



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Las lagunillas

Trabajo Fin de Grado

ESTUDIO DE LA DEFORMACIÓN EN UNIONES ESTRUCTURALES DE ACERO INOXIDABLE MEDIANTE CORRELACIÓN DE IMÁGENES

Alumno: Luis Ángel Lozano Cano

Tutor: Prof. D. Daniel Carazo Álvarez
Dpto: Ingeniería Mecánica y Minera

Julio, 2019

Índice

0.	Abstract	8
0.	Resumen	9
1.	Introducción.....	10
2.	Revisión bibliográfica	11
2.1	Introducción a las uniones.....	11
2.1.1	Conceptos básicos de las uniones	12
2.1.2	Clasificación según resistencia de uniones	13
2.1.3	Clasificación según la rigidez de la unión	14
2.2	El modelo t-equivalente o <i>t-stub</i>	16
2.2.1	Definición del modelo	17
2.2.2	Modos de fallo del modelo <i>t-stub</i>	19
2.2.3	Influencia de las dimensiones del tornillo	23
2.2.4	Rigidez inicial del modelo <i>t-stub</i>	24
2.2.5	Modelo de Jaspart.....	26
2.3	Aceros inoxidables	27
2.3.1	Introducción a los aceros.....	27
2.3.2	Aceros inoxidables en la actualidad	27
2.3.3	Clasificación de aceros inoxidables.....	28
2.3.4	Comportamiento del acero inoxidable	30
2.3.5	Coste del acero inoxidable	31
2.4	Correlación Digital de Imágenes	32
2.4.1	Fundamentos teóricos	32
2.4.2	Equipo necesario.....	35
2.4.3	Preparación de probetas	36
2.4.4	Ensayo DIC	37
3.	Objetivos del trabajo fin de grado.....	39
3.1	Objetivos de investigación.....	39
3.2	Objetivos didácticos	39
4.	Programa experimental.....	40
4.1	Caracterización mecánica del acero AISI 304.....	40
4.1.1	Diseño de ensayo.....	40
4.1.2	Cumplimiento de normativa.....	40
4.1.3	Metodología experimental	42
4.1.4	Obtención de resultados.....	45
4.2	Comportamiento de la unión en modelo <i>T-stub</i>	48

4.2.1	Diseño de especímenes	48
4.2.2	Normativa	50
4.2.3	Metodología experimental	51
4.2.4	Obtención de resultados.....	53
4.2.4.1	Campo de desplazamientos y deformaciones.	54
4.2.4.2	Curva de comportamiento de <i>T-stub</i>	58
5.	Análisis de los resultados.....	60
5.1	Resultados de la caracterización.	60
5.1.1	Coeficiente de Poisson (ν)	62
5.1.2	Propiedades del acero del alma y el ala.....	63
5.2	Resultados de los modelos <i>T-stub</i>	63
5.2.1	Influencia del régimen del modelo en los desplazamientos verticales	63
5.2.2	Localización de rótulas plásticas	64
5.2.3	Curva Fuerza-Deformación	67
5.2.4	Influencia de λ	71
5.2.5	Influencia del ancho efectivo (<i>lef</i>).....	73
5.2.6	Resistencia, rigidez y capacidad de rotación.....	76
6.	Conclusiones y trabajos futuros	78
6.1	Conclusiones académicas.....	78
6.2	Conclusiones técnicas	78
6.3	Futuras trabajos y líneas de investigación.	79
7.	Bibliografía	80

<i>Ilustración 2.1.1. Esquema de una unión y conexión (1).</i>	11
<i>Ilustración 2.1.2. Tipos de uniones en las que puede aplicarse el modelo T-stub. (1)</i>	12
<i>Ilustración 2.1.1.1. Curva Momento-Rotación de una unión. (6).</i>	13
<i>Ilustración 2.1.2.1. Clasificación del tipo de unión según resistencia.</i>	14
<i>Ilustración 2.1.3.1. Tipos de uniones según su rigidez.</i>	15
<i>Ilustración 2.1.3.2. Curva momento-rotación para cada tipo de unión según su rigidez.</i>	15
<i>Ilustración 2.1.3.3. Clasificación de uniones según su rigidez en la curva momento-rotación.</i>	16
<i>Ilustración 2.2.1.1. Dimensiones características del modelo T-stub.</i>	17
<i>Ilustración 2.2.1.2. Modos de fallo según la zona de plastificación. (1)</i>	18
<i>Ilustración 2.2.1.3. Curva fuerza-desplazamiento de una unión real y la establecida por el EC3.</i>	19
<i>Ilustración 2.2.2.1. Modelo de colapso del T-Stub.</i>	20
<i>Ilustración 2.2.2.2. Modo de fallo 1 del modelo T-stub.</i>	20
<i>Ilustración 2.2.2.3. Modo de fallo 2 del modelo T-stub.</i>	21
<i>Ilustración 2.2.2.4. Modo de fallo 3 del modelo T-stub.</i>	22
<i>Ilustración 2.2.3.1. Influencia del tornillo en el cálculo de la resistencia en el modelo T-stub.</i>	23
<i>Ilustración 2.2.4.1. Simplificación del modelo T-stub en una barra simplemente apoyada en los extremos.</i>	24
<i>Ilustración 2.2.4.2. Longitud de elongación del tornillo.</i>	26
<i>Ilustración 2.2.5.1. Curva fuerza-desplazamiento según Jaspart.</i>	27
<i>Ilustración 2.3.2.1. Uso más común del acero inoxidable.</i>	28
<i>Ilustración 2.3.2.2. Tubos de acero inoxidable.</i>	28
<i>Ilustración 2.3.3.1. Perfiles "I" de acero inoxidable austenítico. Fuente: Montanstahl AG</i>	29
<i>Ilustración 2.3.4.1. Curva tensión-deformación para los tipos de acero inoxidable. (2)</i>	30
<i>Ilustración 2.3.4.2. Criterio del 0.2% para la determinación del límite elástico. (2)...</i>	31
<i>Ilustración 2.4.1.1. Esquema de funcionamiento de correlación de imágenes.</i>	33
<i>Ilustración 2.4.2.1. Equipo usado para usar la técnica DIC.</i>	35
<i>Ilustración 2.4.3.1. Superficie preparada para la aplicación de DIC.</i>	36
<i>Ilustración 2.4.3.2. Vista izquierda y derecha de las cámaras para DIC 3D.</i>	37
<i>Ilustración 2.4.3.3. Malla de puntos para el calibrado del DIC 3D.</i>	37
<i>Ilustración 2.4.4.1. Región de interés seleccionada para los modelos del ensayo. ...</i>	38
<i>Ilustración 4.1.2.1. Dimensiones características probeta tipo hueso. (11)</i>	41
<i>Ilustración 4.1.2.2. Dimensiones probetas tipo hueso del alma.</i>	42
<i>Ilustración 4.1.2.3. Dimensiones probetas tipo hueso del ala.</i>	42
<i>Ilustración 4.1.3.1. Galgas extensiométricas usadas en los ensayos.</i>	43
<i>Ilustración 4.1.3.2. Equipo de medición P3 Strain Indicator usado para las galgas.</i>	44
<i>Ilustración 4.1.3.3. Superficie probeta ϵ_f antes y después del ensayo.</i>	45
<i>Ilustración 4.1.4.1. Curvas tensión-deformación de las probetas del ala.</i>	46
<i>Ilustración 4.1.4.2. Curva tensión-deformación de las probetas del alma.</i>	46
<i>Ilustración 4.1.4.3. Valor del coeficiente de Poisson para las probetas de ala.</i>	47
<i>Ilustración 4.1.4.4. Probetas tipo hueso del alma (izq.) y ala (der.) después de los ensayos.</i>	48
<i>Ilustración 4.2.1.1. Ensamblaje del modelo T-stub.</i>	49

<i>Ilustración 4.2.1.2. Perfiles de los modelos T-stub de diferente ancho efectivo.</i>	<i>50</i>
<i>Ilustración 4.2.2.1. Espesor de garganta de una soldadura. (2)</i>	<i>50</i>
<i>Ilustración 4.2.3.1. Disposición de los equipos durante el ensayo.....</i>	<i>52</i>
<i>Ilustración 4.2.3.2. Cámaras usadas para la técnica DIC.....</i>	<i>53</i>
<i>Ilustración 4.2.3.3. Situación de galgas en los modelos T-Stub.</i>	<i>53</i>
<i>Ilustración 4.2.4.1.1. Mapa de desplazamiento horizontal obtenido con VIC-2D.....</i>	<i>55</i>
<i>Ilustración 4.2.4.1.2. Campo de deformaciones ϵ_{yy} con extensómetro en el alma..</i>	<i>56</i>
<i>Ilustración 4.2.4.1.3. Curva tensión-deformación del alma obtenida por DIC y galga para el modelo 15.1.....</i>	<i>56</i>
<i>Ilustración 4.2.4.1.4. Curva tensión-deformación del alma obtenida por DIC y galga para el modelo 25.2.....</i>	<i>57</i>
<i>Ilustración 4.2.4.1.5. Curva tensión-deformación del alma obtenida por DIC y galga para el modelo 35.2.....</i>	<i>57</i>
<i>Ilustración 4.2.4.1.6. Campo de deformación de Von-Mises del modelo 35.2.....</i>	<i>58</i>
<i>Ilustración 4.2.4.2.1. Curva fuerza-deformación experimental para los modelos T-stub.....</i>	<i>59</i>
<i>Ilustración 5.1.1. Curva tensión-deformación media del acero del ala y el alma.</i>	<i>61</i>
<i>Ilustración 5.1.1.1. Coeficiente de Poisson frente a la deformación principal.</i>	<i>62</i>
<i>Ilustración 5.1.1.2. Coeficiente de Poisson en régimen plástico.....</i>	<i>62</i>
<i>Ilustración 5.2.1.1. Línea de desplazamientos verticales para distintos estados de carga.</i>	<i>63</i>
<i>Ilustración 5.2.1.2. Situación de los estados de carga en la curva fuerza-desplazamiento del modelo 35.2.</i>	<i>64</i>
<i>Ilustración 5.2.2.1. Situación de las líneas a representar para el modelo 25.2.....</i>	<i>65</i>
<i>Ilustración 5.2.2.2. Líneas de deformación de Von-Mises para el modelo 15.2.....</i>	<i>65</i>
<i>Ilustración 5.2.2.3. Líneas de deformación de Von-Mises para el modelo 25.2.....</i>	<i>66</i>
<i>Ilustración 5.2.2.4. Líneas de deformación de Von-Mises para el modelo 35.2.....</i>	<i>66</i>
<i>Ilustración 5.2.3.1. Curva de comportamiento del modelo 15.1 frente al EC3 y Jaspart.....</i>	<i>67</i>
<i>Ilustración 5.2.3.2. Curva de comportamiento del modelo 15.2 frente al EC3 y Jaspart.....</i>	<i>68</i>
<i>Ilustración 5.2.3.3. Curva de comportamiento del modelo 15.3 frente al EC3 y Jaspart.....</i>	<i>68</i>
<i>Ilustración 5.2.3.4. Curva de comportamiento del modelo 25.1 frente al EC3 y Jaspart.....</i>	<i>69</i>
<i>Ilustración 5.2.3.5. Curva de comportamiento del modelo 25.2 frente al EC3 y Jaspart.....</i>	<i>69</i>
<i>Ilustración 5.2.3.6. Curva de comportamiento del modelo 25.3 frente al EC3 y Jaspart.....</i>	<i>70</i>
<i>Ilustración 5.2.3.7. Curva de comportamiento del modelo 35.1 frente al EC3 y Jaspart.....</i>	<i>70</i>
<i>Ilustración 5.2.3.8. Curva de comportamiento del modelo 35.2 frente al EC3 y Jaspart.....</i>	<i>71</i>
<i>Ilustración 5.2.4.1. Curvas de comportamiento de especímenes con $l_{ef} = 15 \text{ mm}$.</i>	<i>72</i>
<i>Ilustración 5.2.4.2. Curvas de comportamiento de especímenes con $l_{ef} = 25 \text{ mm}$.</i>	<i>72</i>
<i>Ilustración 5.2.4.3. Curvas de comportamiento de especímenes con $l_{ef} = 35 \text{ mm}$.</i>	<i>73</i>
<i>Ilustración 5.2.5.1. Curvas de comportamiento de especímenes con $\lambda \approx 1.04$.....</i>	<i>74</i>
<i>Ilustración 5.2.5.2. Curvas de comportamiento de especímenes con $\lambda \approx 1.12$.....</i>	<i>74</i>
<i>Ilustración 5.2.5.3. Curvas de comportamiento de especímenes con $\lambda \approx 1.25$.....</i>	<i>75</i>
<i>Ilustración 5.2.5.4. Tornillos de los especímenes después de los ensayos.....</i>	<i>75</i>

<i>Ilustración 5.2.5.5. Tornillo y tuerca del modelo 25.2 después del ensayo.....</i>	<i>76</i>
---	-----------

Tabla 2.2.1.1. Diámetro del taladro en función del diámetro del tornillo	19
Tabla 2.4.1.1. Criterios de correlación cruzada	34
Tabla 2.4.1.2. Criterios de correlación de suma de diferencias al cuadrado.	34
Tabla 4.1.3.1. Dimensiones de las probetas tipo hueso para el ala y el alma.	44
Tabla 4.1.4.1. Propiedades de las probetas del ala.....	46
Tabla 4.1.4.2. Propiedades de las probetas del alma.....	47
Tabla 4.2.1.1. Características tornillos de acero inoxidable austenítico A2-70.....	49
Tabla 4.2.2.1. Dimensiones de los especímenes a ensayar.	51
Tabla 4.2.4.1. Parametros usados para el post-procesado en el software.....	54
Tabla 5.1.1. Coeficiente del polinomio de 4º de la transición del ala.	60
Tabla 5.1.2. Coeficientes del polinomio de 6º grado del comportamiento plástico del ala.....	60
Tabla 5.1.3. Coeficientes del polinomio de 4º grado para la transición del alma.	61
Tabla 5.1.4. Coeficientes del polinomio de 6º para el comportamiento plástico del alma.....	61
Tabla 5.1.2.1. Propiedades características del acero AISI 304 experimentales.	63
Tabla 5.2.2.1. Situación de rótulas plásticas.	67
Tabla 5.2.6.1. Resistencias teóricas y experimentales de los modelos T-Stub.	76
Tabla 5.2.6.2. Rigidez teórica y experimental de los modelos T-stub.....	77
Tabla 5.2.6.3. Capacidad de rotación teórica y experimental de los modelos T-Stub.	77

0. Abstract

In the present work, the behavior of stainless steel structural joints is studied by means of optical deformation analysis methods. The joints are a fundamental part of the structure, although their calculation is complex due to the numerous factors that come into play: various elements of different materials, contact forces, screws ...

The norm that governs the calculation of unions is Eurocode 3 (1), which proposes the study of a union by a simplified method known as *T-stub* or T equivalent.

Stainless steel has a different behavior compared to conventional carbon steel, not just corrosion protection. The material that composes the models is austenitic stainless steel, AISI 304, one of the most used stainless steels in the construction industry due to its versatility (2). The experimental program includes the characterization of stainless steel.

The technique to carry out the study is the digital correlation of images, DIC, (Digital Image Correlation) (3). This is a complete field technique, non-intrusive, with which the behavior is analyzed from the displacement fields.

