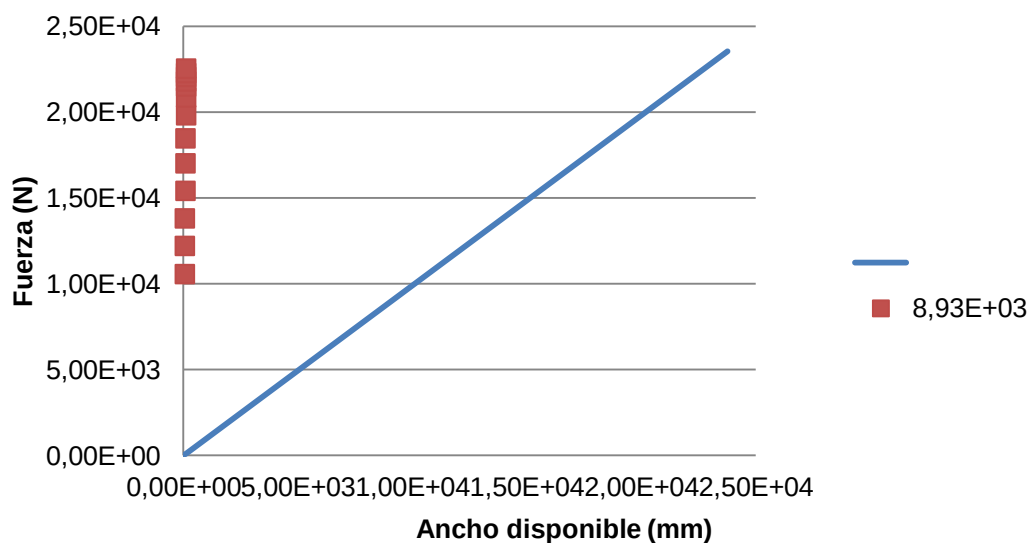


Figura 90: Grafica Fuerza-Ancho disponible según MEF y EC3 para $\lambda \approx 1.25$.

Los valores obtenidos por elementos finitos siguen la misma tendencia que los obtenidos según el Eurocódigo 3. Para el primer ancho, el modelo se encuentra en modo 1. A partir de ese punto, los modelos se encuentran en modo 2 hasta llegar a un ancho de 42 mm para la curva obtenida usando el Eurocódigo. Todos los modelos con un ancho mayor de 42 mm estarán en modo 3. En los datos obtenidos por elementos finitos se puede ver que para un ancho de 45 mm ya se comporta en

modo 3, siguiendo esta tendencia los anchos de 50 mm y 55 mm. Se han realizado simulaciones para anchos mayores (70, 80, 90 mm) y se puede ver que, aunque la resistencia debería ser la misma, esta aumenta aunque ligeramente.

El segundo valor de λ a estudiar es 1.1. Los valores a considerar de n , m y λ son:

Estudio	n (mm)	m (mm)	λ
2	19,7	17,9	1,100558659

Tabla 16: Valores constantes para el Estudio 2 (λ constante)

Para conocer de nuevo el rango de valores de l a ensayar se estudiarán los modos de fallo para estos valores. Los anchos que se van a simular partirán desde 15 hasta 70 de cinco en cinco y hasta 90 de diez en diez. Luego, si fuera necesario, se simularían anchos distintos para buscar más precisión.

Una vez simulados en Abaqus, se sacan los valores de fuerza y desplazamiento en la parte superior del alma, obteniendo así una curva Fuerza-Desplazamiento para cada ancho disponible.

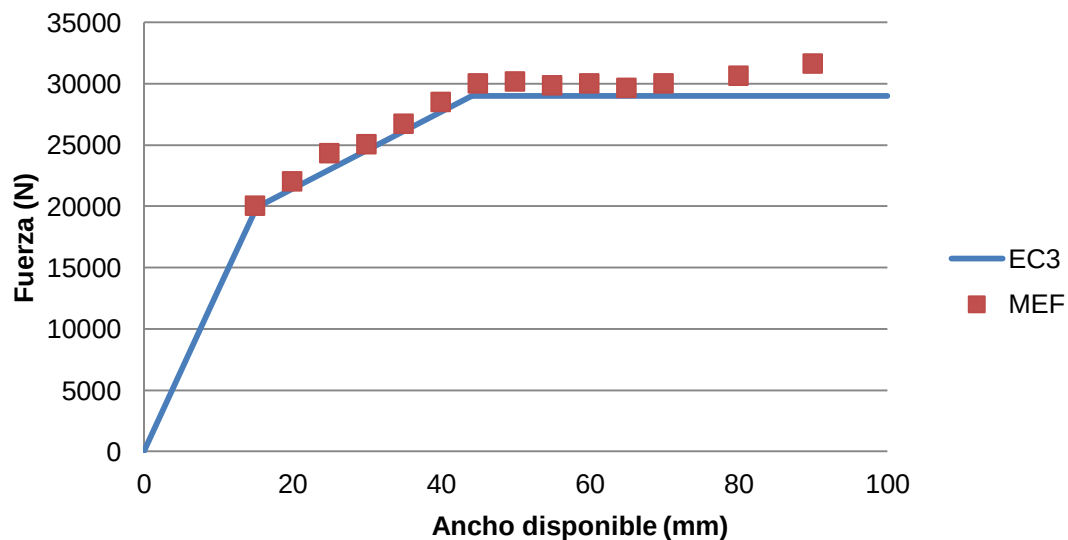


Figura 91: Gráfica Fuerza-Ancho disponible según MEF y EC3 para $\lambda = 1.1$.

Los valores obtenidos por elementos finitos siguen la misma tendencia que los obtenidos según el Eurocódigo 3. Para el primer ancho, el modelo se encuentra en modo 1. A partir de ese punto, los modelos se encuentran en modo 2 hasta llegar a un ancho de 44 mm según el EC3 y 45 mm para los datos obtenidos por MEF donde

a partir de estos anchos, los modelos se encuentran en modo 3. Se han realizado simulaciones para anchos mayores (60, 65, 70, 80 y 90 mm) y se puede ver que, aunque la resistencia debería ser la misma, esta aumenta aunque ligeramente al aumentar el ancho, sobre todo a partir del ancho de 70 mm.

Como conclusión, se puede comprobar que los resultados obtenidos por elementos finitos se ajustan bien a los valores de resistencia dados por el Eurocódigo 3.

5.3. Estudio para un valor l constante

La segunda parte del estudio paramétrico consiste en estudiar la resistencia de la T-stub manteniendo constante el ancho disponible l . Por lo tanto, y al contrario que en la primera parte, la variable será la posición del tornillo, representada por n y relacionado con λ , parámetro que se utilizará para comparar los valores de resistencia.

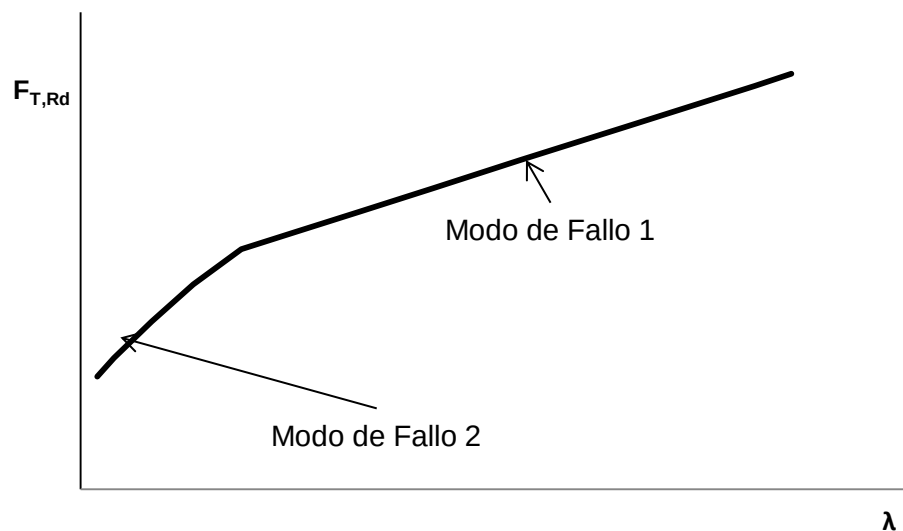


Figura 92: Curva teórica de la fuerza resistente según λ .

El primer valor de l a considerar es:

Estudio	l (mm)
3	15

Tabla 17: Valores constantes para el Estudio 3 (l constante)

La variable referencia es la posición del tornillo n . Los valores de n para ensayar van desde 10 mm hasta el límite $\lambda \cong 1.25$, en este caso 20.10 mm. El intervalo entre distintos n a ensayar será de 2 mm.

Una vez simulados en Abaqus, se sacan los valores de fuerza y desplazamiento en la parte superior del alma, obteniendo así una curva Fuerza-Desplazamiento para cada ancho disponible.

Para determinar el valor de la resistencia del componente T-stub se observa la curva Fuerza-Desplazamiento y se toma el valor máximo del régimen lineal. Ese valor se representa en función de λ y se compara con la curva teorica.

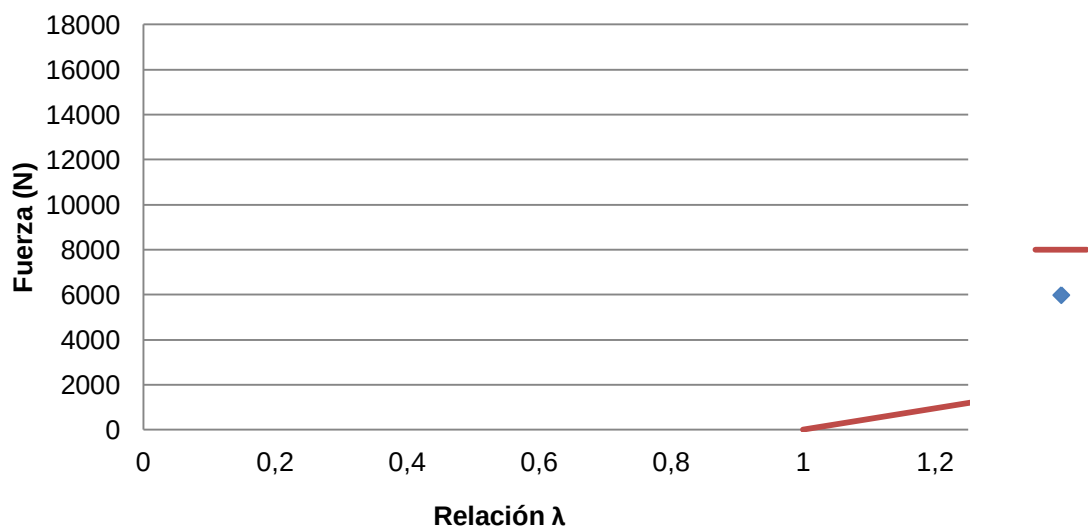


Figura 93: Curva Fuerza Resistente- λ para un ancho de 15 mm.

Hay discrepancia de valores debido a la resistencia del modelo numérico. Los datos del material en Abaqus provienen de la caracterización del material para el programa experimental. El acero tenía que tener, teóricamente, un límite elástico de 275 MPa, valor que se ha utilizado para obtener la curva Fuerza- λ según en EC3. Sin embargo, el acero utilizado tiene un límite elástico de 326 MPa. Por lo tanto, los valores de resistencia son mayores en el MEF.

Se puede calcular de nuevo la curva del EC3 usando en este caso el valor del límite elástico real. La nueva gráfica resulta:

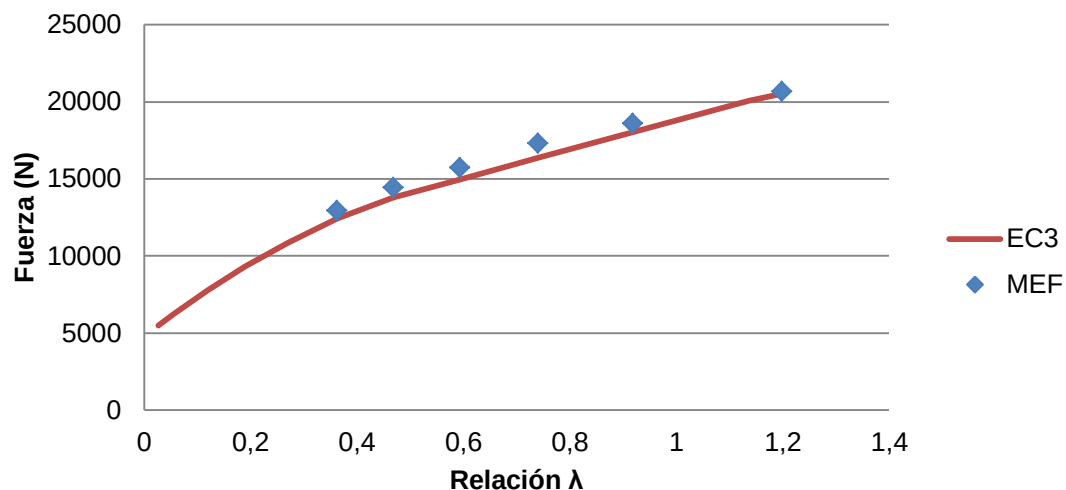


Figura 94: Nueva curva Fuerza Resistente- λ para un ancho de 15 mm.

Esta gráfica demuestra lo anteriormente supuesto. Ahora se puede ver como los datos de la simulación concuerdan con los del EC3. A partir de ahora se utiliza esta curva del EC3.

El siguiente valor de l a considerar es:

Estudio	l (mm)
4	25

Tabla 18: Valores constantes para el Estudio 4 (l constante)

Los valores de n para ensayar van desde 10 mm hasta el límite 20.5 mm. El intervalo entre distintos n a ensayar será de 2 mm. La curva Resistencia- λ resultante se compara con la curva teorica y queda:

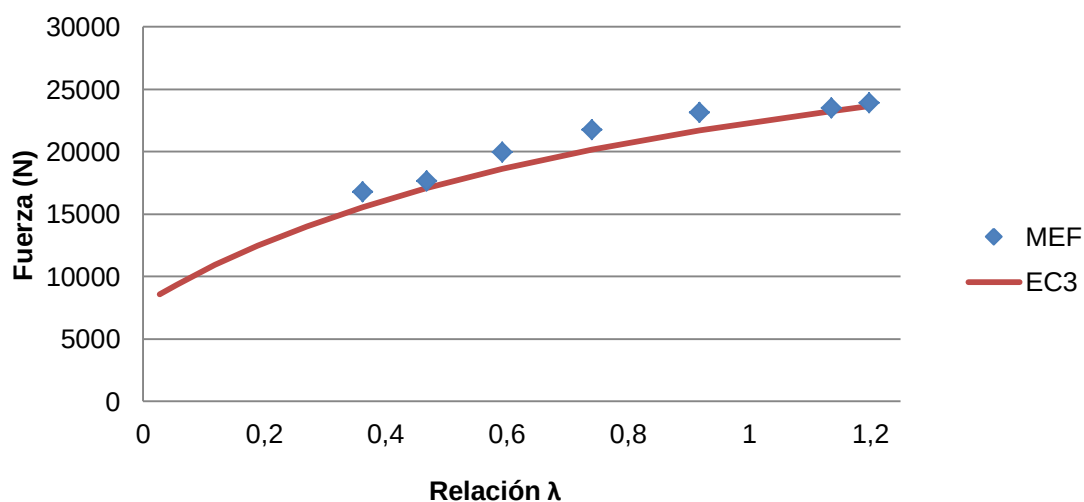


Figura 95: Curva Fuerza Resistente- λ para un ancho de 25 mm.

Los datos de la simulación se adaptan bien a los del EC3. Para este caso, toda la curva del EC3 se encuentra en modo de fallo 2.

El siguiente valor de l a considerar es:

Estudio	l (mm)
5	35

Tabla 19: Valores constantes para el Estudio 5 (l constante)

Los valores de n para ensayar van desde 8 mm hasta el límite $\lambda \cong 1.25$, siendo aproximadamente 20.5 mm. El intervalo entre distintos n a ensayar será de 2 mm.

La curva Resistencia- λ resultante se compara con la curva teorica y queda:

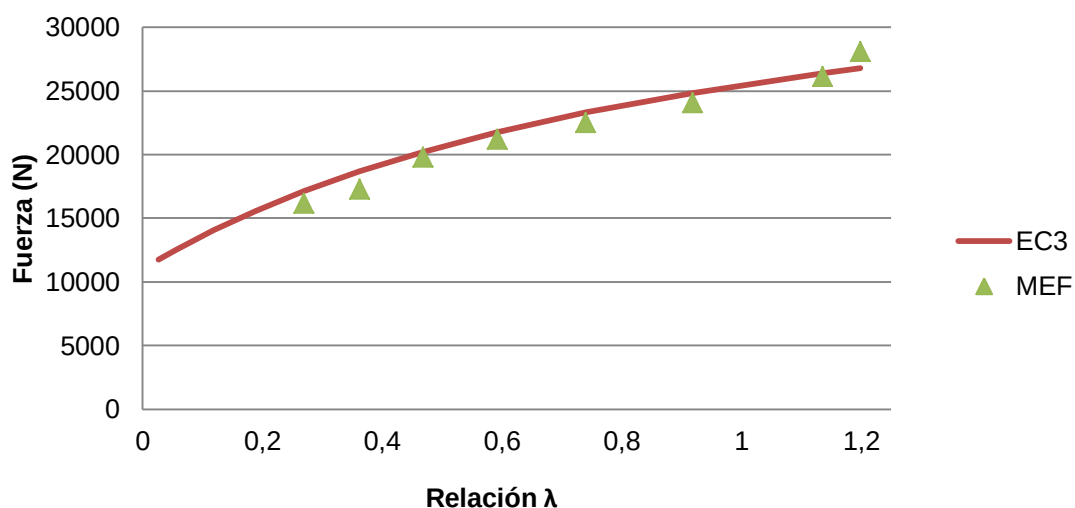


Figura 96: Curva Fuerza Resistente- λ para un ancho de 35 mm.

Los datos de la simulación se adaptan bien a los del EC3 y al igual que antes, toda la curva del EC3 se encuentra en modo de fallo 2.

Por último, tomamos del Estudio 1 el valor de l igual a 42 mm que es, aproximadamente, donde pasa de modo de fallo 2 a modo de fallo 3:

Estudio	l (mm)
6	42

Tabla 20: Valores constantes para el Estudio 6 (l constante)

Los valores de n para ensayar van desde 10 mm hasta el límite $\lambda \cong 1.25$, siendo aproximadamente 20.5 mm. El intervalo entre distintos n a ensayar será de 2 mm.

Una vez simulados en Abaqus, se sacan los valores de fuerza y desplazamiento en la parte superior del alma, obteniendo así una curva Fuerza-Desplazamiento para cada ancho disponible. La curva Resistencia- λ resultante se compara con la curva teorica y queda:

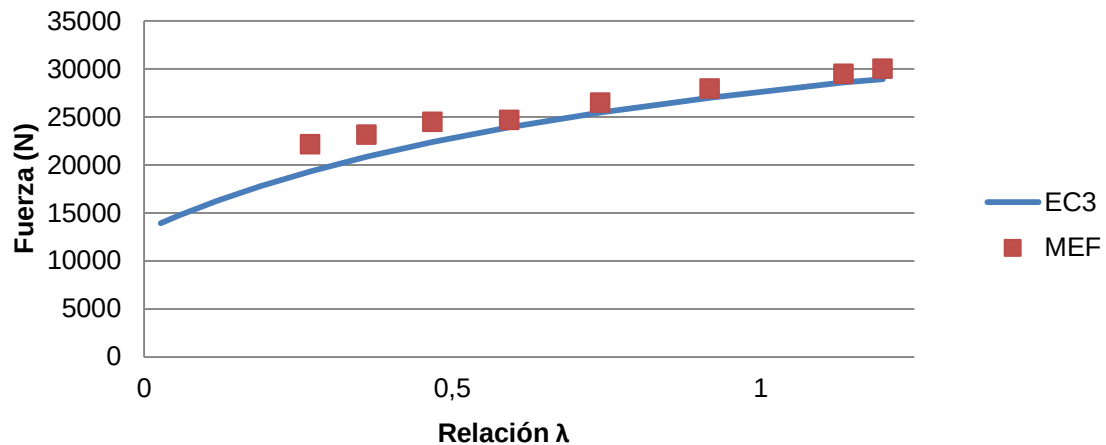


Figura 97: Curva Fuerza Resistente- λ para un ancho de 42 mm.

Los datos de la simulación se adaptan bien a los del EC3 salvo con valores de λ bajos y toda la curva del EC3 se encuentra en modo de fallo 2 salvo el último punto, que está en modo 3.

5.4. Estudio de tendencia hacia valores máximos

Por último, se va a estudiar la tendencia de las curvas anteriormente descritas cuando son valores máximos. Se va a intentar simular en Abaqus valores extremos y obtener los resultados.