The results of the work show how the simplifications adopted in the norm represent faithfully the elastic behavior of the *T-stub*, while in the plastic regime the difference increases the greater the tensional state. You can also see the location of the plastic ball joints, from the fields of deformations, which confirm the simplification allowed in the standard.

Based on the results obtained, it is concluded that the use of optical methods allows a complete analysis of structural steel joints. As well as, the existence of elements not included in the standard that can significantly affect the behavior of the union.

0. Resumen

En el presente trabajo se estudia el comportamiento de uniones estructurales de acero inoxidable mediante métodos ópticos de análisis de deformaciones. Las uniones son una parte fundamental de la estructura, aunque su cálculo es complejo debido a los numerosos factores entran en juego: varios elementos de distintos materiales, fuerzas de contacto, tornillos...

La norma que rige el cálculo de uniones es el Eurocódigo 3 (1), donde se propone el estudio de una unión mediante un método simplificado conocido como *T-stub* o T equivalente.

El acero inoxidable tiene un comportamiento diferente comparado con el acero al carbono convencional, no solo la protección a la corrosión. El material que compone los modelos es acero inoxidable austenítico, AISI 304, uno de los aceros inoxidables más usados en la industria de la construcción por su versatilidad (2). El programa experimental incluye la caracterización del acero inoxidable.

La técnica para llevar a cabo el estudio es la correlación digital de imágenes, DIC, (*Digital Image Correlation*) (3). Esta es una técnica de campo completo, no intrusiva, con la cual se analiza el comportamiento a partir de los campos de desplazamientos.

Los resultados del trabajo muestran como las simplificaciones adoptadas en la norma representan fielmente el comportamiento elástico de la *T-stub*, mientras que en régimen plástico la diferencia va creciendo cuanto mayor es el estado tensional. También puede apreciarse la localización de las rótulas plásticas, a partir de los campos de deformaciones, que confirman la simplificación admitida en la norma.

En base a los resultados obtenidos, se concluye que el uso de métodos ópticos permite un análisis completo de uniones de acero estructural. Así como, la existencia de elementos no incluidos en la norma que pueden afectar de forma relevante al comportamiento de la unión.

1. Introducción

En la actualidad, el acero al carbono es uno de los materiales de construcción más usado en estructuras, ya que presenta unas propiedades y simplicidad estructural que lo hacen ser de las mejores opciones en la mayoría de los casos. Uno de los inconvenientes que presenta el acero es su debilidad ante la corrosión, por esta razón es interesante el uso de acero inoxidable en su lugar.

El ensamblaje de las estructuras de acero se realiza mediante uniones atornilladas, en su mayoría. Esto es debido a la facilidad de su ejecución y su desmontaje frente a las uniones soldadas. Es de vital importancia conocer el comportamiento de estas uniones dentro de cualquier estructura.

En este trabajo se estudiará el comportamiento de uniones de acero inoxidable como se rige en la norma europea: Eurocódigo 3-Diseño de estructuras metálicas. Parte 1-8: Diseño de uniones (1) y la adaptación española de misma: Instrucción de acero estructural 2011(EAE) (4).

En una estructura estándar, el comportamiento de la mayoría de las uniones se puede estudiar mediante el modelo de la T equivalente, más conocido como, “*T-stub*”. La técnica seleccionada para el estudio es la correlación digital de imágenes (DIC). El DIC es una técnica de campo completo no invasiva que permite la obtención de los campos de desplazamientos a partir de una captura de imágenes.

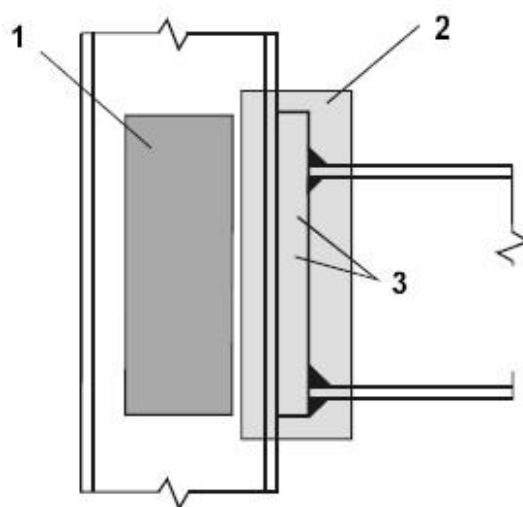
Existen estudios anteriores sobre la aplicación de la técnica DIC y el estudio de uniones de acero usando *T-stub* que sirven como base y referencia para el desarrollo de este trabajo. (3) (5) (6) (7) (8) (9)

2. Revisión bibliográfica

2.1 Introducción a las uniones

Según el Eurocódigo 3 (1), una unión es la zona donde dos o más elementos son interconectados. Con fines de diseño, una unión es el ensamblaje de los componentes básicos requeridos para que se transmitan fuerzas y momentos internos entre los elementos que la conforman.

Es un error común confundir el concepto de unión con el de conexión. Una conexión es el medio por el cual se obtiene una unión. Se puede apreciar la diferencia en la siguiente *Ilustración 2.1.1* donde el conjunto representa una unión.



1. Web panel in shear
2. Conexión
3. Elementos

Ilustración 2.1.1. Esquema de una unión y conexión (1).

En una estructura que esté formada por perfiles laminados, como pueden ser “I” o “H”, se presentan diferentes tipos de uniones en función de sus características y el tipo de elementos que se conectan.

1. Unión viga-columna de un solo lado de columna.
2. Unión viga-columna a dos caras con una columna.
3. Empalme de vigas.
4. Empalme de columnas.
5. Base de columnas.

Todas las uniones tienen en común que al menos un elemento de ellas puede abordarse mediante el modelo *T-stub* que se expondrá en la siguiente sección.

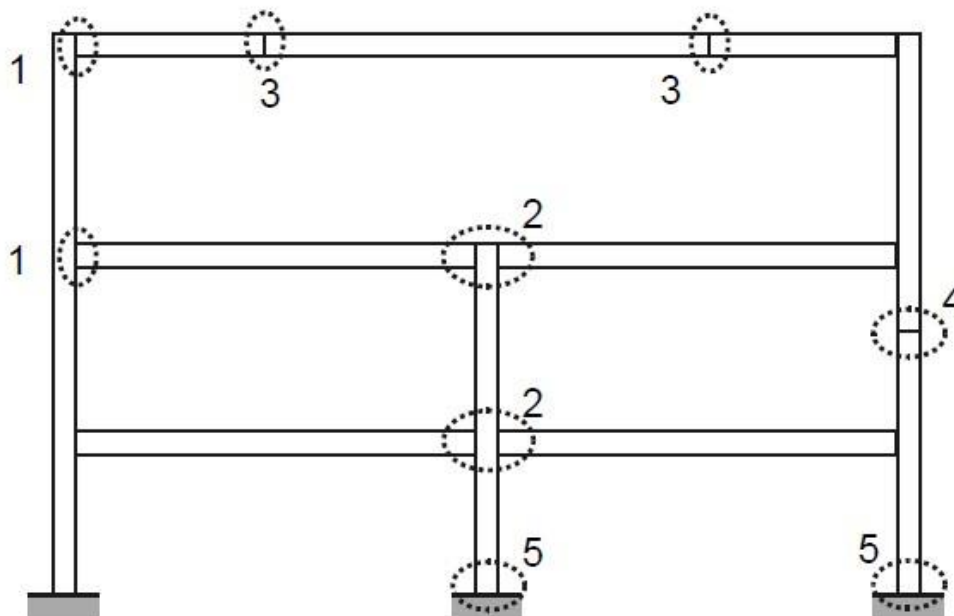


Ilustración 2.1.2. Tipos de uniones en las que puede aplicarse el modelo T-stub. (1)

2.1.1 Conceptos básicos de las uniones

El comportamiento de una unión viga-columna se representa mediante la curva momento-rotación que relaciona el momento aplicado en la columna por la flexión de la viga (M_j) con la rotación que se produce entre los elementos conectados (ϕ). *Figura 2.3.*

Para definir el comportamiento de una unión y mediante la ayuda de la curva momento-rotación usamos los siguientes conceptos:

- Momento resistente de cálculo. $M_{j,Rd}$ que se corresponde con el valor máximo que ha de soportar la unión.
- Capacidad rotacional de cálculo. ϕ_{cd} . Giro máximo de la unión.
- Rigidez rotacional. S_j
- Rigidez rotacional inicial. $S_{j,ini}$

Una vez conocemos estos conceptos básicos podemos clasificar las uniones según su resistencia o según su rigidez.

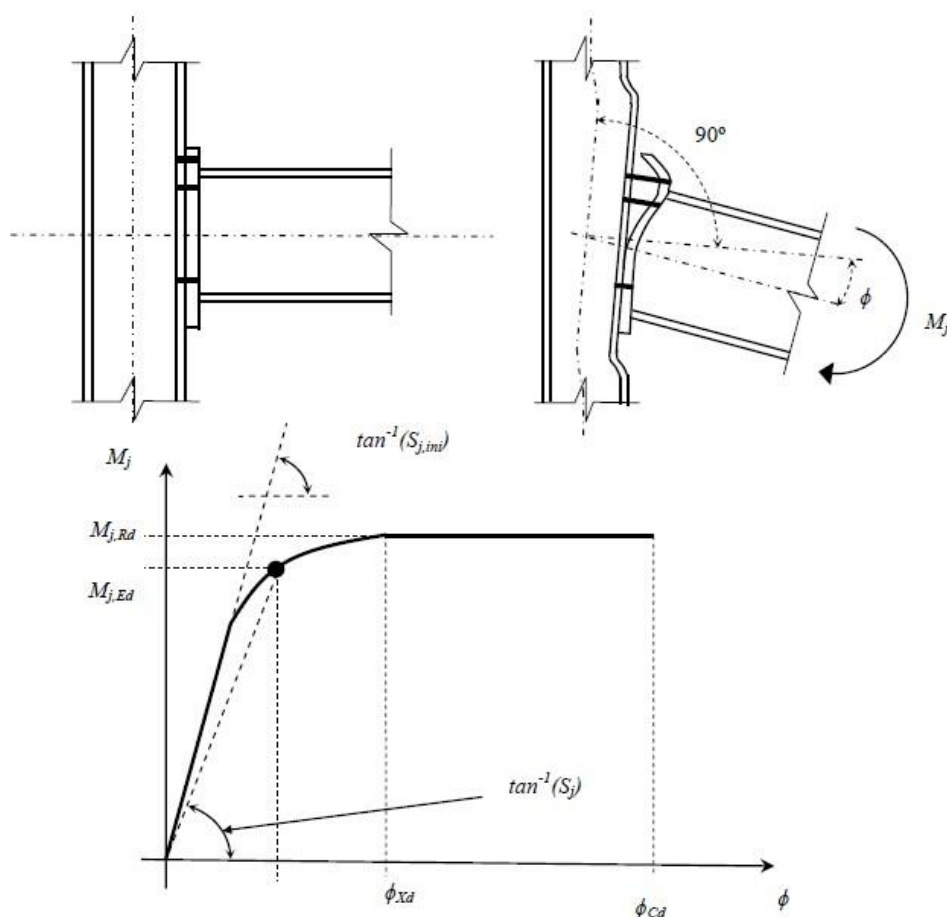


Ilustración 2.1.1.1. Curva Momento-Rotación de una unión. (6)

2.1.2 Clasificación según resistencia de uniones

La resistencia última de una unión es definida por las resistencias de los elementos que componen la componen. Con objeto de una mejor comprensión se ha añadido la *Ilustración 2.1.2.1*. Clasificación del tipo de unión según resistencia.

- **Nominalmente articuladas.**

Son aquellas capaces de transmitir los esfuerzos obtenidos en el análisis global de la estructura y su resistencia de cálculo a flexión no es mayor de la cuarta parte del momento resistente plástico de cálculo de la pieza de menor resistencia. (Zona 3)

$$0.25 \cdot M_{Rd} > M_{j,Rd} \quad [2.1.2.1]$$

- **Resistencia completa**

La resistencia de la unión es mayor o igual que la de los elementos que la componen. (Zona1)

$$M_{Rd} \leq M_{j,Rd} \quad [2.1.2.2]$$

- **Parcialmente resistente**

La resistencia de la unión es menor que la de los elementos que la componen. (Zona 2)

$$0.25 \cdot M_{Rd} < M_{j,Rd} \leq M_{Rd} \quad [2.1.2.3]$$

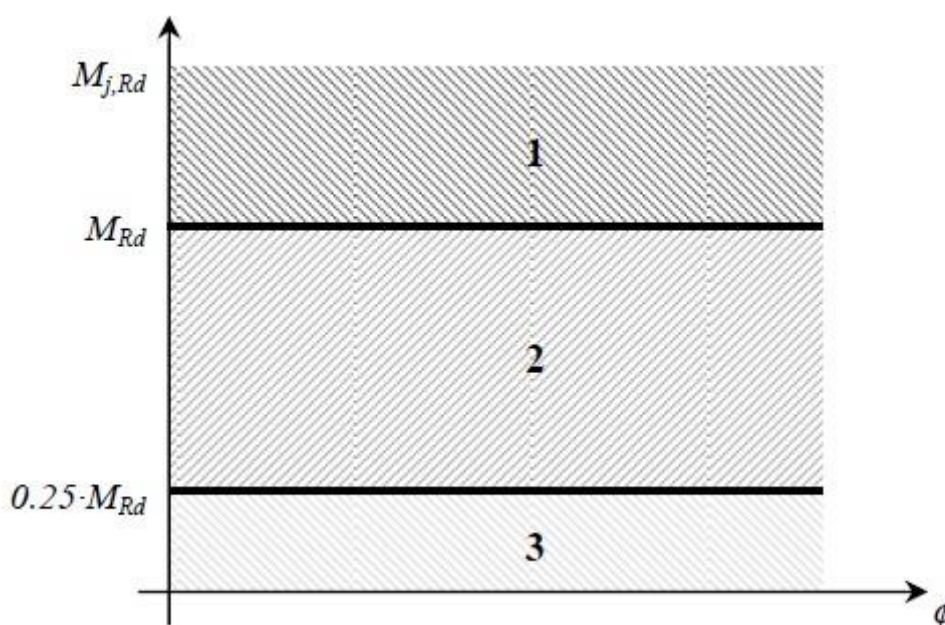


Ilustración 2.1.2.1. Clasificación del tipo de unión según resistencia.

2.1.3 Clasificación según la rigidez de la unión

La rigidez es la capacidad de resistencia de un cuerpo a doblarse o torcerse por la acción de fuerzas exteriores que actúan sobre su superficie. Según la rigidez nos encontramos tres tipos de uniones.

- a) Uniones rígidas
- b) Uniones articuladas
- c) Uniones semirrígidas

La diferencia entre los tipos de unión es la transmisión de momento de un elemento a otro. Las uniones rígidas transmiten el momento en su totalidad al contrario que las articuladas y en entre las dos está la semirrígida que transmite parte del momento que provoca una deformación angular a tener en cuenta.