En los primeros estudios de λ constante ya se han representado valores grandes de ancho disponible. El máximo que se pudo simular fue de 90 mm y la tendencia de la resistencia es a crecer lentamente a pesar de encontrarse en modo 3. Este fenómeno se da en los dos estudios de λ constante.

Para los otros estudios, teóricamente, el EC3 establece un límite de $\lambda=1.25$. Sin embargo, y a modo de excepción, se van a realizar simulaciones para valores de λ superiores a 1.25.

Para un ancho de 15 mm se llegó a simular hasta una distancia n de 28 mm. Más allá de esa distancia supone que el tornillo esté en la zona de transición ala-alma, dando problemas la simulación. La curva Resistencia- λ resultante se compara con la curva teorica y queda:

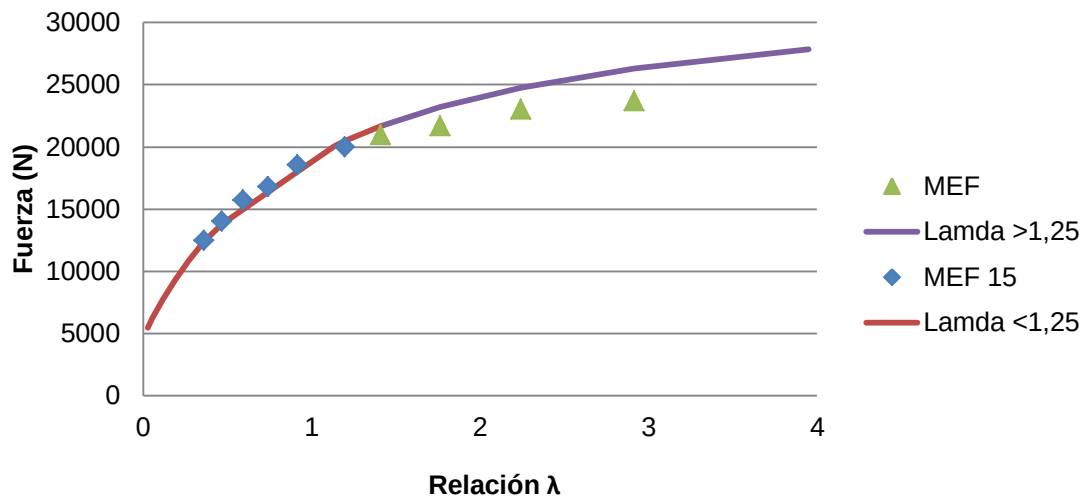


Figura 98: Curva Fuerza Resistente- λ con tendencia a valores máximos.

Como se puede observar, la resistencia sigue creciendo pero a menor ritmo a pesar de que la resistencia según el Eurocódigo siga creciendo. Esto es porque las ecuaciones que se utilizan no tienen en cuenta valores de λ superiores al límite impuesto por esta norma.

Observando las curvas Fuerza-Desplazamiento obtenidos se puede observar como la fuerza máxima llega a menor desplazamiento y por tanto, la rotura se produce a menor desplazamiento.

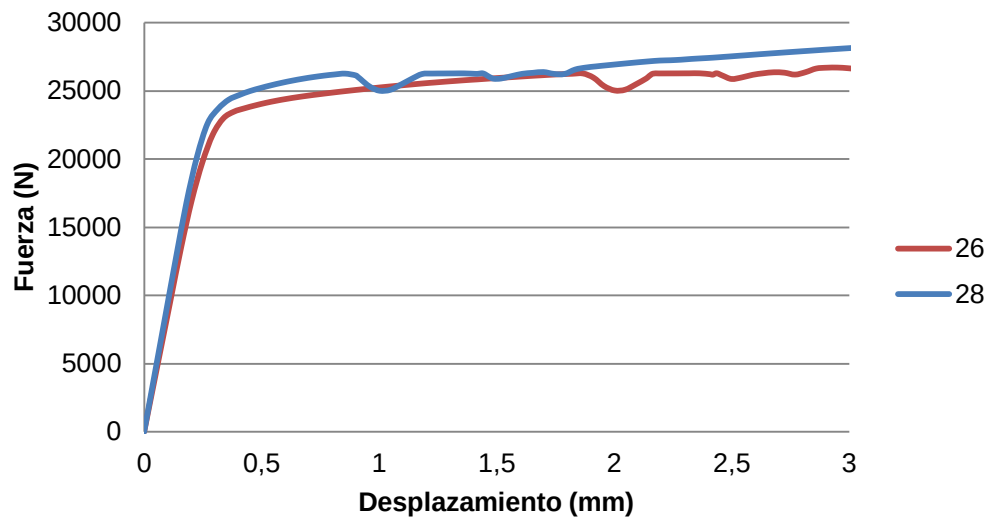


Figura 99: Curvas Fuerza-Desplazamiento para distintos valores de n .

5.5. Conclusiones

Observando las gráficas obtenidas en cada estudio podemos decir que los valores de resistencia se adaptan bien a los valores obtenidos por el EC3. No obstante, cabe resaltar que el método utilizado para hallar la resistencia ha sido el de tomar como valor máximo aquel que era cortado por una recta con una pendiente $1/3$ de la rigidez inicial; como si se tratase de un resultado experimental, que al fin y al cabo, lo es.

Este método no lo recoge el Eurocódigo 3 directamente. La norma establece ese uso pero para el cálculo del momento de resistencia plástico experimental respecto a la rotación [1][5]. Pero se puede extrapolar a esta situación debido a la dificultad de elegir a simple vista una resistencia válida.

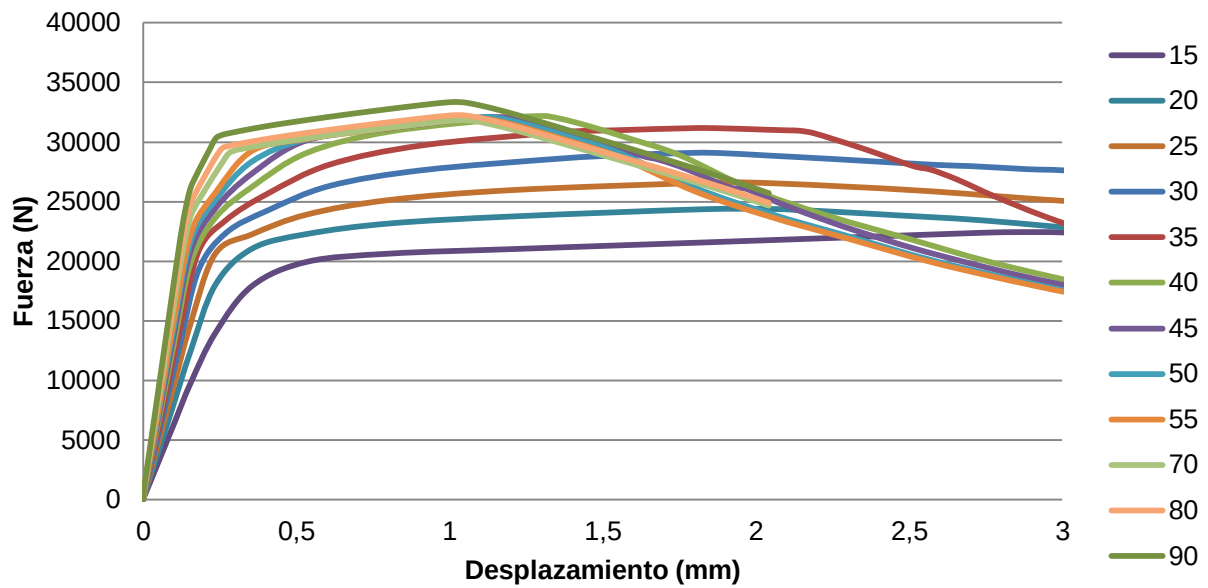


Figura 100: Curvas Fuerza-Desplazamiento para todas las curvas del Estudio 1.

6. Conclusiones y propuestas para estudios posteriores

Una vez terminado todos los estudios y programas, se pueden llegar a una serie de conclusiones.

Los objetivos propuestos para este trabajo no se han cumplido en su totalidad. El uso del DIC 3D iba a ser uno de los puntos importantes del trabajo. Además, la validación experimental no ha sido del todo satisfactoria con respecto a los valores de resistencia y rigidez obtenidos. No obstante, los mapas de desplazamiento y deformaciones obtenidos, así como los valores de desplazamiento, deformaciones y modos de fallo han sido satisfactorios. La caracterización del material se pudo completar y el estudio paramétrico se ha completado sin ningún problema. Por lo tanto, la mayor parte de los objetivos se han cumplido.

En cuanto a los resultados experimentales, los valores obtenidos son extraños en comparación con el Eurocódigo y los elementos finitos. Este problema se ha justificado por el desconocimiento de las propiedades mecánicas reales de los tornillos y de las tuercas utilizadas. Las galgas han servido de utilidad a pesar de que en todos los ensayos han llegado a fallar porque empezaban a desprenderse de la superficie pero solo se necesitaban los primeros datos correspondientes al régimen lineal.

Respecto al modelo numérico en elementos finitos cabe destacar el aprendizaje obtenido sobre esta técnica. Se han realizado más de cien simulaciones en Abaqus contando con simulaciones de prueba para obtener los resultados mas precisos o con simulaciones que se han ejecutado pero por errores no han llegado a completarse o no han sido válidos.

Los resultados obtenidos por elementos finitos han sido aceptables. Los mapas de tensión, desplazamiento y deformación de los modelos utilizados han sido buenos. Se hace necesario establecer un criterio de rotura o saber interpretar los datos obtenidos porque si no se impone ninguna condición, la simulación continúa incluso con el tornillo deformándose infinitamente. Aunque el modelo numérico no ha podido ser validado completamente por el programa experimental, se ha demostrado que los resultados obtenidos son válidos por ajustarse muy bien a la normativa vigente. Es necesario establecer un parámetro para poder determinar la resistencia de la T-stub para evitar interpretaciones subjetivas a la hora de analizar la curva Fuerza-Desplazamiento.

El estudio paramétrico ha servido para comprobar como el modelo numérico ofrece resultados lógicos y aceptables comparándolos con la normativa (Eurocódigo 3). Además, la ventaja que tiene el uso de simulaciones es poder ensayar modelos con valores extremos, sin embargo, se ha visto que unos parámetros muy altos o muy bajos pueden dar problemas a la hora de simular.

Se ha adquirido experiencia sobre este tipo de trabajos y todo lo realizado puede servir de ayuda para futuros trabajos. Visto el desarrollo de este trabajo se puede dar una serie de futuros trabajos.