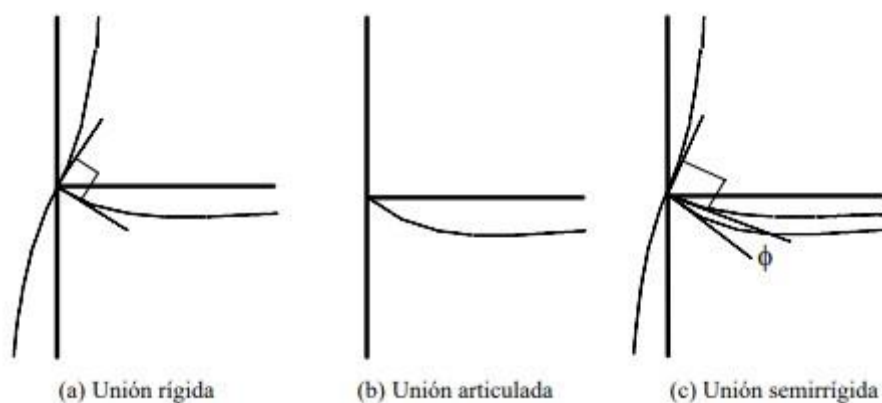


Ilustración 2.1.3.1. Tipos de uniones según su rigidez. (6)

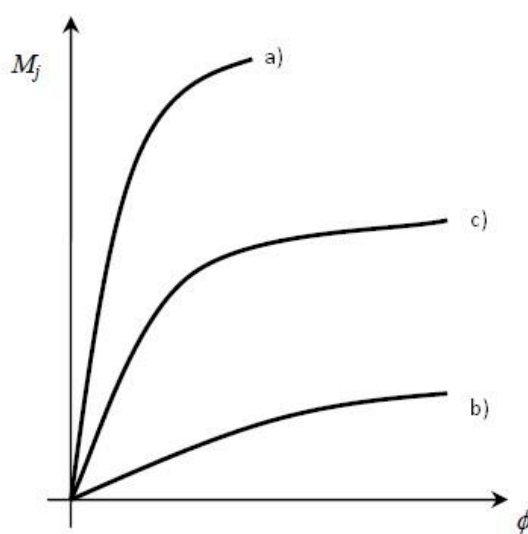


Ilustración 2.1.3.2. Curva momento-rotación para cada tipo de unión según su rigidez. (6)

Para clasificar una unión en función de rigidez se usa la rigidez rotacional inicial que se corresponde con $S_{j,ini}$, de forma que obtenemos tres regiones representadas en la Ilustración 2.1.3.2. Curva momento-rotación para cada tipo de unión según su rigidez.

- Zona 1: Unión rígida. Donde se cumple que $S_{j,ini} \geq \frac{k_b \cdot E \cdot I_b}{L_b}$
- Zona 2: Unión semi-rígida. La zona comprendida entre la unión rígida y la articulada.

- Zona 3: Unión articulada. Donde se cumple que $S_{j,ini} \leq \frac{0.5 \cdot E \cdot I_b}{L_b}$

Siendo:

- E el módulo de elasticidad del acero.
- I_b el momento de inercia de la viga.
- L_b la longitud del vano de la viga.
- k_b un coeficiente que depende del tipo de pórtico.

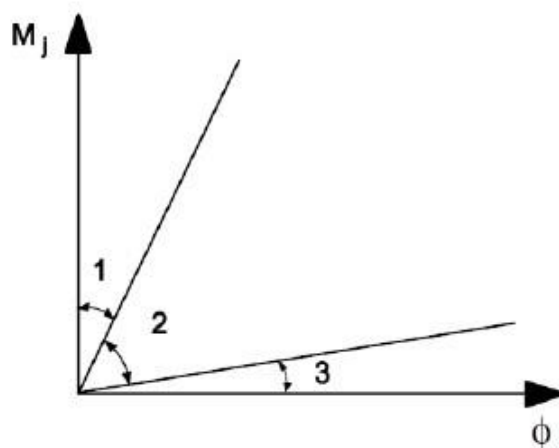


Ilustración 2.1.3.3. Clasificación de uniones según su rigidez en la curva momento-rotación.

Siendo:

- K_b el valor de la media del cociente $\frac{I_b}{L_b}$ de todas las vigas del forjado superior
- K_c el valor medio del cociente $\frac{I_c}{L_c}$ de todos los pilares del forjado.
- I_c el momento de inercia de la columna.
- L_c altura de piso de la columna

2.2 El modelo t-equivalente o t-stub

Como se introdujo anteriormente el modelo *t-stub* puede usarse para el estudio del comportamiento de un gran número de uniones que pueden darse en una estructura. Por tanto, es importante definir correctamente sus características y expresiones.

2.2.1 Definición del modelo

El modelo “*t-stub*” consiste en la unión simétrica tanto vertical como horizontal de dos elementos que pueden ser tanto perfiles laminados como chapas soldadas en forma de T y que su ensamblaje se lleva a cabo mediante una unión atornillada. Para el estudio, la “T” se somete a un esfuerzo en general de tracción, pero el esfuerzo puede ser de compresión cuando se estudian determinadas uniones. En la *Ilustración 2.2.1.1* se muestran las dimensiones que caracterizan este modelo.

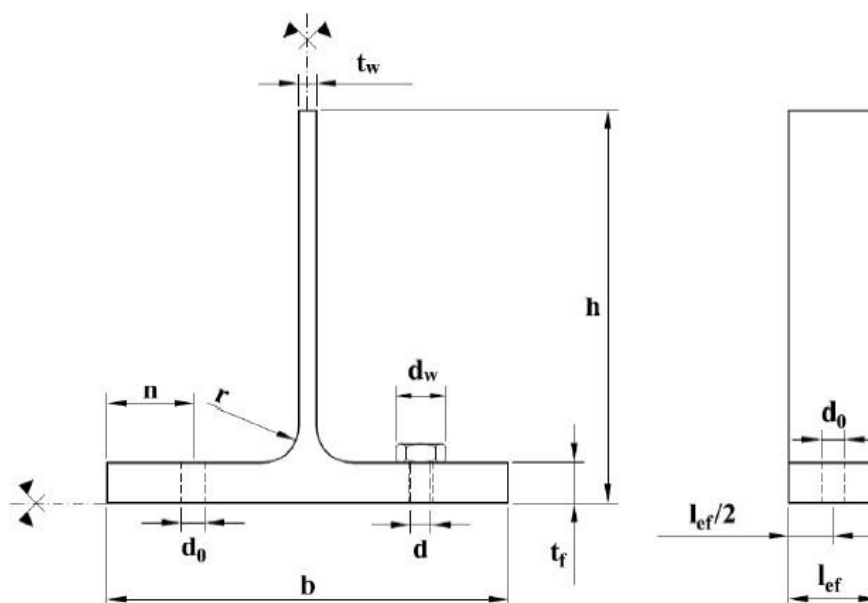


Ilustración 2.2.1.1. Dimensiones características del modelo T-stub

Según el Eurocódigo 3, existen diferentes modos de fallo atendiendo al criterio de plastificación de las diferentes zonas de la pieza como podemos apreciar en la *Ilustración 2.2.1.2*. Modos de fallo según la zona de plastificación.

La formación de las rótulas plásticas a determinaran el modo de fallo en el que nos encontremos, es decir, que afectaran directamente a la resistencia del modelo y a su cálculo. Un factor importante para la clasificación de la unión en función del modo de fallo serán las propiedades físicas de los materiales usados, tanto para la T como para los tornillos.

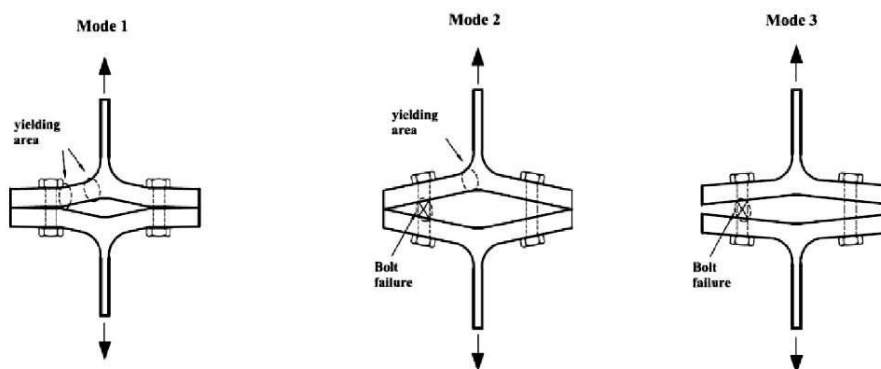


Ilustración 2.2.1.2. Modos de fallo según la zona de plastificación. (1)

Destacar además de las dimensiones geométricas básicas del modelo el parámetro n , que representa el lugar del tornillo a lo largo del ala definiéndose así m como:

$$m = \frac{b}{2} - \frac{t_w}{2} - n - 0.8 \cdot r \quad [2.2.1.1]$$

La relación entre las distancias n y m sería que según el Eurocódigo 3 se debe cumplir que:

$$\lambda = \frac{n}{m} \leq 1.25 \quad [2.2.1.2]$$

Otro parámetro importante es la longitud efectiva, l_{ef} , que representa el ancho de ala que contribuye a la transmisión de esfuerzos. 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)

El ancho del tornillo elegido para llevar a cabo el ensayo determinara las dimensiones del agujero pasante de las alas. Según el Eurocódigo se ha de cumplir que:

Diámetro del tornillo (d)	Diámetro del taladro (d_0)
$d \leq 14 \text{ mm}$	$d + 1 \text{ mm}$
$14 \text{ mm} \leq d \leq 27 \text{ mm}$	$d + 2 \text{ mm}$
$d \geq 27 \text{ mm}$	$d + 3 \text{ mm}$

Tabla 2.2.1.1. Diámetro del taladro en función del diámetro del tornillo

El comportamiento del modelo *t-stub* se define con la curva fuerza-deformación, que relaciona el desplazamiento del punto medio del ala con la fuerza axial aplicada en el alma del modelo. De por sí, es una curva con un comportamiento complejo y difícil de definir, por lo que el Eurocódigo 3 establece una simplificación de dicho comportamiento siempre desde el lado de la seguridad que consiste en un modelo bilineal elástico-plástico puro.

Esta simplificación consiste una curva formada por dos partes perfectamente definidas. Una primera parte, que será una línea recta en la que la pendiente será la rigidez inicial, k_0 , que se definirá más adelante, y una segunda parte donde la pendiente de la recta es nula, y su ordenada estará determinada por la fuerza resistente del modelo $F_{T,Rd}$ (que será definido en el siguiente apartado).

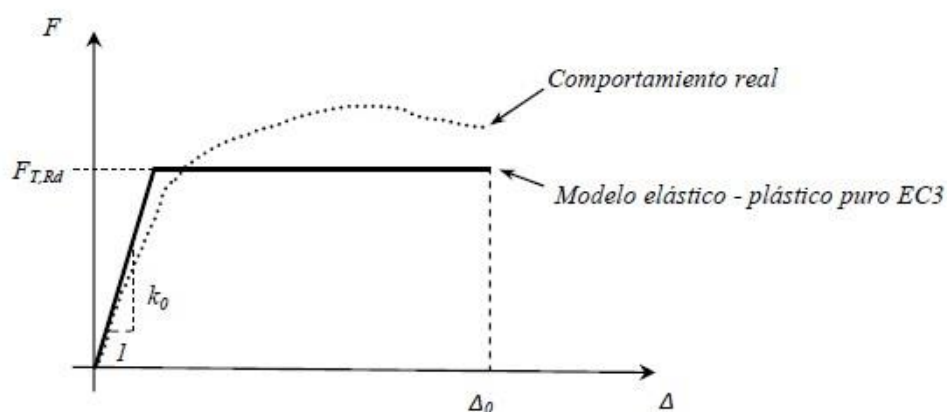


Ilustración 2.2.1.3. Curva fuerza-desplazamiento de una unión real y la establecida por el EC3. (6)

2.2.2 Modos de fallo del modelo *t-stub*

El modelo *t-stub* se basa en el principio de las líneas de plastificación donde la resistencia plástica debe basarse en los tornillos y las alas. Se asume que la plastificación es lo suficientemente grande como para considerar condiciones de equilibrio estático.

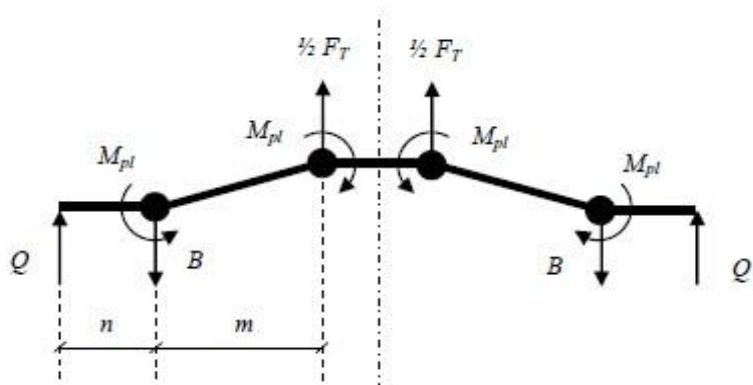


Ilustración 2.2.2.1. Modelo de colapso del T-Stub.

Se puede apreciar en el modelo la fuerza axial aplicada en alma, F_T , (en este caso de tracción), así como la reacción de los tornillos ante el esfuerzo, B y las fuerzas de palanca, Q , como consecuencia de la deformación del ala.

- **Modo 1. Rotura flexible**

Se forman dos rotulas plásticas en los ejes donde se encuentran los tornillos y otras dos en el encuentro del alma con las alas, es decir, que el fallo se producirá cuando el esfuerzo supere el momento plástico resistente de la sección en esos puntos.

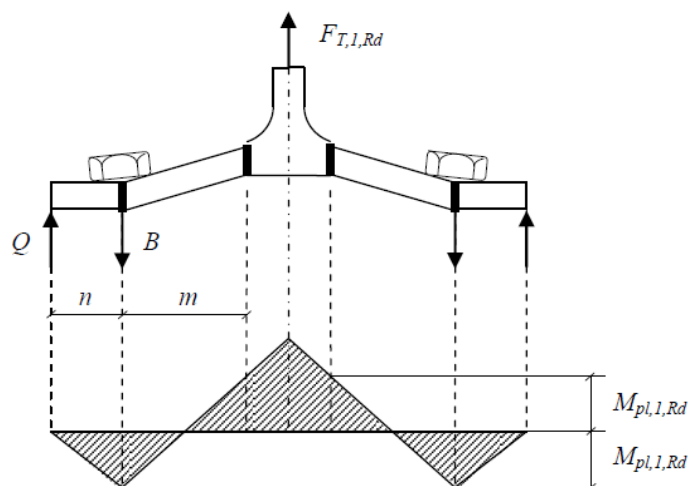


Ilustración 2.2.2.2. Modo de fallo 1 del modelo T-stub.

$$F_{T,1,Rd} = \frac{4 \cdot M_{pl,1,Rd}}{m} = \frac{f_y \cdot l_{ef,1} \cdot t_f^2}{m} \quad [2.2.2.1]$$

Siendo:

- f_y el modulo elastico del material.
- $l_{ef,1}$ el ancho efectivo
- t_f la longitud del ala

• **Modo 2. Rotura semirrígida**

La formación de rótulas plásticas solo se produce en el encuentro del alma con las alas. Este modo también implica un fallo del tornillo.