- Complementar este mismo trabajo pero conociendo la curva característica de los tornillos y poder realizar simulaciones en función del tamaño y el material.
- Realizar simulaciones pero utilizando otro tipo de materiales caracterizados y complementándolo con ensayos experimentales.

7. Bibliografía

- [1] European Committee for Standardization (CEN), *EN 1993-1-8:2005 Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-8: Design of joints*, 2005.
- [2] Ministerio de Fomento, *Instrucción de Acero Estructural*, 2011
- [3] Daniel Carazo Álvarez, *Tesis doctoral: Estudio de uniones T-Stub en estructuras metálicas utilizando métodos ópticos para la medida de tensiones y deformaciones*, Universidad de Jaén, 2012.
- [4] O. S. Bursi & J. P. Jaspart, *Bench Benchmarks for Finite Element Modelling of Bolted Steel Connections*, "Journal Constructional Steel Research." Vol. 43, Nos. 1-3, pp. 17-42, 1997.
- [5] C. Faella, V. Piluso, G. Rizzano, *Structural Steel semirigid connections: Theory, design & software*. Florida, USA: CRC Publishers, 2000.
- [6] Juan José Jimenez de Cisneros Fonfria, *Tesis doctoral: Comportamiento de componentes T-equivalente asimétricas. Enfoque analítico, numérico y experimental*, Universidad de Jaén, 2016

- [7] Wikipedia, *Método de los elementos finitos*.
https://es.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9todo_de_los_elementos_finitos#cite_ref-1
- [8] Peters, W. H. and W. F. Rason. “*Digital imaging techniques in experimental stress analysis. Optical engineering*”, 1982.
- [9] Luciono R.O de Lima, José L. de F. Freire, Pedro C.G da S. Vellasco, Sebastião A.L de Andrale, José G.S da Silva, *Structural assessment of minor axis steel joints using photoelasticity and finite elements*, “Journal Constructional Steel Research.” Vol. 65, 2008.
- [10] The Specialty Steel Industry of North America (SSINA), *Stainless Steel Fasteners. Designer Handbook With Directory Of Fastener Manufacturers* , obtenido en <http://www.ssina.com/>
- [11] Simulia. *Abaqus 6.10 Analysis User's Manual. Volume V: Prescribed Conditions, Constrains & Interactions*.
- [12] Correlated Solutions, *Vic-2D Reference Manual*, 2009.
- [13] Correlated Solutions, *Vic-3D Reference Manual*, 2013.
- [14] Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), *UNE-EN ISO 6892-1 Materiales metálicos: Ensayo de tracción, Parte 1: Método de ensayo a temperatura ambiente*, 2017
- [15] Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), *UNE-EN ISO 377 Aceros y productos de acero: Localización y preparación de muestras y probetas para ensayos mecánicos*, 2017.
- [16] European Committee for Standardization (CEN), *EN-ISO 3506-1 Mechanical properties of corrosion resistant stainless steel fasteners, Part 1: Bolts, screws and studs*, 2009.
- [17] Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), *UNE-EN 1090-2:2011+A1:2011 Ejecución de estructuras de acero y aluminio. Parte 2: Requisitos técnicos para la ejecución de estructuras de acero.*, 2011.

8. Anexo A: Caracterización del material

8.1. Objetivo

Para el programa experimental y el modelo en elementos finitos se hace necesario conocer las propiedades del acero en el alma y en el ala del modelo T-stub. Aunque las normas recojan requerimientos mínimos para sus propiedades mecánicas [1] [2], en el proceso de fabricación existe varias variables que hacen variar el resultado final, como la materia prima, el proceso de fabricación y mecanizado seguidos,...

El objetivo de la caracterización es obtener una curva tensión-deformación y los valores representativos del acero mediante un programa experimental.

8.2. Normativas

Las normas a considerar para la caracterización del acero son la *UNE-EN ISO 6892-1 Materiales metálicos: Ensayo de tracción, Parte 1: Método de ensayo a temperatura ambiente* [14] y la *UNE-EN ISO 377 Aceros y productos de acero: Localización y preparación de muestras y probetas para ensayos mecánicos* [15]. Estas normas determinarán las dimensiones y extracciones de las probetas, su posterior ensayo y el tratamiento de los datos.

La norma ISO 377 indica la localización y preparación de las probetas provenientes de perfiles laminados de acero. El perfil utilizado para el programa experimental era una IPE 200 de acero S275. Como necesitamos ensayar las características del alma y el ala del perfil, la norma nos indica la localización de las probetas en el Anexo A: Localización de muestras y probetas.

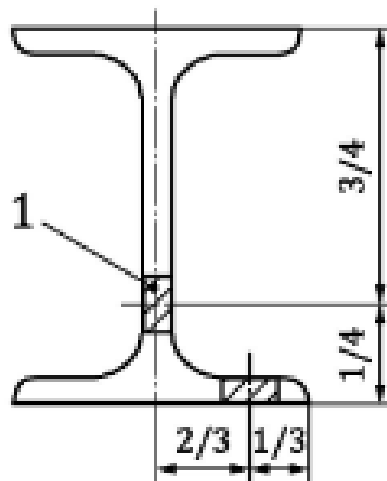


Figura 101: Localización de las probetas para los ensayos de tracción para perfiles [15].

A partir de estas localizaciones se obtienen 5 láminas de ancho entero del ala y otras 5 láminas de ala.

Estas laminas será mecanizadas según las dimensiones establecidas en la norma ISO 6892-1, concretamente en el anexo D. El espesor de las láminas se van a mantener, correspondientes al espesor del ala y del alma. Las láminas se mecanizaron con una máquina de corte con chorro de agua para conseguir unas probetas tipo hueso según las dimensiones recogidas en la siguiente Figura.

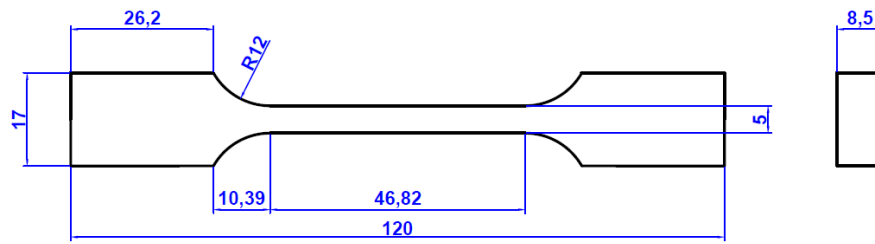


Figura 102: Dimensiones probeta tipo hueso del Ala

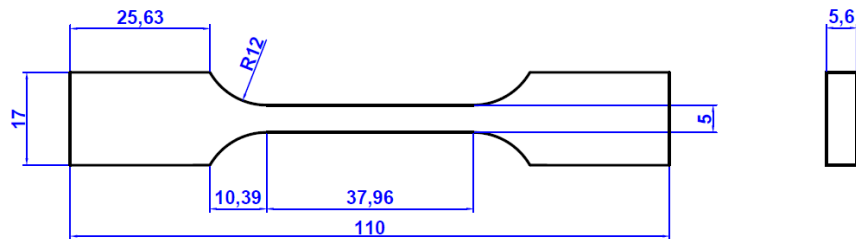


Figura 103: Dimensiones probeta tipo hueso del Alma



Figura 104: Probetas del ala mecanizadas



Figura 105: Probetas del alma mecanizadas.

Sin embargo, las dimensiones de las probetas una vez mecanizadas no siempre coinciden con los de los planos, así que se procedió a medir las probetas obteniendo las dimensiones finales que figuran en la siguiente tabla:

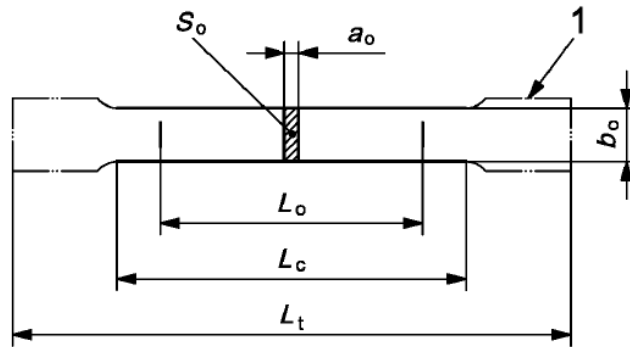


Figura 106: Geometría de las probetas [14].

Dónde:

- L_t es la longitud total de la probeta
- L_c es la longitud de la parte calibrada
- L_0 es la longitud inicial entre puntos
- a_0 es el espesor inicial
- b_0 es la anchura inicial de la parte calibrada
- S_0 es el área de la sección inicial de la parte calibrada
- 1 es una de las cabezas de amarre

Probetas	Ala (Flange)					Alma (Web)				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
a_0 (mm)	8,42	8,49	8,44	8,36	8,31	5,79	5,87	5,77	5,76	5,89
b_0 (mm)	5,03	5,03	4,99	4,97	4,97	4,98	4,99	4,78	4,91	4,96
S_0 (mm ²)	42,32	42,66	42,09	41,52	41,29	28,82	29,29	27,60	28,30	29,20
L_0 (mm)	37,00	37,00	37,00	37,00	37,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00
L_t (mm)	120	120	120	120	120	110	110	110	110	110

Tabla 21: Dimensiones finales de las probetas tipo hueso.

Los valores de espesor de la probeta y de anchura de la parte calibrada deben medirse, según la norma ISO 6892, tres veces en distintas partes de la zona

calibrada. El valor indicado en la tabla es la media de las tres mediciones. Con estos valores se calcula la sección en la parte calibrada.

Los valores teóricos que debe presentar el acero S275 son:

Propiedades Mecánicas		Valor teórico (mínimo)
Módulo de elasticidad (MPa)	E	210000
Módulo de Poisson	ν	0.3
Límite elástico (MPa)	f_y	275

Tabla 22: Valores teóricos (mínimos) del acero S275.

8.3. Desarrollo experimental

Las probetas se ensayarán utilizando una maquina de tracción para aplicar carga y un equipo fotográfico para medir las deformaciones usando DIC 2D. Este equipo consiste en una cámara en blanco y negro con un objetivo sobre un trípode. Esta cámara está conectada a un PC con un programa de captura de imágenes. Posteriormente estas imágenes serán procesadas en VIC-2D 6.



Figura 107: Equipo de ensayo.

Para el metodo DIC, es necesario pintar las probetas con un moteado blanco y negro, pintando primero un fondo blanco y despues un moteado negro.

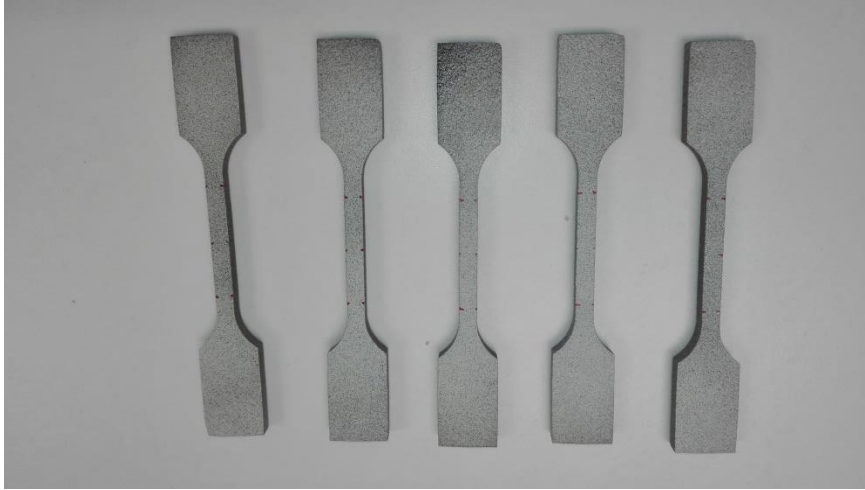


Figura 108: Probetas del alma pintadas.

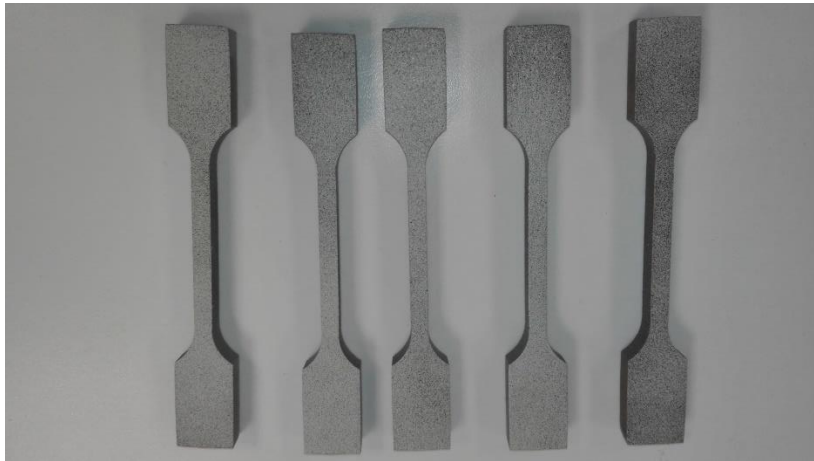


Figura 109: Probetas del ala pintadas.

De la maquina de traccion se obtendrán la carga, la extension de las mordazas y el instante de tiempo de la toma de datos. Los parametros de ensayo que se van a utilizar son: velocidad de ensayo 0.5 mm/min, precarga de 50N y toma de datos cada segundo. La captura de imágenes tambien será cada segundo.

Durante el ensayo de las probetas surgió un inconveniente, la pintura de las probetas se despegaba de la superficie antes de finalizar el enayo. Este asunto se desarrolla más adelante, sin embargo, como solución se probó a minimizar la cantidad de pintura eliminando la capa base y aplicando directamente un moteado

blanco sobre la oscura superficie original. Los resultados se valorarán posteriormente.

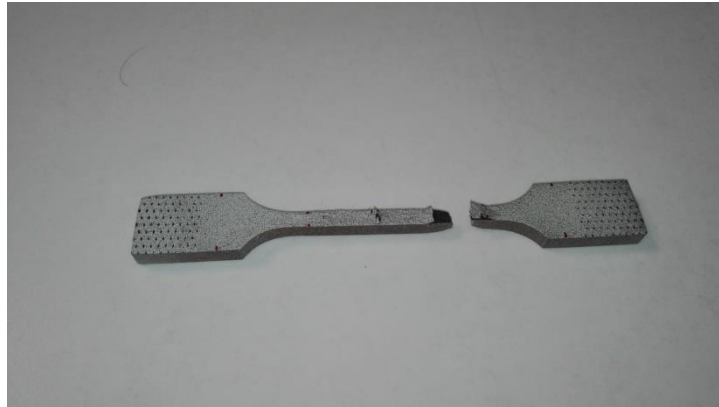


Figura 110: Probeta del alma después del ensayo.

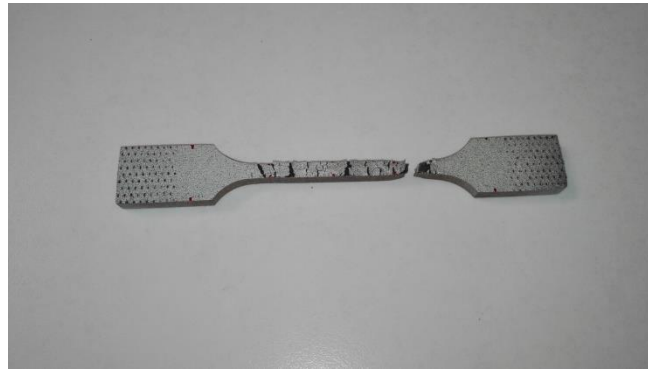


Figura 111: Probeta después del ensayo con pintura despegada.

8.4. Resultados

Con las imágenes obtenidas del ensayo se dispuso a calcular los desplazamientos de la probeta con DIC 2D.

Primero se introducen las imágenes al programa y se marca una imagen de referencia, que será la primera imagen del ensayo. Sobre esta imagen se dibuja una máscara, que delimita la zona de estudio.

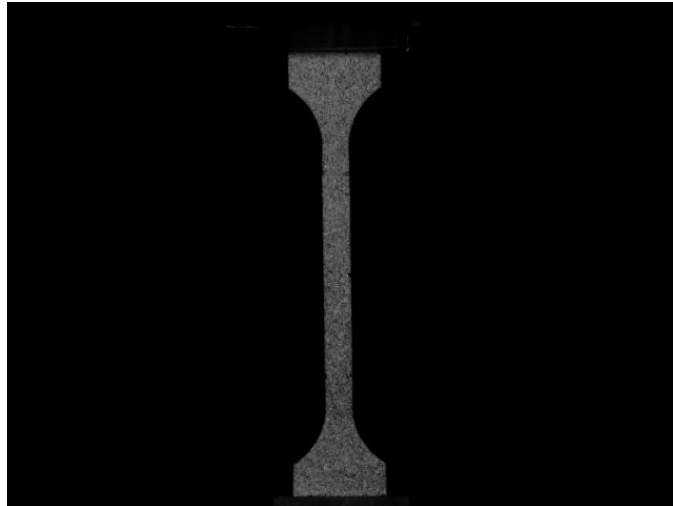


Figura 112: Imagen de referencia de la probeta Ala 1

Seguidamente, se realiza la calibración del DIC introduciendo una distancia conocida en la imagen de referencia, obteniendo una relación mm/píxel.

Antes de procesar las imágenes, hay que establecer la configuración de ensayo. El programa dispone de una gran cantidad de parámetros que pueden ser variados. Para este ensayo, los parámetros importantes en este caso son [12]:

- Subset: indica el tamaño del área de la imagen usada para el cálculo del desplazamiento entre imágenes.
- Steps: controla el espacio de los puntos que son analizados durante la correlación. A menor número, más puntos son analizados.
- Subset weights: esta opción controla la forma en que se ponderan los píxeles dentro del subset.
- Interpolation: en esta opción se elige el modo de interpolación.
- Criterion: se elige un criterio de correlación entre varias opciones.
- Low-pass filter images: una opción a elegir para reducir el ruido.

Los valores y los parámetros escogidos se representan en la siguiente imagen:

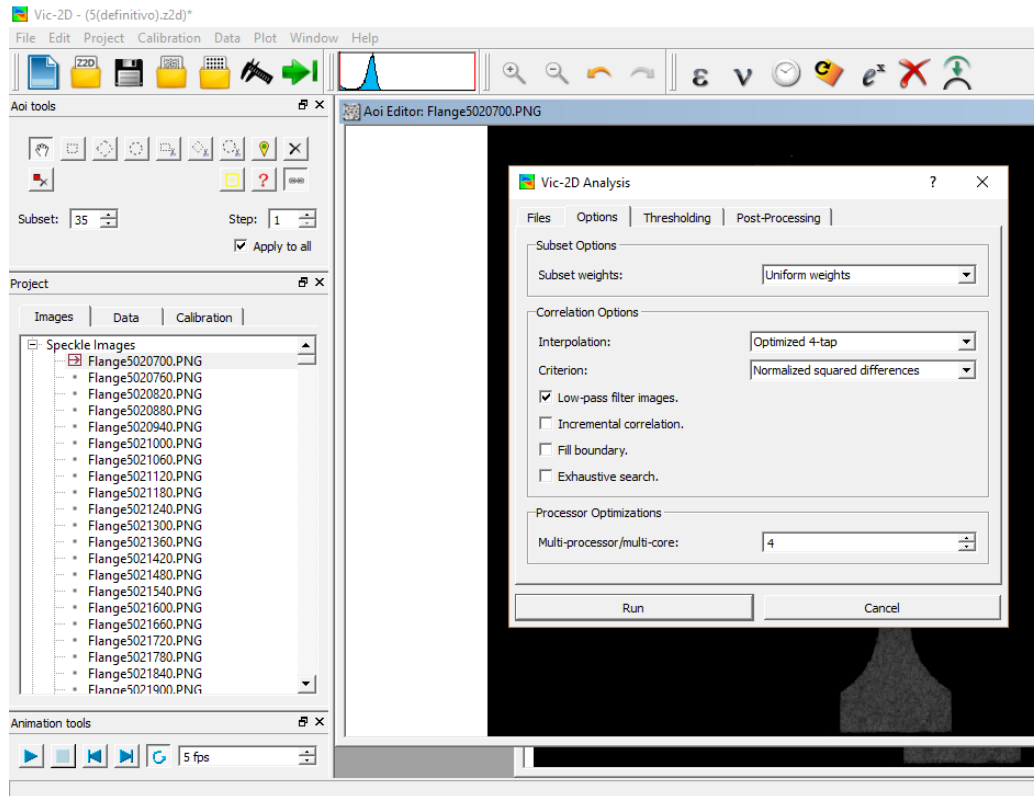


Figura 113: Parámetros del análisis en VIC-2D

Una vez procesadas las imágenes, se obtiene el mapa de deformaciones. Para obtener la deformación entre los puntos iniciales se usa la herramienta Extensómetro disponible en el programa para medir la deformación entre los puntos marcados. Después estos datos pueden ser exportados en formato .csv.