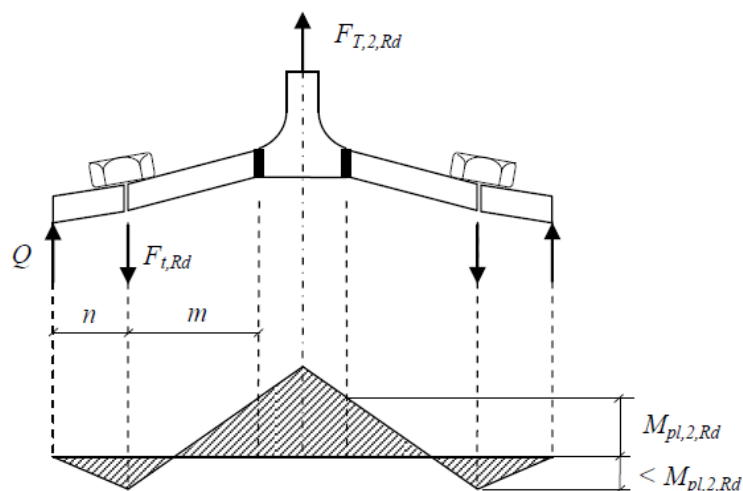


Ilustración 2.2.2.3. Modo de fallo 2 del modelo T-stub.

$$F_{T,2,Rd} = \frac{2 \cdot M_{pl,2,Rd} + 2 \cdot n \cdot F_{t,Rd}}{m + n} = \frac{\frac{1}{2} \cdot f_y \cdot l_{ef} \cdot t_f^2 + 2 \cdot n \cdot F_{t,Rd}}{m + n} \quad [2.2.2.2]$$

Siendo: $F_{t,Rd}$ la resistencia del tornillo

f_y el modulo elastico del material.

$l_{ef,1}$ el ancho efectivo

t_f la longitud del ala

Modo 3. Rotura rígida

El fallo se produce exclusivamente por parte de los tornillos por lo que la resistencia será la suma de las resistencias de los tornillos (en este caso dos):

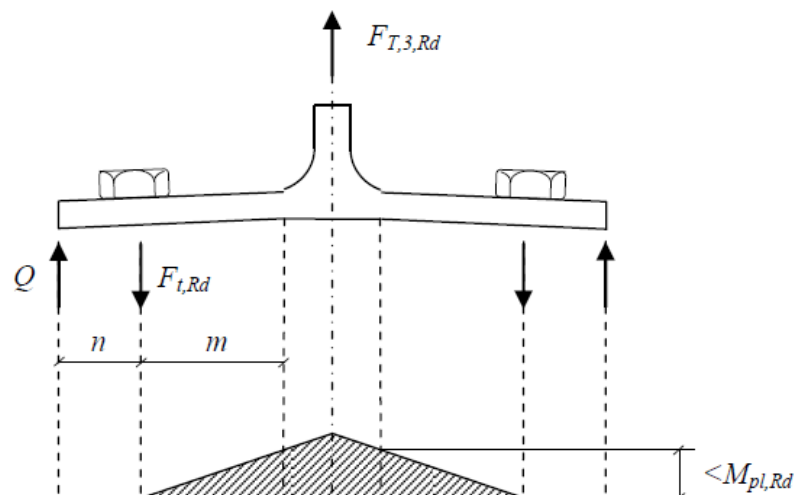


Ilustración 2.2.2.4. Modo de fallo 3 del modelo T-stub.

$$F_{T,3,Rd} = \sum F_{t,Rd} \quad [2.2.2.3]$$

Según el Eurocódigo:

Las uniones soldadas deberán verificar los requisitos de ejecución, montaje y control establecidos en la correspondiente norma que se esté aplicando (EA-95, CTE-SE-A, EC-3 Parte 1-8, Instrucción EAE).

2.2.3 Influencia de las dimensiones del tornillo

En los modos de fallo expuestos anteriormente en ninguna ecuación se tiene el efecto que puede llegar a tener la cabeza del tornillo (dependiendo de sus dimensiones) en contacto con las alas del modelo. Según Jaspart, este hecho lleva consigo un aumento significativo de la resistencia del modelo, en concreto el modelo de rotura 1, evitando que se retarde la formación de las rotulas plásticas.

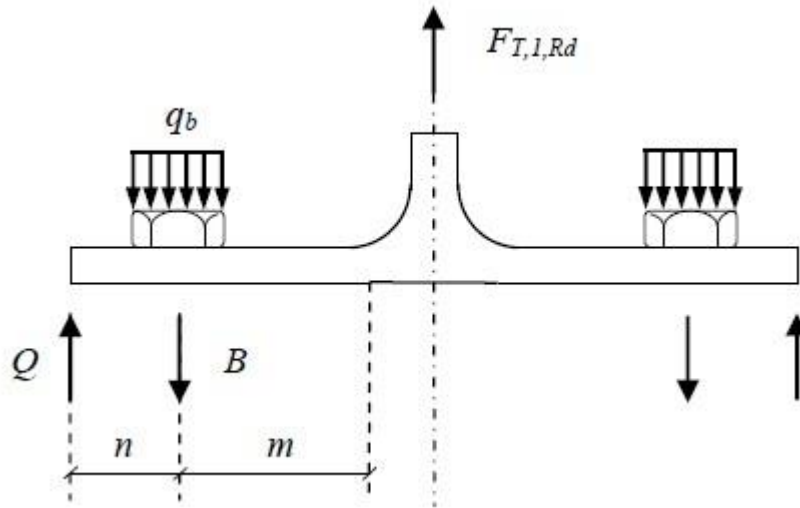


Ilustración 2.2.3.1. Influencia del tornillo en el cálculo de la resistencia en el modelo T-stub.

Considerando que la carga que soporta el tornillo, q_b , está uniformemente distribuida a lo largo de la cabeza del mismo con una dimensión d_w que equivale al diámetro de la cabeza del tornillo o tuerca y la representamos en el modelo como B.

Después de aplicar equilibrio y resolviendo el sistema de ecuaciones, se obtiene finalmente la resistencia del modelo:

$$F_{T,1,Rd} = \frac{(32 \cdot n - 2 \cdot d_w) \cdot M_{pl,1,Rd}}{8 \cdot m \cdot n - (m + n) \cdot d_w} \quad [2.2.3.1]$$

Aunque esta influencia no se encuentra recogida en el Eurocódigo (1) y como está aceptada por él, en este trabajo se usará con el objetivo de comparar y obtener unos valores que se acerquen más al comportamiento del modelo T-stub.

2.2.4 Rigidez inicial del modelo *t-stub*

Para la evaluación de la rigidez inicial es necesario conocer el comportamiento elástico del modelo *t-stub*. Por ello, se analiza media *t-stub* como una barra simplemente apoyada frente a una fuerza de tracción aplicada en el centro, F , que se corresponde con la aplicada al alma del modelo. Esta provoca una reacción en los ejes de los tornillos, B , además de un desplazamiento vertical positivo.

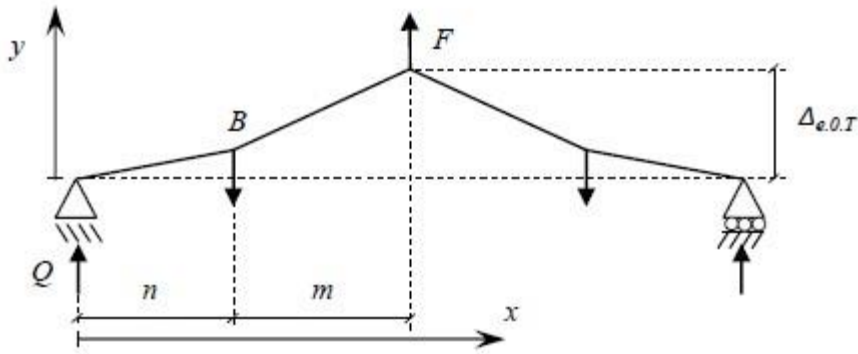


Ilustración 2.2.4.1. Simplificación del modelo T-stub en una barra simplemente apoyada en los extremos.

La rigidez inicial vendrá determinada por el comportamiento tanto de la “T” como el de los tornillos. Una vez aplicada la teoría general de la flexión y teniendo en cuenta la compatibilidad de deformaciones se puede calcular el desplazamiento del punto medio, $(\Delta_{e.0.T})$ con el que a su vez permite el cálculo de la rigidez. (La rigidez es el cociente entre la fuerza aplicada y el desplazamiento).

$$k_0 = \frac{1}{\frac{1}{k_{0,T}} + \frac{1}{k_{b,0}}} \quad [2.2.4.1]$$

Donde:

- $k_{T,0}$ es la rigidez inicial correspondiente a la “T”.
- $k_{b,0}$ es la rigidez inicial correspondiente a los tornillos.

Para la rigidez inicial del tornillo según el Eurocódigo 3, se acepta la simplificación de Jaspart:

$$k_{b,0} \approx 1.6 \cdot \frac{E \cdot A_s}{L_b} \quad [2.2.4.2]$$

Siendo:

- E , el módulo de elasticidad del tornillo.
- A_s , el área efectiva del tornillo

- L_b , la longitud de elongación del tornillo.

Para la rigidez inicial de la T:

$$k_{0,T} = \frac{E}{Z_f \cdot \left[\frac{1}{2} - q \cdot \left(\frac{3}{2} \cdot \alpha_f - 2 \cdot \alpha_f^3 \right) \right]} \quad [2.2.4.3]$$

Donde:

$$Z_f = \frac{[2 \cdot (m + n)]^3}{l'_{ef} \cdot t_f^3} \quad \alpha_f = \frac{n}{2 \cdot (m + n)} \quad [2.2.4.4]$$

Siendo:

- E el módulo de elasticidad del acero usado en el modelo.
- l'_{ef} la longitud efectiva para el modelo ($l'_{ef} = 0.93 \cdot l_{ef}$)
- t_f , el espesor del ala
- n, m , dimensiones características del modelo

La longitud de elongación del tornillo que aparece en las ecuaciones del Eurocódigo (L_b), viene determinada según el modelo de Agerskov (1976) que establece lo siguiente:

La longitud de elongación del tornillo será la suma de los espesores de las alas, de las arandelas y la mitad de la cabeza del tornillo y la tuerca.

$$L_b = t_{f1} + t_{f2} + t_{wsh} + \frac{t_h}{2} + \frac{t_n}{2} \quad [2.2.4.5]$$

Siendo:

- t_{f1} , el espesor de la T superior.
- t_{f2} , el espesor de la T inferior.
- t_{wsh} , el espesor total de las arandelas.
- t_h , el espesor de la cabeza del tornillo.
- t_n , el espesor de la tuerca.

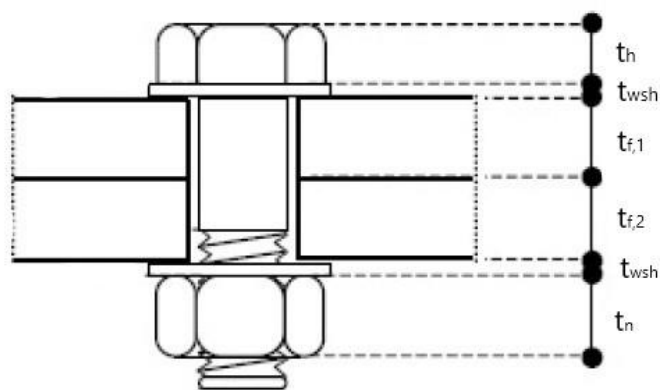


Ilustración 2.2.4.2. Longitud de elongación del tornillo.

2.2.5 Modelo de Jaspart

El modelo de Jaspart (10) propone una curva fuerza-deformación bilineal con un comportamiento similar al establecido en el Eurocódigo 3. La primera recta es la misma, con la rigidez inicial (k_0) como pendiente que tiene como límite la resistencia de cálculo ($F_{T,Rd}$). La segunda recta, en lugar de ser plana tiene en cuenta el endurecimiento por deformación que se produce en la región plástica. Esto tiene como resultado una recta con la rigidez plástica ($k_{pl,0}$) como pendiente que termina con la resistencia última de cálculo ($F_{T,u}$).

$$k_{pl,0} = k_0 \cdot \frac{E_h}{E} \quad [2.2.5.1]$$

Siendo E_h el módulo de endurecimiento por deformación

La resistencia última de cálculo ($F_{T,u}$) se calcula con las mismas ecuaciones del eurocódigo que se usan calcular la resistencia de cálculo ($F_{T,Rd}$), pero usando la tensión última (f_u) en lugar del límite elástico (f_y).

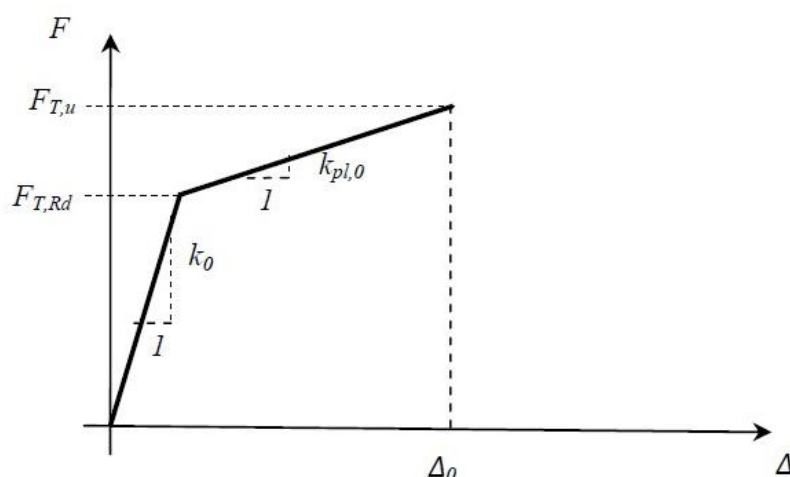


Ilustración 2.2.5.1. Curva fuerza-desplazamiento según Jaspart.

2.3 Aceros inoxidables

2.3.1 Introducción a los aceros

El acero es una aleación de hierro y carbono con una composición de carbono inferior al 2%. A esta aleación se le puede adicionar otros materiales para dar diferentes propiedades en función de las necesidades actuales. Estos son los llamados aceros aleados.

El mayor atractivo de los aceros son sus propiedades: gran tenacidad, dureza y resistencia mecánica, que son superiores en comparación con el resto de materiales de construcción.

Uno de los mayores inconvenientes de los aceros es su poca resistencia a la corrosión. Existe la posibilidad de adicionar a la aleación una pequeña cantidad de cromo para hacer que el acero se haga prácticamente inmune a los efectos de la corrosión. Esta propiedad hace a estos aceros diferentes del resto de aleaciones.

2.3.2 Aceros inoxidables en la actualidad

Hoy en día el acero inoxidable es muy versátil en cuanto a su uso. Aunque destaque por su resistencia a la corrosión, tiene otras características como pueden ser buenas propiedades mecánicas (ductilidad, elasticidad, dureza...) o su buena resistencia a temperaturas extremas, que hacen de este acero una opción a tener en cuenta a la hora de elegir un buen material. Destacar también que tiene un gran acabado estético.



Ilustración 2.3.2.1. Uso más común del acero inoxidable.

Entre todos los usos que se le pueden dar a un metal de estas características destacan entre otros: electrodomésticos, automoción, joyería, material quirúrgico y construcción. En este trabajo se abordará el uso del acero inoxidable como material de construcción.



Ilustración 2.3.2.2. Tubos de acero inoxidable.

2.3.3 Clasificación de aceros inoxidables

Se considera que un acero es inoxidable cuando contiene un mínimo de un 10.5% de cromo. Dependiendo del contenido de elementos de aleación el acero puede tener diferente resistencia a la corrosión y afecta a las propiedades mecánicas. Es importante seleccionar el acero que necesitamos para el uso seleccionado, ya que cuanto más aleado más sube el precio del acero.

Existen 5 grupos básicos de aceros inoxidables dentro de los cuales tendremos diferentes resistencias.