Sin embargo, el problema anteriormente comentado dificultó el procesamiento de las imágenes, perdiendo varios datos de imágenes durante el análisis, como puede verse en la siguiente Figura. Para obtener la deformación en el régimen plástico se utilizó las cabezas de amarre como referencia para el extensómetro. La deformación obtenida por esta se uniría a la de L_0 para obtener la curva completa.

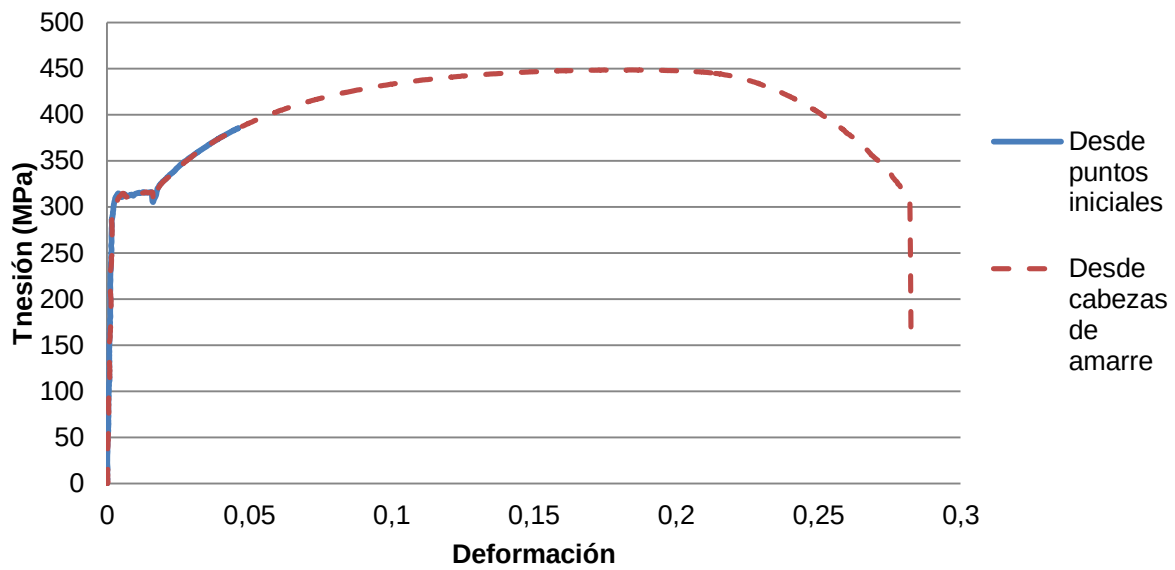


Figura 114: Curva Tensión-Deformación para distintas máscaras.

Resuelto el problema, se construyen la curva tensión-deformación para cada probeta.

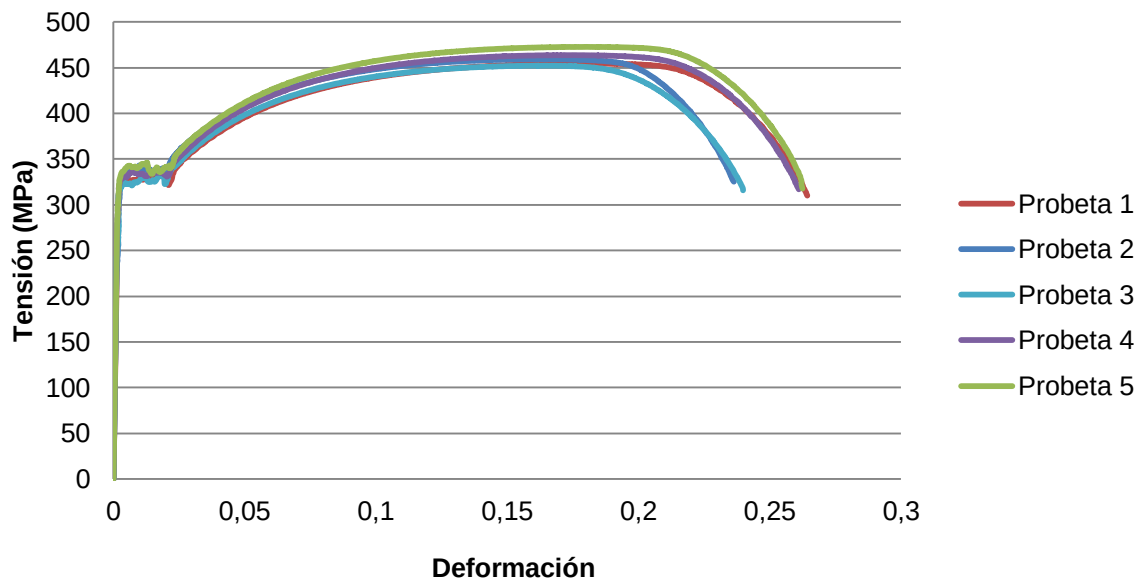


Figura 115: Curva Tensión-Deformación de las probetas del Ala

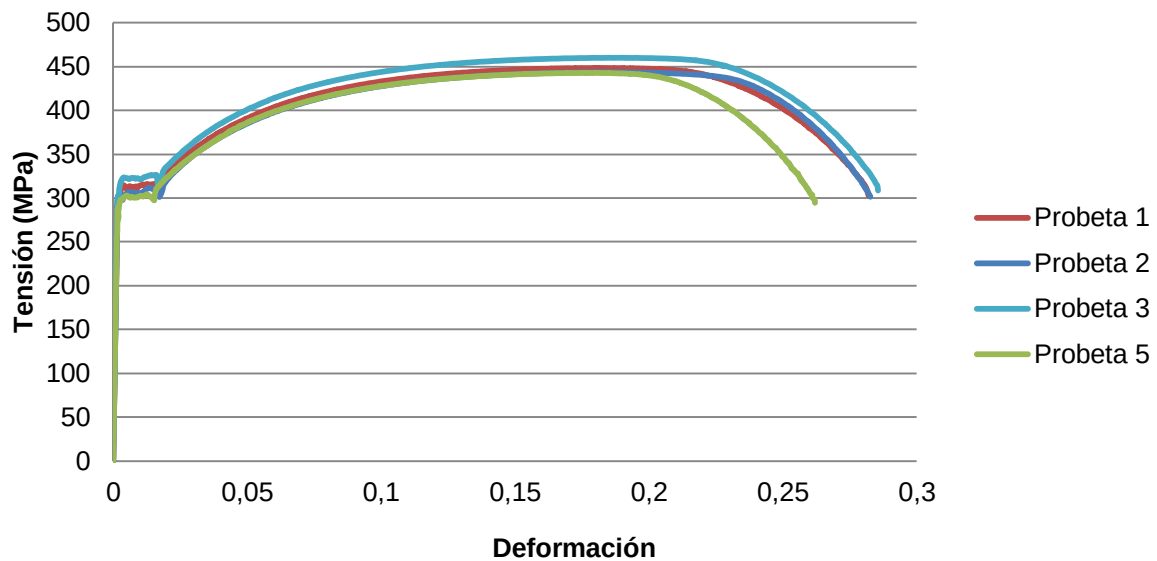


Figura 116: Curva Tensión-Deformación de las probetas del Alma

Los valores de coeficiente de Poisson no han podido obtenerse por la presencia de una gran cantidad de ruido en los datos. Además, la probeta que se pintó con moteado blanco (Alma 4) tuvo que ser descartada debido a que salían valores muy desviados.

Para confeccionar la curva media del Ala y del Alma, se dividió la curva tensión-deformación en tres partes en las que se aplicarían una línea de tendencia:

- Regimen elástico: En esta parte se aplica una regresión lineal a las curvas. La pendiente de la curva media se obtiene haciendo la media de todas ellas. Este valor es el módulo de elasticidad del acero.
- Fluencia: En esta parte se aplica una regresión de sexto orden. Los coeficientes de esa regresión son promediados para obtener los coeficientes de la curva media en esa parte
- Endurecimiento: Al igual que antes, se aplica una regresión de sexto orden y se obtienen los coeficientes promediados para formar la curva media.

Las curvas medias finales y sus propiedades son:

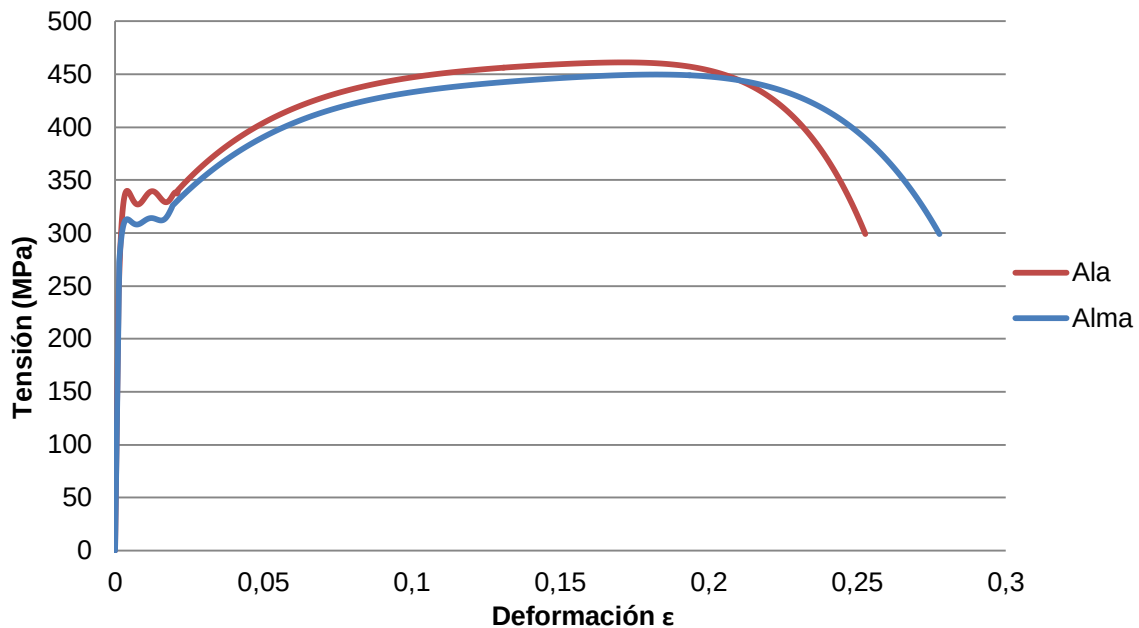


Figura 117: Curva Tensión-Deformación de los aceros del alma y el ala

	Ala	Alma	Valor medio	Valor mínimo	Diferencia (%)
$E \text{ (MPa)}$	201289	191557	196423	210000	-6,91
$f_y \text{ (MPa)}$	339,0	313,5	326,3	275	15,7
$f_m \text{ (MPa)}$	461,2	449,9	455,5	-	-
ϵ_u	0,253	0,278	0,265	0,15	43,5

Tabla 23: Propiedades mecánicas obtenidas.

8.5. Conclusiones

Como conclusión de este capítulo, se puede deducir que el método para el cálculo de las deformaciones en la probeta no era el adecuado. Como solución habría que encontrar una pintura que resista las deformaciones del acero o buscar otro método.

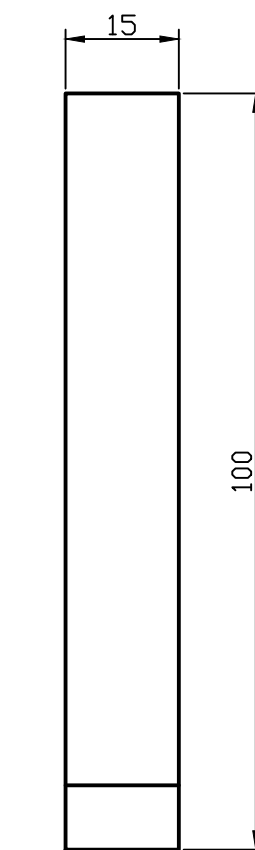
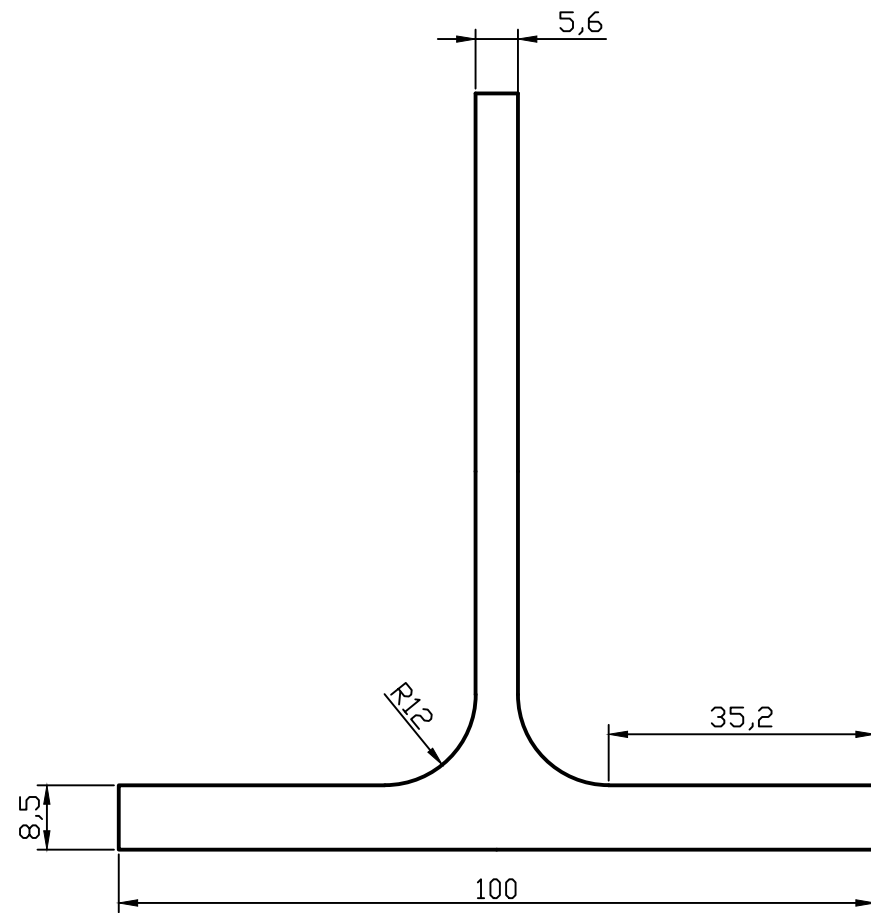
Respecto al DIC, indicar que ha sido necesario mucho tiempo para encontrar unos parámetros que den una curva con la menos cantidad de ruido posible y que es necesario profundizar en este tema para intentar reducir el ruido de las correlaciones (el módulo de Poisson no se pudo hallar debido a esto).

Respecto a la curva tensión-deformación, los valores de las propiedades mecánicas obtenidas han resultado ser mayores que los mínimos. Esto influye en las

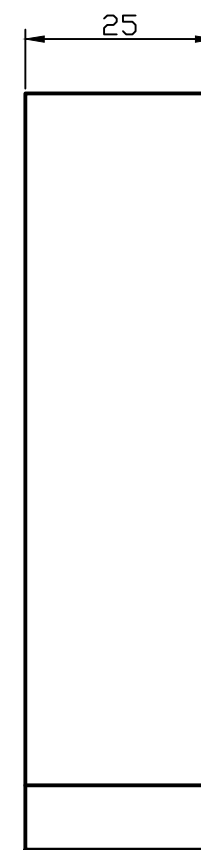
comparaciones teóricas-experimentales-elementos finitos de los datos que se obtienen en el programa experimental.

9. Anexo B: Planos

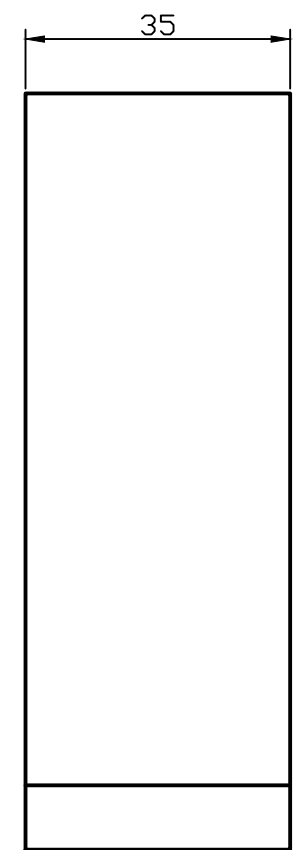
- Plano 1: Sección T con perfiles para piezas A, B y C
- Plano 2.1: Localización y Planos de Corte de las láminas
- Plano 2.2: Dimensiones de las láminas
- Plano 3: Dimensiones Probetas tipo Hueso



PERFIL A



PERFIL B

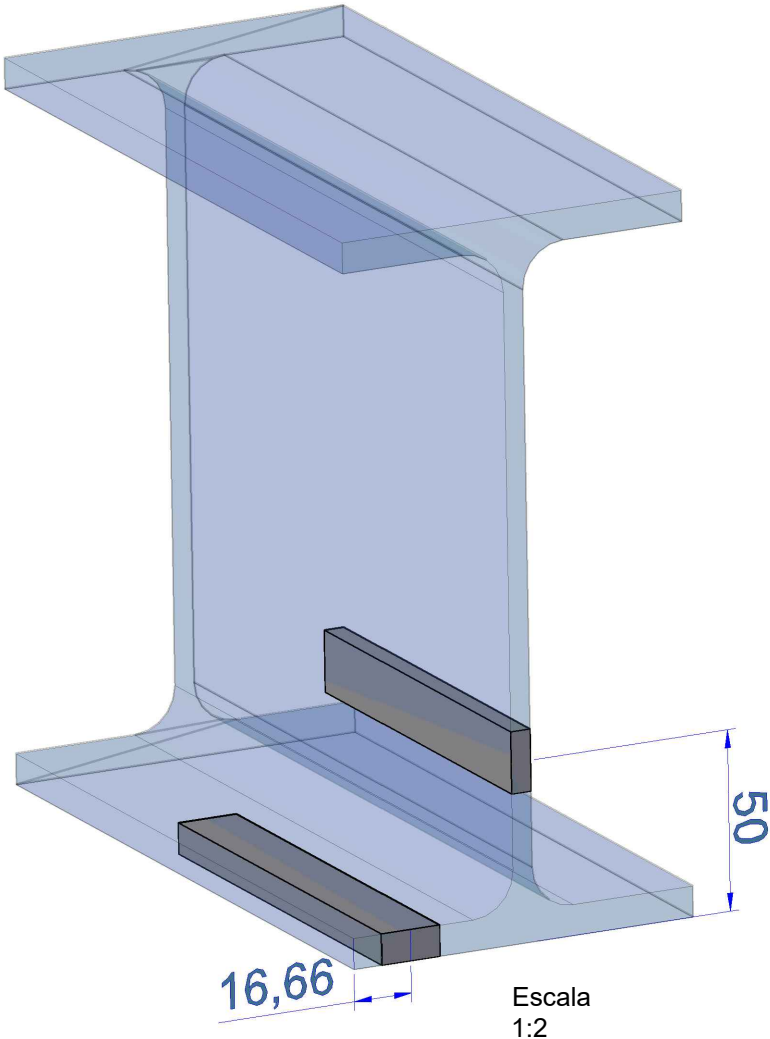


PERFIL C

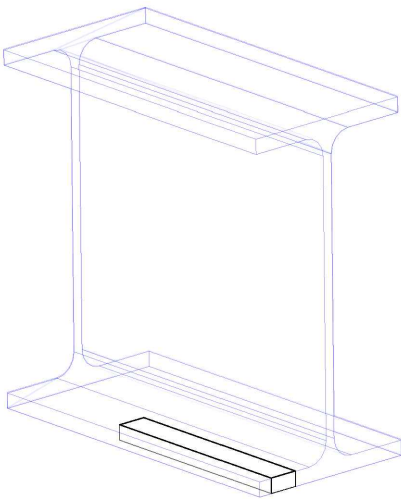
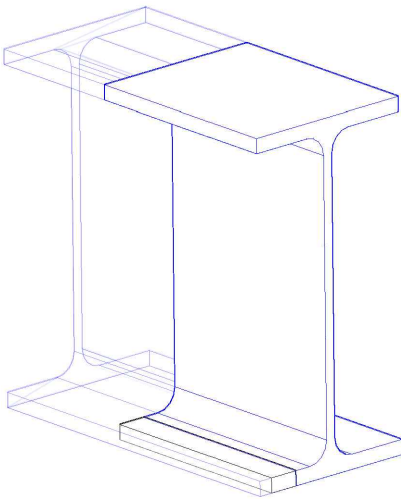
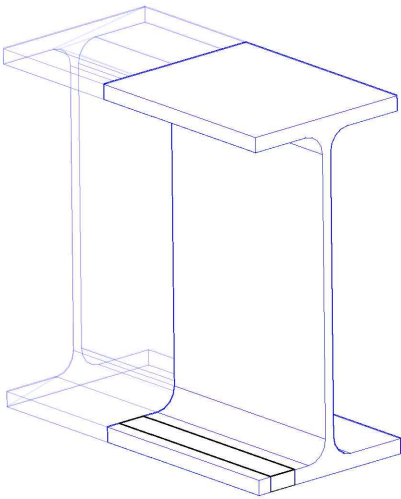
MEDIO PERFIL LAMINADO IPE 200 S275