- Acero inoxidable austenítico

Este tipo de acero contiene entre un 17-18% de cromo y entre un 8-11% de níquel. Destacan por su elevada ductilidad y soldabilidad. Tienen una mejor tenacidad

en comparación con un acero al carbono. Son los más usados dentro de la industria de la edificación y construcción.

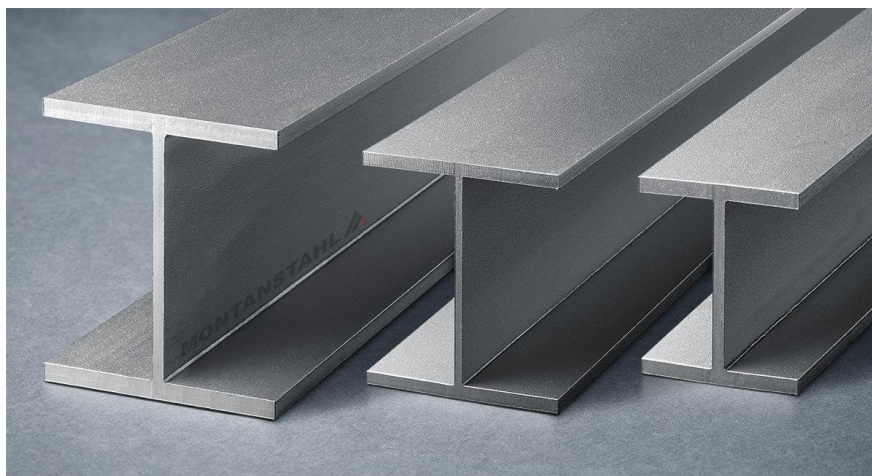


Ilustración 2.3.3.1. Perfiles "I" de acero inoxidable austenítico. Fuente: Montanstahl AG

- Acero inoxidable ferrítico

Este acero suele tener entre un 10.5% y 18% de cromo sin prácticamente nada de níquel. Su precio es menor que el austenítico debido a que no contiene níquel. Esto conlleva unas pérdidas en sus propiedades con respecto a los austeníticos.

- Acero inoxidable Duplex

Los aceros dúplex (austeníticos-ferríticos) tienen una microestructura mixta de los dos anteriores. Los porcentajes de aleados se encuentran entre 20-26% de cromo, 1-8% de níquel, 0.05-5% de molibdeno y 0.05-3% de nitrógeno. Con un tratamiento de recocido tienen valores de resistencia el doble que los austeníticos. Esto hace que su principal uso sea en estructuras donde el peso sea un factor importante, en un puente, por ejemplo.

- Acero inoxidable martensítico

Son similares a los aceros ferríticos con la particularidad de que al tener mayor contenido en carbono pueden tratarse mediante tratamientos térmicos. Su dificultad para la soldadura limita mucho su uso dentro de la construcción. Sus principales usos son en herramientas que necesiten resistencia al desgaste y la abrasión.

- Acero inoxidable endurecido por precipitación

Las propiedades de estos aceros pueden potenciarse mucho mediante tratamientos térmicos, manteniendo una resistencia a la corrosión similar a los aceros austeníticos. Destacar que pueden tener tres tipos de microestructura. Su uso principal es la industria aeroespacial.

2.3.4 Comportamiento del acero inoxidable

El acero inoxidable no se comporta como el acero normal al carbono. La diferencia más importante entre ambos está en la curva tensión-deformación. Mientras que el acero al carbono presenta un comportamiento lineal (elasticidad) hasta su límite elástico bien definido, el acero inoxidable presenta una forma más redondeada sin un límite elástico claro.

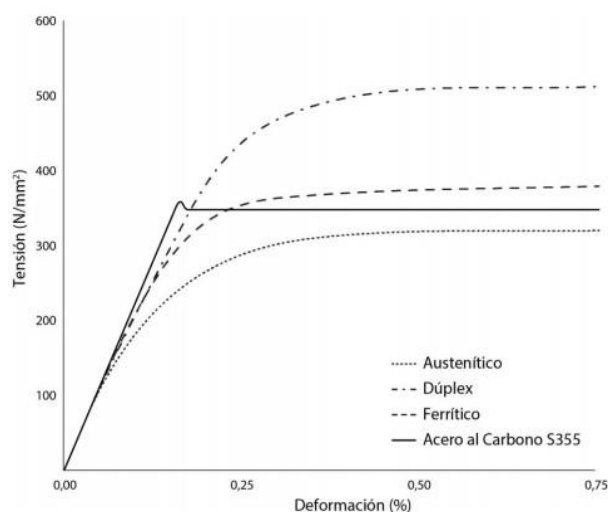


Ilustración 2.3.4.1. Curva tensión-deformación para los tipos de acero inoxidable. (2)

Por tanto el límite elástico se definirá como el valor de la tensión para la deformación remanente ($\epsilon = 0.2\%$), como se muestra en la *Ilustración 2.3.4.2*. En cuanto al límite elástico, el Eurocódigo establece que un acero inoxidable austenítico y dúplex de aplicaciones estructurales estándar debe de alcanzar un valor mínimo de 200 GPa .

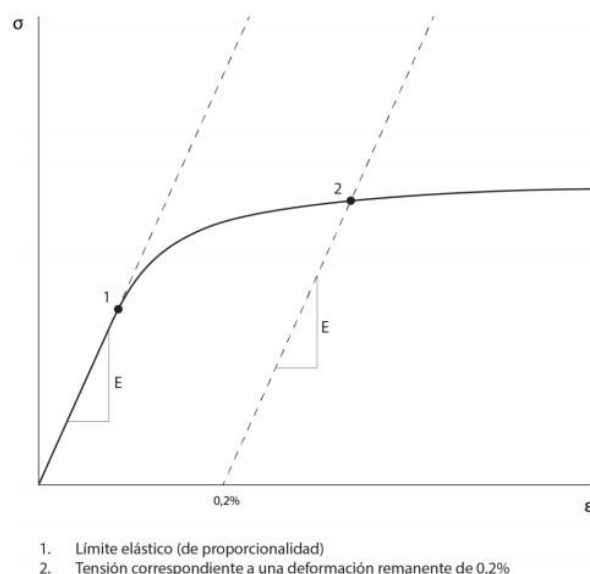


Ilustración 2.3.4.2. Criterio del 0.2% para la determinación del límite elástico. (2)

La característica más notable del acero inoxidable en construcción es la capacidad para absorber impactos considerables sin fracturarse. Esto debido a la gran ductilidad que poseen (especialmente los aceros austeníticos) y a sus características de endurecimiento por deformación.

2.3.5 Coste del acero inoxidable

En la cualquier construcción, el precio es un factor a tener en cuenta en la selección de los materiales. Cuando se habla del precio se hace referencia al coste total del ciclo de vida del material.

En el caso del acero inoxidable el coste inicial es mayor que un acero estándar al carbono, aunque el inoxidable sale más rentable si tenemos en cuenta el coste total. La excelente resistencia de este acero, permite reducir la frecuencia y el coste de las inspecciones y reparaciones reduciéndose así los costes de mantenimiento y logrando una vida útil más larga.

Otra característica a destacar, es la buena condición del acero al final de su vida útil, pudiéndose así reciclar y reducir la contaminación.

2.4 Correlación Digital de Imágenes

La correlación digital de imágenes (DIC, del inglés *Digital Image Correlation*) es una técnica óptica de campo completo que sirve para la medición de desplazamientos y deformaciones mediante el estudio de una sucesión de imágenes. La técnica consiste en la toma de una sucesión de imágenes con una determinada frecuencia del ensayo de una probeta desde un estado inicial a un estado final. Las probetas a ensayar tienen que tener una preparación previa para poder utilizar el DIC.

El mayor atractivo de esta técnica en cuanto a análisis estructural se refiere, es debido a que es una técnica no invasiva, es decir, que no compromete la integridad del elemento estructural a estudiar. Otra ventaja del DIC, es que precisa pocos requerimientos para una obtención de buenos resultados. Por otra parte, es muy dependiente a la calidad de las imágenes y es susceptible a las imperfecciones superficiales (necesitamos unas imágenes de buena calidad y sin imperfecciones para no perder información). Es muy versátil, siendo capaz de adaptarse a muchos problemas y situaciones diferentes.

2.4.1 Fundamentos teóricos

El principio básico de la correlación digital de imágenes es el seguimiento de un patrón formado por una escala de grises al azar (al que llamamos moteado) que conforman una faceta de píxeles con valores diferentes de color (faceta). Esta faceta se establece en la imagen inicial con un determinado tamaño (puede ser redonda o cuadrada). La faceta se va rastreando imagen a imagen estableciendo un vector desplazamiento como se esquematiza en la *figura Ilustración 2.4.1.1*. Esquema de funcionamiento de correlación de imágenes.

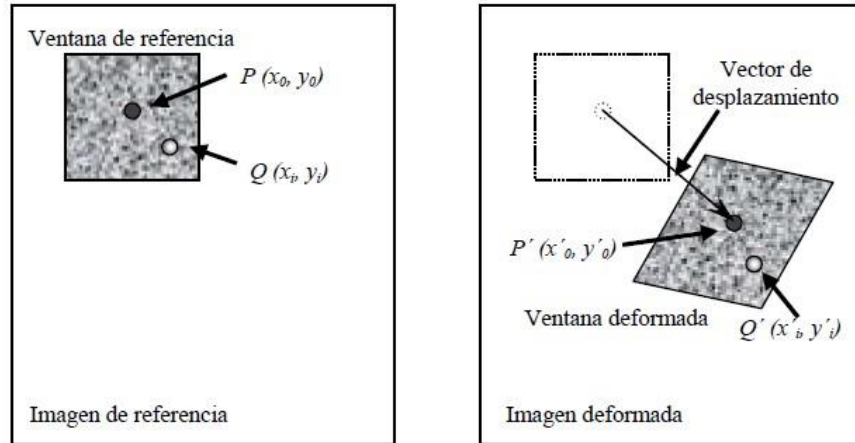


Ilustración 2.4.1.1. Esquema de funcionamiento de correlación de imágenes.

Para llevar a cabo el seguimiento del punto $P(x_0, y_0)$, situado en la faceta de referencia hay que analizar la similitud con el punto $P'(x'_0, y'_0)$, de la faceta de la imagen deformada usando para ello un criterio de correlación predefinido anteriormente. Los más usados son el criterio de las diferencias de las sumas cuadradas, (*sum-squared differenc*, SSD) y la correlación en cruz, (*cross-correlation*, CC).

En el seguimiento de la faceta y basándonos en el supuesto de la continuidad de la deformación de un objeto sólido deformado, un conjunto de puntos vecinos en la imagen de referencia permanece como puntos vecinos en la imagen deformada como se esquematiza en la Ilustración 2.4.1.1. El punto $Q(x_0, y_0)$ situado en la faceta de referencia junto a $P(x_0, y_0)$, puede relacionarse con un punto $Q'(x'_0, y'_0)$ cercano a $P'(x'_0, y'_0)$ mediante la función de forma :

$$\begin{cases} x'_i = x_i + \xi(x_i, y_i) \\ y'_i = y_i + \eta(x_i, y_i) \end{cases} \quad \text{siendo } i, j = -M:M \quad [2.4.1.1]$$

La faceta centrada en el punto $P(x_0, y_0)$ tiene una dimensión de $(2M + 1) \times (2M + 1)$. La función de forma más usada es la de primer orden que define la translación, la rotación, las deformaciones normales y sus combinaciones dentro de la faceta:

$$\xi_1(x_i, y_i) = u + u_x \Delta x + u_y \Delta y \quad [2.4.1.2]$$

$$\eta_1(x_i, y_i) = v + v_x \Delta x + v_y \Delta y \quad [2.4.1.3]$$

Para el seguimiento de movimientos más complejos se usa la función de forma de segundo orden:

$$\begin{aligned}\xi_2(x_i, y_i) &= u + u_x \Delta x + u_y \Delta y + \frac{1}{2} u_{xx} \Delta x^2 + \frac{1}{2} u_{yy} \Delta y^2 + u_{xy} \Delta x \Delta y \\ \eta_2(x_i, y_i) &= v + v_x \Delta x + v_y \Delta y + \frac{1}{2} v_{xx} \Delta x^2 + \frac{1}{2} v_{yy} \Delta y^2 + v_{xy} \Delta x \Delta y\end{aligned}\quad [2.4.1.4]$$

Siendo $\Delta x = x_i - x_0$ y $\Delta y = y_j - y_0$, u y v los desplazamientos a lo largo del eje x e y respectivamente, u_x, u_y, v_x, v_y los gradientes de los desplazamientos de primer orden y $u_{xx}, u_{yy}, u_{xy}, v_{xx}, v_{yy}, v_{xy}$ los gradientes de los desplazamientos de segundo orden todos centrados en la faceta de referencia.

Como se ha mencionado anteriormente se necesita un criterio de correlación para el seguimiento y comparación de las imágenes. Existen dos grandes grupos basados los criterios más usados el de correlación en cruz (CC) y el de la suma de las diferencias al cuadrado (SSD) que se exponen en la *Tabla 2.4.1.1*. Criterios de correlación cruzada y *Tabla 2.4.1.2*. Criterios de correlación de suma de diferencias al cuadrado.

Criterio de correlación CC	Definición
Correlación cruzada (CC)	$C_{NCC} = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [f(x_i, y_j) g(x'_i, y'_j)]$
Correlación cruzada normalizada (NCC)	$C_{NCC} = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M \left[\frac{f(x_i, y_j) g(x'_i, y'_j)}{\bar{f} \bar{g}} \right]$
Correlación cruzada normalizada a cero (ZNCC)	$C_{ZNCC} = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M \left[\frac{[f(x_i, y_j) - f_m] \cdot [g(x'_i, y'_j) - g_m]}{\Delta f \cdot \Delta g} \right]$

Tabla 2.4.1.1. Criterios de correlación cruzada

Criterio de correlación SSD	Definición
Suma de diferencias al cuadrado (SSD)	$C_{SSD} = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [f(x_i, y_j) - g(x'_i, y'_j)]^2$
Suma de diferencias al cuadrado normalizada (NSSD)	$C_{NSSD} = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M \left[\frac{f(x_i, y_j)}{\bar{f}} - \frac{g(x'_i, y'_j)}{\bar{g}} \right]^2$
Suma de diferencias al cuadrado normalizada a cero (ZNSSD)	$C_{ZNSSD} = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M \left[\frac{f(x_i, y_j) - f_m}{\Delta f} - \frac{g(x'_i, y'_j) - g_m}{\Delta g} \right]^2$

Tabla 2.4.1.2. Criterios de correlación de suma de diferencias al cuadrado.

$$f_m = \frac{1}{(2M+1)^2} \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M f(x_i, y_j)$$

$$\bar{g} = \sqrt{\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [g(x'_i, y'_i)]^2}$$

$$g_m = \frac{1}{(2M+1)^2} \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M g(x'_i, y'_j)$$

$$\Delta f = \sqrt{\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [f(x_i, y_j) - f_m]^2}$$

$$\bar{f} = \sqrt{\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [f(x_i, y_i)]^2}$$

$$\Delta g = \sqrt{\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [g(x'_i, y'_j) - g_m]^2}$$

Las coordenadas del punto $g(x'_i, y'_i)$ es posible que queden entre pixeles en la faceta deformada por lo que sería necesario su cálculo antes de llevar a cabo la correlación.

2.4.2 Equipo necesario

- Cámara digital CCD de alta definición con su respectivo soporte para la sujeción.
- Foco de luz externa para mejorar calidad de imágenes. Podría usarse sin problemas iluminación natural
- Pintura blanca y negra con rociador (en spray).
- Equipo de recolección de las imágenes



Ilustración 2.4.2.1. Equipo usado para usar la técnica DIC.

2.4.3 Preparación de probetas

Para obtener resultados válidos y que el software del DIC sea capaz de procesar las imágenes, las probetas del elemento estructural en cuestión necesitan una preparación previa. El preparado de la probeta puede omitirse si el acero tiene un patrón o escala de grises de forma natural que puede distinguirse en su superficie.

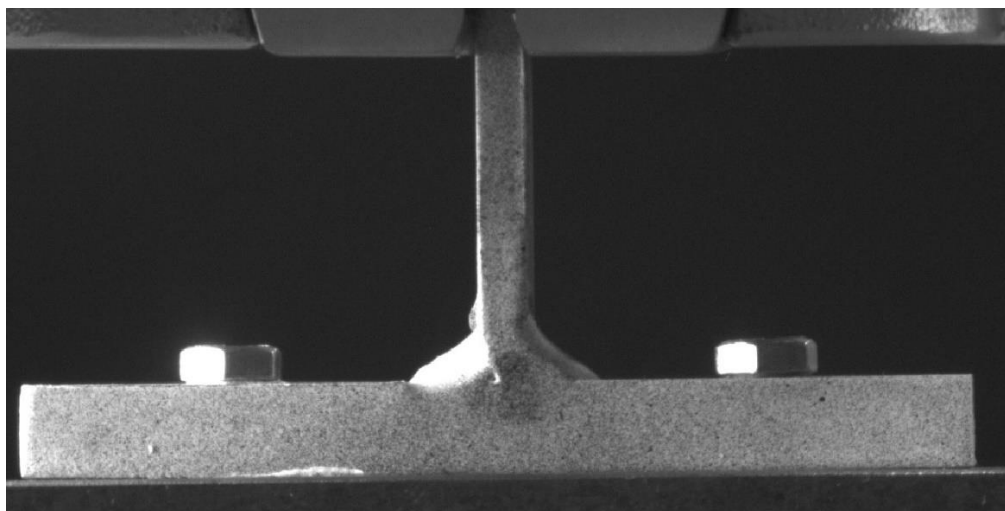


Ilustración 2.4.3.1. Superficie preparada para la aplicación de DIC.

Esta preparación consiste en:

- Pulir y lijar la superficie de interés (elegida conveniencia) para eliminar cualquier imperfección.
- Posteriormente se aplicará una o varias capas de pintura blanca, las que sean necesarias, para tener una capa uniforme y homogénea.

- Una vez secada la pintura blanca, hacemos un moteado con pintura negra que consiste en pintar encima de la capa blanca haciendo escala de grises.

Cuando se usa el DIC en tres dimensiones es necesario un calibrado diferente al de dos. Esto es debido a que las imágenes tomadas tienen perspectiva, es decir, que tienen profundidad por lo que para calibrar no es suficiente con una distancia.

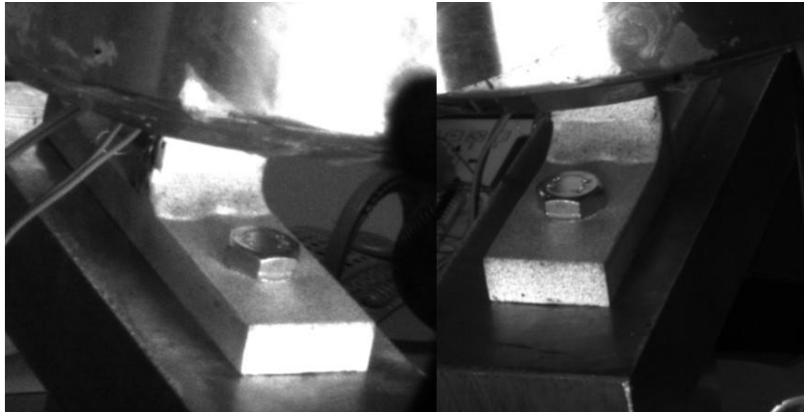


Ilustración 2.4.3.2. Vista izquierda y derecha de las cámaras para DIC 3D.

Para el calibrado se procede a grabar una sucesión de imágenes de una malla de puntos separadas una distancia conocida en diferentes posiciones. El software procesa las imágenes obteniendo los factores de calibrado para los planos xy , xz e yz .

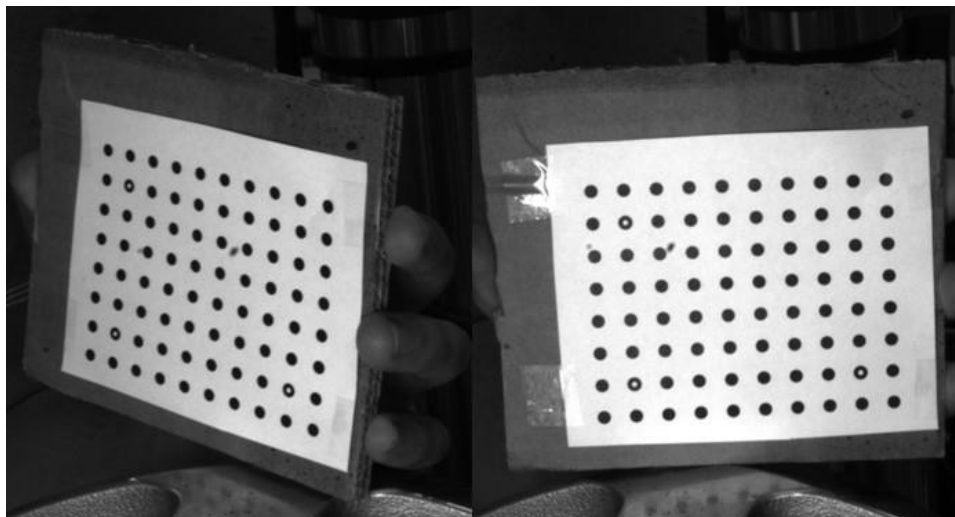


Ilustración 2.4.3.3. Malla de puntos para el calibrado del DIC 3D.

2.4.4 Ensayo DIC

Una vez tenemos las probetas listas, el ensayo con DIC consta de tres partes: toma de imágenes, análisis de las imágenes tomadas y obtención de resultados. En la toma de imágenes la cámara debe ubicarse forma frontal, totalmente paralela a la superficie que queramos analizar para evitar trabajar en tres dimensiones.

. Para llevar a cabo el ensayo se cuenta con el software *Vic-2D* de *Correlated Solutions* que hace posible un fácil análisis y procesado de las imágenes. Para llevar a cabo el análisis en primer lugar necesitamos el factor de calibrado que nos relacione los píxeles con las medidas reales para poder obtener el campo de desplazamientos en milímetros. El software dispone de una sección para ello. Inmediatamente después tendremos que seleccionar nuestra región de interés, ROI, del inglés: *Region of interest*. Para llevar a cabo el análisis solo quedaría elegir el que tipo de interpolación y el criterio que queremos. El software de *Correlated Solutions* usa como criterio el grupo de suma de diferencias al cuadrado (SSD) expuesto en la *Tabla 2.4.1.2*.

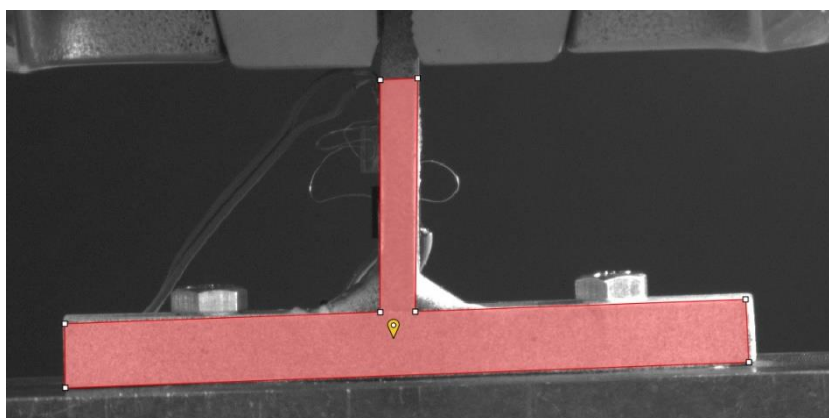


Ilustración 2.4.4.1. Región de interés seleccionada para los modelos del ensayo.

3. Objetivos del trabajo fin de grado

3.1 Objetivos de investigación

El principal objetivo del presente trabajo consiste en el estudio del comportamiento de uniones de acero inoxidable usando el modelo *t-stub* mediante uno de los métodos ópticos más completos actualmente como es la correlación digital de imágenes. Así como, la determinación del campo de deformaciones frontal del espécimen, la curva fuerza-deformación, resistencia y rigidez. El programa experimental consistirá en el ensayo de 9 probetas con diferentes anchos efectivos para diferentes posiciones del tornillo.

Como complemento se hará previamente una caracterización mecánica del acero usado para los ensayos de este trabajo mediante un ensayo de tracción. Para medir las deformaciones se usarán galgas extensiométricas. Esto nos permitirá tener una idea más exacta del comportamiento del acero.

3.2 Objetivos didácticos

Durante el desarrollo del trabajo, además de lo expuesto en el apartado anterior, se plantean multitud de objetivo a alcanzar en lo personal, debido a que el objetivo más importante de este trabajo es aprender la capacidad para adaptarse a los problemas que pueden surgir, desarrollando la capacidad de resolución y determinación frente a los mismos. Por ello, el alumno obtendrá:

- Conocimiento para el diseño y ejecución de un programa experimental: normas, pasos, metodología, procesados...
- Disfrutar y formar parte de un grupo de investigación con un objetivo común: el conocimiento. Buscar fuentes, valorar las cosas relevantes, mejorar la capacidad de expresar y redactar información entre otros.
- Adquisición de conocimientos en más profundidad sobre diversos campos como: las uniones en general, el modelo *t-stub*, aceros inoxidables, Correlación digital de imágenes (DIC)...

4. Programa experimental

El programa experimental constara de dos partes bien separadas. Una primera, donde se llevará a cabo la caracterización mecánica del acero, que en este caso se va a usar un acero austenítico puesto que son los más usados en el mercado. Más concretamente el acero AISI 304, el acero comercial más usado en el mundo. En la segunda parte se estudiará el comportamiento de las *T-stub* que no son exactamente perfiles laminados como tal, sino que están fabricados con láminas soldadas entre sí. Analizaremos este hecho más adelante ya que hay que tener en cuenta alguna particularidad especial.

4.1 Caracterización mecánica del acero AISI 304

Como se ha dicho anteriormente las propiedades de un acero son susceptibles a muchos factores, como pueden ser: el porcentaje exacto de cada componente de aleación, tratamiento térmico aplicado, estructura cristalina... Por esta razón hacer la caracterización es un hecho clave a la hora de conseguir unos resultados que sean representativos y se acerquen a la realidad, ya que se basa en unas propiedades reales. En el trabajo se usa la norma de ensayos a tracción a temperatura ambiente española como base para la caracterización. (11)

4.1.1 Diseño de ensayo

Para la caracterización del acero se harán ensayos de tracción simple. Un ensayo de carácter destructivo en el que la probeta tipo hueso se somete a una fuerza de tracción progresiva hasta su fractura. Durante la aplicación de la carga se van tomando lecturas de las tensiones aplicadas y deformaciones obtenidas en el tiempo para así obtener la curva tensión-deformación de la cual obtendremos las características principales del ensayo.

En un principio, la idea era llevar a cabo el ensayo mediante correlación digital de imágenes, pero debido a que la deformación de la probeta es muy grande, la pintura que permite el moteado pierde su adherencia y, por tanto, la técnica no proporciona resultados a partir de determinado nivel de deformación.

4.1.2 Cumplimiento de normativa

En este apartado se especifica todo lo relativo al cumplimiento de la normativa para las probetas tipo hueso, como la geometría, la localización, tolerancias...

En primer lugar, la localización de las probetas se basa en la norma UNE-EN ISO 377. Lo primero a tener en cuenta es que, en un material laminado como es el caso, el producto final no es homogéneo. Esto significa que las propiedades mecánicas pueden variar en función de su localización.

El modelo *T-stub* planteado en el trabajo está conformado por perfiles soldados, es decir, una lámina haciendo de ala de un espesor determinado y una lámina haciendo de alma soldadas a las alas. Un total de diez probetas, cinco extraídas del alma y cinco extraídas del ala.

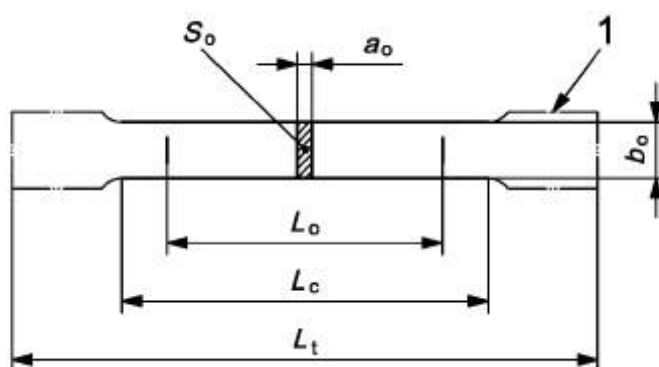


Ilustración 4.1.2.1. Dimensiones características probeta tipo hueso. (11)

Siendo:

- L_o longitud inicial entre puntos
- L_c longitud inicial de la parte calibrada
- L_t longitud total de la parte calibrada
- a_o espesor inicial de la probeta
- b_o anchura inicial de la parte calibrada de la probeta

Las probetas tipo hueso deben de tener unas determinadas medidas acorde a la normativa (11), para una sección transversal rectangular de la cual hay que medir el ancho, b_o , y el espesor, e , en diferentes lugares a lo largo de su longitud L_o . Así como especifica la velocidad a la que ha de hacerse el ensayo sin tener fluctuaciones en ella, también hay que tener especial cuidado de que la sujeción y exactitud de los equipos usados en el ensayo.

Destacar que, el corte de las láminas de acero inoxidable fue realizado con una máquina de corte a chorro de agua que produce un acabado más que satisfactorio. Aun así, se procedió a medir cada una de las probetas para comprobar sus medidas exactas obteniéndose lo siguiente:

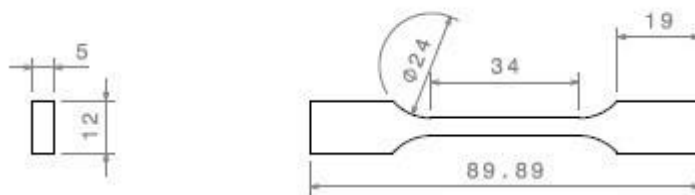


Ilustración 4.1.2.2. Dimensiones probetas tipo hueso del alma.

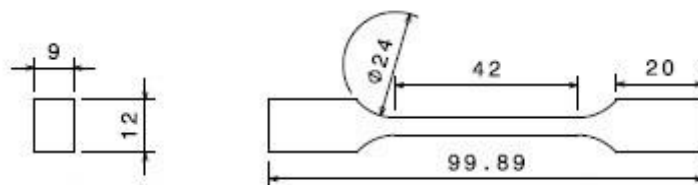


Ilustración 4.1.2.3. Dimensiones probetas tipo hueso del ala.