Unidades en mm

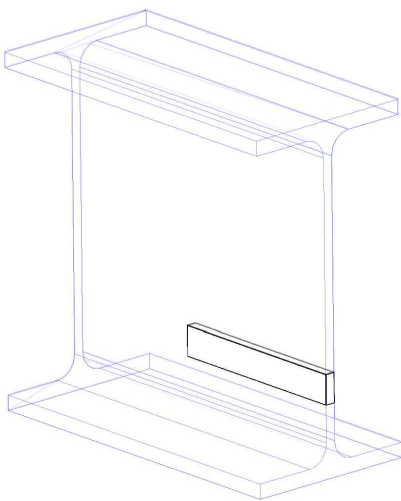
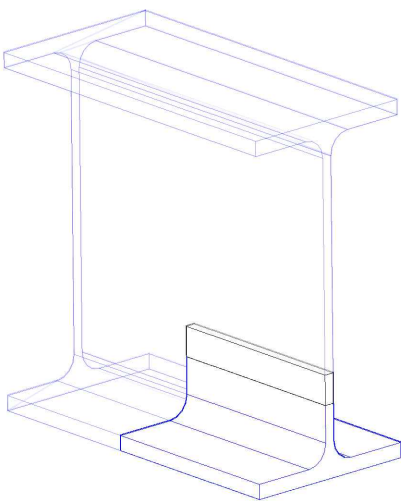
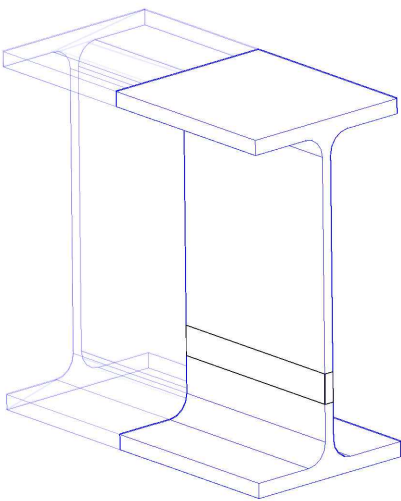
	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR JAÉN
DIBUJADO	07/02/18	David J. Ramírez		
COMPROBADO		Daniel Carazo		
ESCALA:	Análisis numérico del comportamiento tridimensional de componentes T-stub de uniones estructurales Sección T con perfiles para piezas A, B y C			Nº PLANO 1
1:1				SUSTITUYE A:
				SUSTITUIDO POR:



Perfil laminado IPE 200
Acero S275



Extracción de la lámina del ala
(Lámina A)



Extracción de la lamina del alma
(Lámina B)

	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR JAÉN
DIBUJADO	21/02/18	David J. Ramírez		
COMPROBADO		Daniel Carazo		
ESCALA: 1:4	Análisis numérico del comportamiento tridimensional de componentes T-stub de uniones estructurales Localización y Extracción de las Láminas			Nº PLANO 2.1
				SUSTITUYE A:
				SUSTITUIDO POR:

Unidades en mm

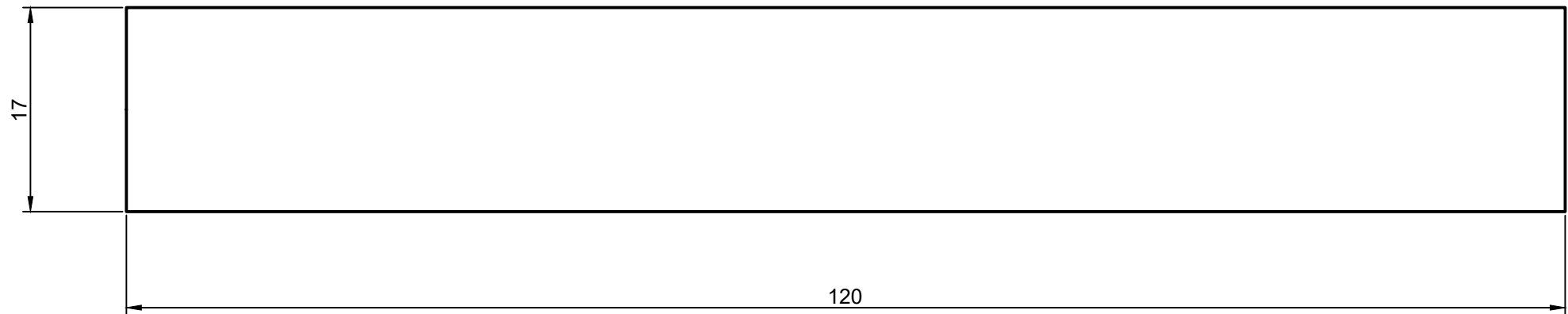


Lámina A

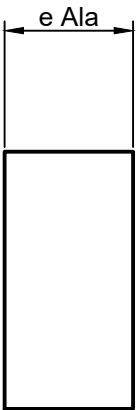
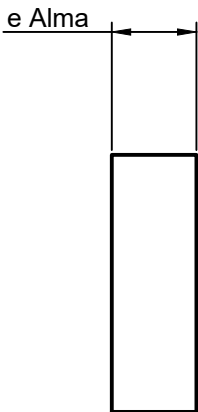
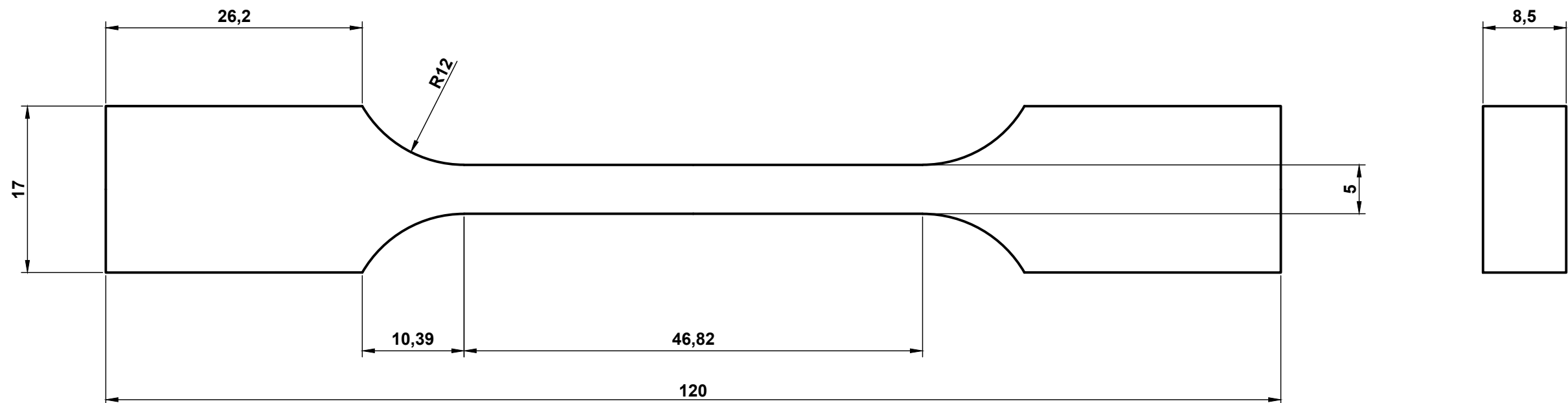


Lámina B

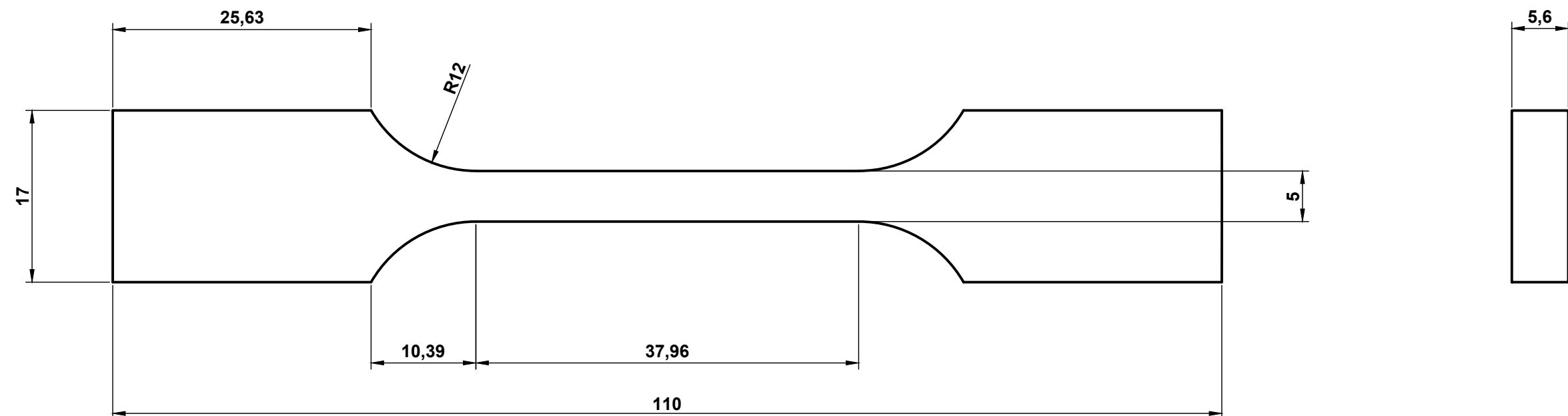


	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR JAÉN	
DIBUJADO	21/02/18	David J. Ramírez			
COMPROBADO		Daniel Carazo			
ESCALA:	Análisis numérico del comportamiento tridimensional de componentes T-stub de uniones estructurales				Nº PLANO
2:1					2.2
					SUSTITUYE A:
					SUSTITUIDO POR:

Unidades en mm



Probeta A obtenida de Lámina A (Ala)



Probeta B obtenida de Lámina B (Alma)

	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR JAÉN	
DIBUJADO	21/02/18	David J. Ramírez			
COMPROBADO		Daniel Carazo			
ESCALA:	Análisis numérico del comportamiento tridimensional de componentes T-stub de uniones estructurales				Nº PLANO
2:1					3
					SUSTITUYE A:
					SUSTITUIDO POR:

Unidades en mm