4.1.3 Metodología experimental

El objetivo del ensayo será la determinación de propiedades como:

- Módulo elástico. (E)
- Limite proporcional. (f_p)
- Límite elástico. (f_y)
- Deformación elástica. (ε_y)
- Coeficiente de Poisson. (ν)
- Resistencia última. (f_{max})
- Deformación última. (ε_u)
- Módulo de endurecimiento por deformación. (E_h)

Los ensayos se llevaron a cabo en los laboratorios de la Universidad de Jaén empleando la máquina de tensión universal modelo 2736 de Instron, que proporciona una capacidad de carga de 30 kN. Esta máquina nos permite controlar la velocidad a la que se separan las cabezas de las mordazas, controlando así, la velocidad del ensayo que será de $1 \frac{mm}{min}$ acorde a la norma. Se obtendrán medidas de la fuerza aplicada para una separación determinada de las cabezas de la mordaza (que coinciden con los desplazamientos de la probeta).



Figura 4.4. Probetas tipo hueso de acero inoxidable.

Para la medida de las deformaciones se usaron diferentes galgas extensiométricas, en concreto, el modelo FCA-2-11 de Tokio Sokki Kenkyujo Co. Ltd. Se optó por este modelo con el objetivo de poder medir deformaciones tanto longitudinales como transversales. Solo se usaron en las cinco probetas del ala para así determinar el coeficiente de Poisson. La galga tiene una resistencia de $120\ \Omega$ y un factor de 2.10. El modelo FAE-125-35-S6E-J para medir deformaciones longitudinales a lo largo de la dirección de aplicación de la fuerza usada en las probetas de un espesor de 5 mm con $350\ \Omega$ y 2.01 de factor de galga y por último el modelo FLA-6-1000-23 de $1000\ \Omega$ y 2.12 de factor de galga para las el resto de probetas.

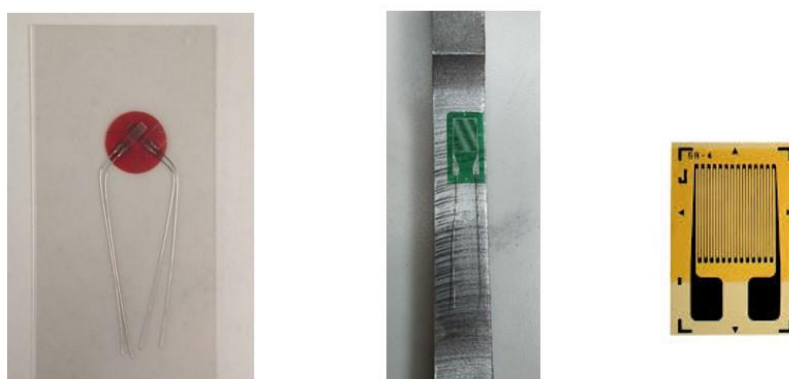


Ilustración 4.1.3.1. Galgas extensiométricas usadas en los ensayos.

El uso de galgas requiere de una preparación previa de la superficie de la galga. Esta preparación consiste en la homogenización de la superficie mediante la limpieza y desengrasado de la misma para el posterior uso de papel de lija con diferentes tamaños de grano. En las probetas se usaron tres tipos de grano diferentes: un 80

(grano basto), un 220 (grano medio) y un 400 (grano fino) en ese orden consiguiendo una superficie sin irregularidades.

		b_0 (mm)	a_0 (mm)	L_c (mm)	L_t (mm)	S_0 (mm)
ALMA	t_{w1}	3,78	4,99	34	89,84	18,87
	t_{w2}	3,99	4,99	34,12	89,88	19,91
	t_{w3}	3,94	5,00	33,98	89,94	20,07
	t_{w4}	3,96	5,00	33,92	89,88	19,83
	t_{w5}	3,90	5,00	34,02	88,9	19,80
ALAS	t_{f1}	4,08	9,62	41,98	99,9	39,19
	t_{f2}	4,12	10,09	41,96	99,96	42,03
	t_{f3}	4,10	10,09	42	99	41,36
	t_{f4}	3,98	10,10	42	99,84	40,41
	t_{f5}	4,10	10,09	41,88	99,88	41,42

Tabla 4.1.3.1. Dimensiones de las probetas tipo hueso para el ala y el alma.

Para recoger los datos de las deformaciones recogidos por las galgas se usó el equipo P3 Strain Indicator de Vishay Micro-Measurments.



Ilustración 4.1.3.2. Equipo de medición P3 Strain Indicator usado para las galgas.

Para que los datos de los equipos usados coincidan en el instante de tiempo deseado se recolectaron los datos a la misma frecuencia haciéndolos coincidir el instante de tiempo en el que se toman.

Con objeto de complementar y reforzar los resultados obtenidos por las galgas se dispuso el equipo de correlación de imágenes para usarlo en algunas de las probetas sin aplicar una preparación previa de la superficie, solo con las tonalidades de la superficie del acero.

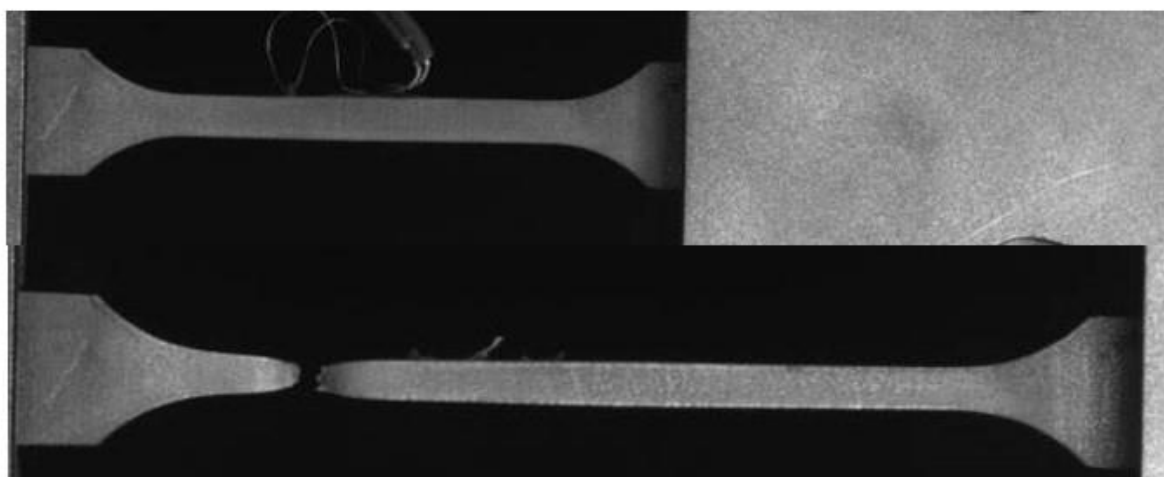


Ilustración 4.1.3.3. Superficie probeta t_{f2} antes y después del ensayo.

Como puede apreciarse en la *Ilustración 4.1.3.3* la galga extensiométrica se despegue de la superficie lateral de la probeta cuando se alcanza un cierto valor de desplazamientos. También se puede apreciar a primera vista que la superficie debería ser válida para la aplicación de la técnica DIC 2D.

4.1.4 Obtención de resultados

Con la recopilación de datos obtenida mediante la metodología experimental señalada en el apartado anterior tenemos la información necesaria para la construcción de la curva tensión-deformación para las diferentes probetas y posteriormente calcular una curva media. De los ensayos realizados la probeta t_{f2} fue descartada del estudio debido a un mal funcionamiento de la galga, lo que supone que no se tuvo en cuenta para el cálculo de las propiedades del ala.

Las curvas se calculan de forma independiente para el ala y el alma, por lo que obtendremos una curva de caracterización, así como diferentes propiedades, para cada una y posteriormente se compararan.

La curva de comportamiento del acero se separa en tres tramos: el primer tramo donde el material tiene propiedades elásticas que acaba con el límite de proporcionalidad (f_p), el segundo tramo donde tenemos una transición de régimen elástico al plástico que está comprendido entre el límite de proporcionalidad y el límite elástico (f_y) y el tercer tramo donde el material tiene propiedades plásticas y que acaba con la tensión última (f_u).

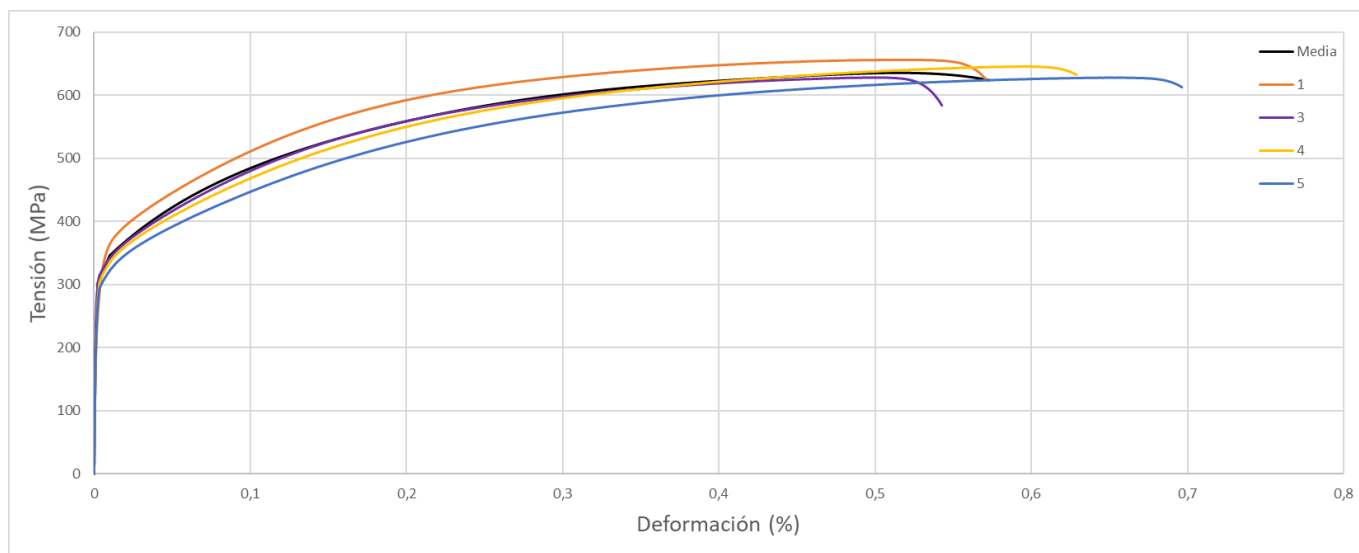


Ilustración 4.1.4.1. Curvas tensión-deformación de las probetas del ala.

Número de probeta	1	3	4	5
Endurecimiento por deformación (MPa)	707,61	652,58	581,97	509,10
Deformación última	57,13%	54,27%	62,88%	69,64%
Tensión última (MPa)	639,99	613,90	641,08	616,84
Límite elástico (MPa)	289,13	313,50	303,62	294,07
Límite de proporcionalidad (MPa)	139,39	182,98	154,51	140,23
Módulo elástico (MPa)	201600	249800	204000	209200

Tabla 4.1.4.1. Propiedades de las probetas del ala.

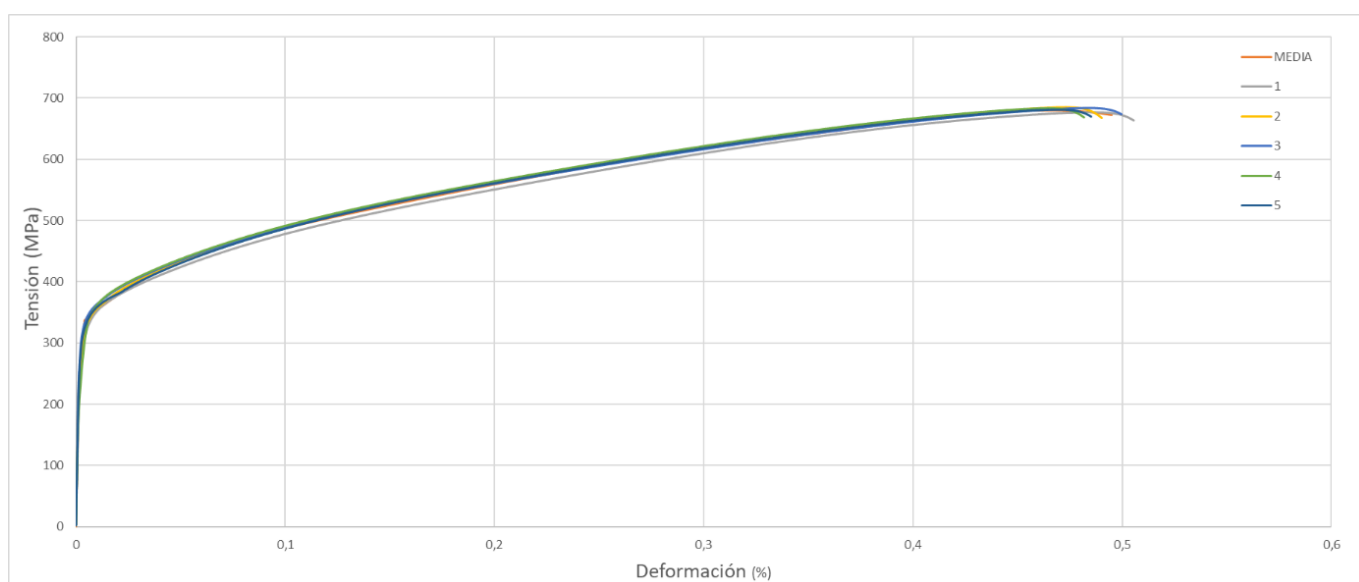


Ilustración 4.1.4.2. Curva tensión-deformación de las probetas del alma.

Número de probeta	1	2	3	4	5
Endurecimiento por deformación (MPa)	774,06	791,72	713,43	860,47	779,73
Deformación última	50,55%	49,02%	49,96%	48,17%	48,51%
Tensión última (MPa)	663,55	667,59	673,71	668,56	669,86
Límite elástico (MPa)	303,21	313,56	326,93	278,96	315,88
Límite de proporcionalidad (MPa)	165,61	202,98	193,19	129,05	139,82
Módulo elástico (MPa)	167100	165700	200100	214600	214800

Tabla 4.1.4.2. Propiedades de las probetas del alma.

Las deformaciones obtenidas por las galgas en roseta se usan para el cálculo del coeficiente de Poisson, que lo calculamos con las deformaciones longitudinal y transversal de forma que:

$$\nu = \frac{-\varepsilon_{trans}}{\varepsilon_{long}} = \frac{-\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \quad [4.1.4.1]$$

Donde:

- ε_{trans} , es la deformación transversal
- ε_{long} , es la deformación longitudinal
- $\varepsilon_1, \varepsilon_2$, son las deformaciones principales

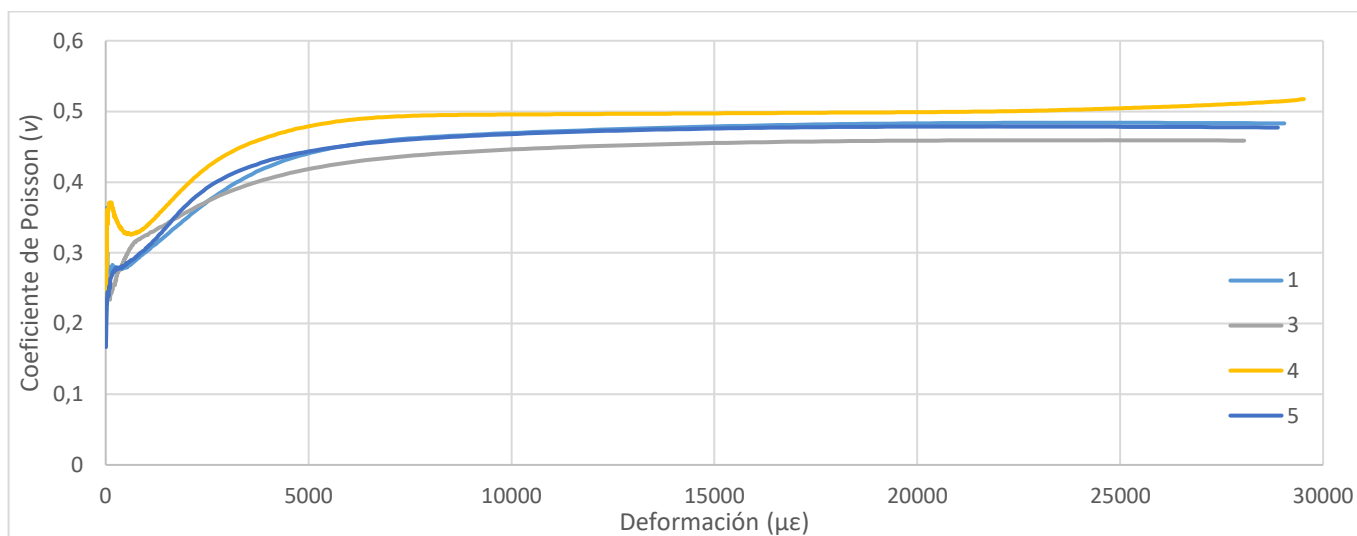


Ilustración 4.1.4.3. Valor del coeficiente de Poisson para las probetas de ala.

Como resultado de los ensayos se presenta en la Ilustración 4.1.4.4. Probetas tipo hueso del alma (izq.) y ala (der.) después de los ensayos. el estado de las probetas después de los ensayos. En ellas se puede observar cómo el fallo encuentra en diferentes posiciones. Esto puede ser debido a un corte desigual de las probetas o a la presencia de defectos de fabricación.



Ilustración 4.1.4.4. Probetas tipo hueso del alma (izq.) y ala (der.) después de los ensayos.

4.2 Comportamiento de la unión en modelo *T-stub*

4.2.1 Diseño de especímenes

Como se ha explicado en el apartado 2.2.1 el modelo *T-stub* es simétrico tanto vertical como horizontalmente. Por esta razón, y con el objetivo de simplificar el programa experimental, se ha diseñado una base rígida que hará el papel de “T” inferior, pero con unas dimensiones superiores a los especímenes.

Las probetas están diseñadas con planchas de acero inoxidable cortadas con chorro de agua según las dimensiones establecidas. Las dimensiones son similares a las del perfil de acero laminado IPE200 con el objetivo de comparar el comportamiento con el modelo. Las planchas están soldadas con diámetro de garganta según lo establecido en el Eurocódigo (1), con unas dimensiones suficientes para que la resistencia de la *T-stub* no se vea limitada por la soldadura. Una vez soldadas, se procede a la perforación de las alas con los diámetros acorde a los tornillos que se desean usar, respetando las tolerancias.

Las dimensiones de los tornillos se diseñaron buscando que, cuando el modelo llegase al colapso, la T tuviese presentase deformación plástica desarrollándose el fallo según alguno de los modos 1 y 2. En concreto, se escogieron tres tipos de tornillos, uno para cada tipo de probeta: tres pares de M6, tres pares de M8 y tres pares de M10 para los anchos efectivos de 15, 25 y 35 respectivamente. El material de los tornillos es acero inoxidable austenítico A2-70 (AISI 304) de grado 8.8. De la denominación “AX-YY”, la X hace referencia al grado de acero inoxidable del tornillo,

que en este caso “A2” se trata de un acero austenítico básico, y “YY” hace referencia al tipo de tratamiento térmico aplicado donde el valor de 70 se corresponde con endurecimiento por deformación.

Límite elástico	640	MPa
Tensión última	800	MPa

Tabla 4.2.1.1. Características tornillos de acero inoxidable austenítico A2-70.



Ilustración 4.2.1.1. Ensamblaje del modelo T-stub.

En cuanto a los especímenes, se van a ensayar nueve modelos de *T-stub* con tres anchos efectivos diferentes: tres de $l_{ef} = 15mm$, tres de $l_{ef} = 25mm$ y tres de $l_{ef} = 35mm$. Para cada probeta de un ancho efectivo, tendremos un valor de n , y así obtener valores de λ en el intervalo $1 \leq \lambda \leq 1.25$.

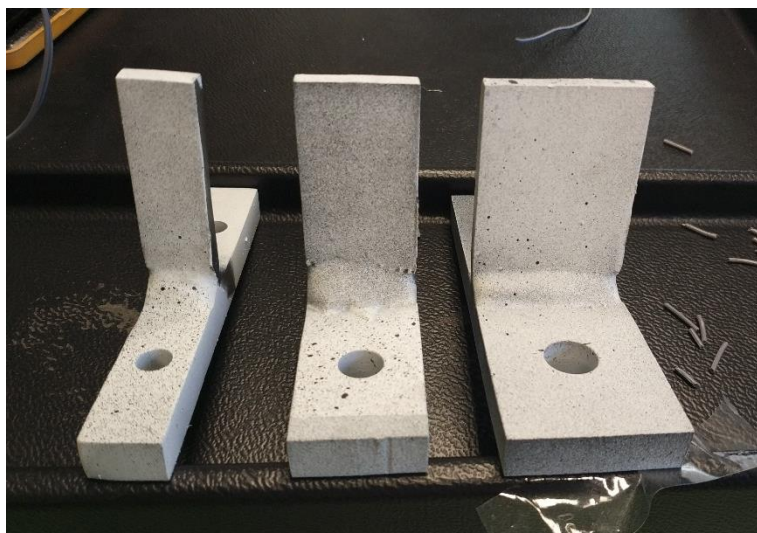


Ilustración 4.2.1.2. Perfiles de los modelos *T-stub* de diferente ancho efectivo.

4.2.2 Normativa

El ensayo a realizar consiste en la aplicación de una carga de tracción hasta llevar el modelo *T-stub* al colapso.

Como se ha dicho en el apartado anterior, las uniones de las T equivalentes se conforman mediante chapas soldadas. Esta soldadura tiene que cumplir con el capítulo cuatro del Eurocódigo 3 (1). Tras calcular el espesor de garganta mínimo para cada probeta se establecen las dimensiones mínimas para soportar la mayor carga y que el modelo no falle debido un pobre dimensionado de la soldadura. Por tanto, el espesor de garganta de la soldadura para todos los modelos ha de ser mínimo, $a_{min} = 5 \text{ mm}$.

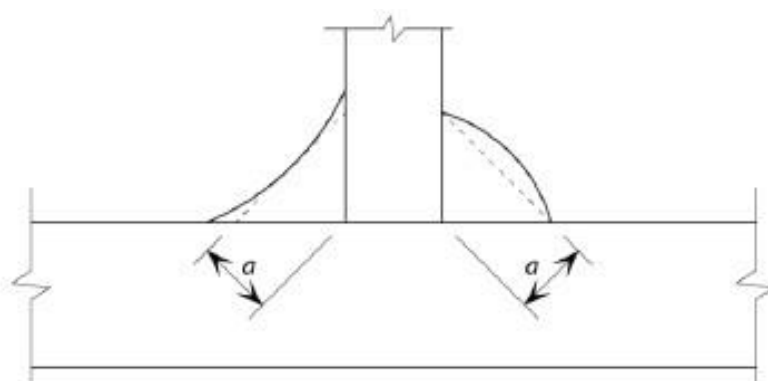


Ilustración 4.2.2.1. Espesor de garganta de una soldadura. (2)

El que los modelos sean soldados afecta también al cálculo de las dimensiones características del modelo *T-stub*. En concreto las dimensiones de n , m y λ . En las ecuaciones expuestas en el apartado 2.2.1, para el cálculo de m se tiene en cuenta

que es un perfil laminado y no soldado. La única diferencia sería el término donde se tiene en cuenta el redondeo de la unión del ala y el alma en un perfil laminado. En el caso de la unión soldada quedaría tal que:

$$m = \frac{b}{2} - \frac{t_w}{2} - n - 0.8 \cdot \sqrt{2} \cdot a \quad [4.2.2.1]$$

Siendo a , el espesor de garganta.

	b (mm)	t_w (mm)	a(mm)	n (mm)	m (mm)	λ	l_{ef} (mm)	t_f (mm)
15,1	100	5	4,94	19,06	22,851	0,834	15	9,6
15,2	100	5	5,4	21,92	19,471	1,126	15,22	9,62
15,3	100	5	5,42	23,2	18,168	1,277	15	9,6
25,1	100	5	5,7	21	20,051	1,047	25	9,72
25,2	100	5	5,68	21,76	19,314	1,127	24,98	9,76
25,3	100	5	5,2	23,05	18,567	1,241	25	9,625
35,1	100	5	5,5	20,92	20,357	1,028	34,85	9,753
35,2	100	5	5,12	22,08	19,627	1,125	34,97	9,725
35,3	100	5	5,3	22,98	18,524	1,241	34,92	9,71

Tabla 4.2.2.1. Dimensiones de los especímenes a ensayar.

4.2.3 Metodología experimental

Este trabajo tiene como objetivo la determinación de las propiedades del modelo *T-stub* como son la resistencia y la rigidez; así como la determinación del campo de desplazamiento y deformaciones frontal y lateral (DIC 2D y DIC 3D, respectivamente) de la pieza incluyendo también la curva de comportamiento. Además de su determinación se pretende comparar los resultados con modelos validos actuales como pueden ser el EC3, la norma americana (AISC), el modelo de Jaspart...

La carga máxima de diseño que pueden aguantar la "T" está entre 40kN y 70kN. Por lo que se usó el modelo de máquina de tensión MTS 810 fabricada por MTS System Corporation de 100kN de capacidad. La velocidad del ensayo fue de $0.5 \frac{mm}{min}$ para todos los especímenes.



Ilustración 4.2.3.1. Disposición de los equipos durante el ensayo.

Con el objetivo de validar los resultados obtenidos con la correlación de imágenes, se incorporaron galgas extensiométricas a uno de los modelos de cada ancho efectivo en las superficies opuestas a las preparadas con el moteado. Las galgas usadas para dicha tarea fueron las FAE-125-35-S6E-J para la cara opuesta a la superficie preparada para DIC 2D con 350 Ω y 2.01 de factor de galga y FLA-6-1000-23 de 1000 Ω y 2.12 de factor de galga la superficie opuesta a la preparada para DIC 3D. Para medir las deformaciones se usó el mismo equipo que para la caracterización del material.

Las cámaras usadas para la toma de imágenes son: dos cámaras basler ace, modelo acA2440-75um para el DIC-3D, y una grasshopper3 5.0 MP Mono USB3 Vision, modelo GS3-51S5M-C para el DIC-2D. Las cámaras están sujetas mediante dos trípodes uno de ellos con un soporte adaptado para la sujeción de las dos cámaras para el 3D. Además, se usó un foco de luz artificial para evitar reflejos y sombras.



Ilustración 4.2.3.2. Cámaras usadas para la técnica DIC.

Para los ensayos hay que corresponder los datos tomados por tres equipos diferentes: toma de imágenes para la correlación de imágenes, lectura de galgas y el valor de la carga en cada instante. La frecuencia de toma de datos fue de un segundo para los tres.

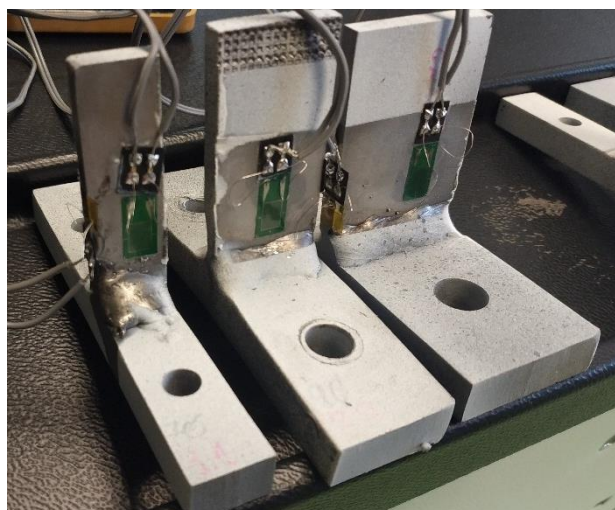


Ilustración 4.2.3.3. Situación de galgas en los modelos T-Stub.

4.2.4 Obtención de resultados

Una vez hemos hecho la recolección de imágenes hay que pasar al post-procesado donde se usará el software Vic-2D para el análisis de las imágenes, posteriormente se compactan los resultados obtenidos para cada imagen con su respectivo instante de carga. El post-procesado que ofrece el software permite actuar sobre varios parámetros del análisis: tamaño de la faceta (*subset*), distancia entre centro de las facetas (*step*), esquema de interpolación, criterio de correlación, reducción de ruido...

El procesamiento de las imágenes de DIC 3D no pudo llevarse a cabo correctamente. Aunque la calibración fue satisfactoria, el campo de visión del perfil de

los especímenes se veía obstruido por la cabeza del tornillo y la mordaza superior de la máquina de tracción, de manera que la superficie observada no ha resultado ser lo suficientemente grande como para proporcionar buenos resultados.

Por regla general, siempre interesa tener una resolución de imagen lo mayor posible con el objetivo de poder tener más píxeles en nuestra región de interés. Por ello, para aprovechar la resolución de nuestra cámara al máximo se ha de situar lo más cerca posible del espécimen.

En cuanto al tamaño de faceta, cuanto mayor sea el tamaño el criterio de correlación será mucho más preciso, puesto que tendremos más píxeles para comparar, a cambio de ralentizar el análisis. Para el procesado de las imágenes se ha tomado como norma general maximizar el tamaño de faceta con la restricción de que quepa dentro de la región de interés.

El solapamiento de facetas (distancia entre centros), determinará la resolución final de los resultados, es decir, cuanto más solapamiento más resolución y por tanto mucho más coste computacional. En este trabajo el valor del solapamiento se impuso para obtener un buen resultado sin un gran coste computacional. En la siguiente tabla se presentan la configuración de DIC para cada modelo.

	Tamaño de faceta (px)	Distancia entre centros de facetas	Interpolación entre píxeles	Criterio de correlación
15.1	33	7	8-tap	NSSD
15.2	33	7	8-tap	NSSD
15.3	35	7	8-tap	NSSD
25.1	51	7	8-tap	NSSD
25.2	53	7	8-tap	NSSD
25.3	51	7	8-tap	NSSD
35.1	71	7	8-tap	NSSD
35.2	73	7	8-tap	NSSD

Tabla 4.2.4.1. Parametros usados para el post-procesado en el software.

4.2.4.1 Campo de desplazamientos y deformaciones.

El software, una vez calibrado y hecho el análisis, lo que calcula son los mapas de desplazamientos para cada imagen en píxeles y milímetros. Es necesario entonces calcular las deformaciones. Además, tendremos la posibilidad de calcular las deformaciones según varios criterios de gradientes, en este trabajo se usó el de

Lagrange. Tenemos la posibilidad de calcular deformaciones según un criterio de plastificación que en este caso se seleccionó el criterio de Von mises.

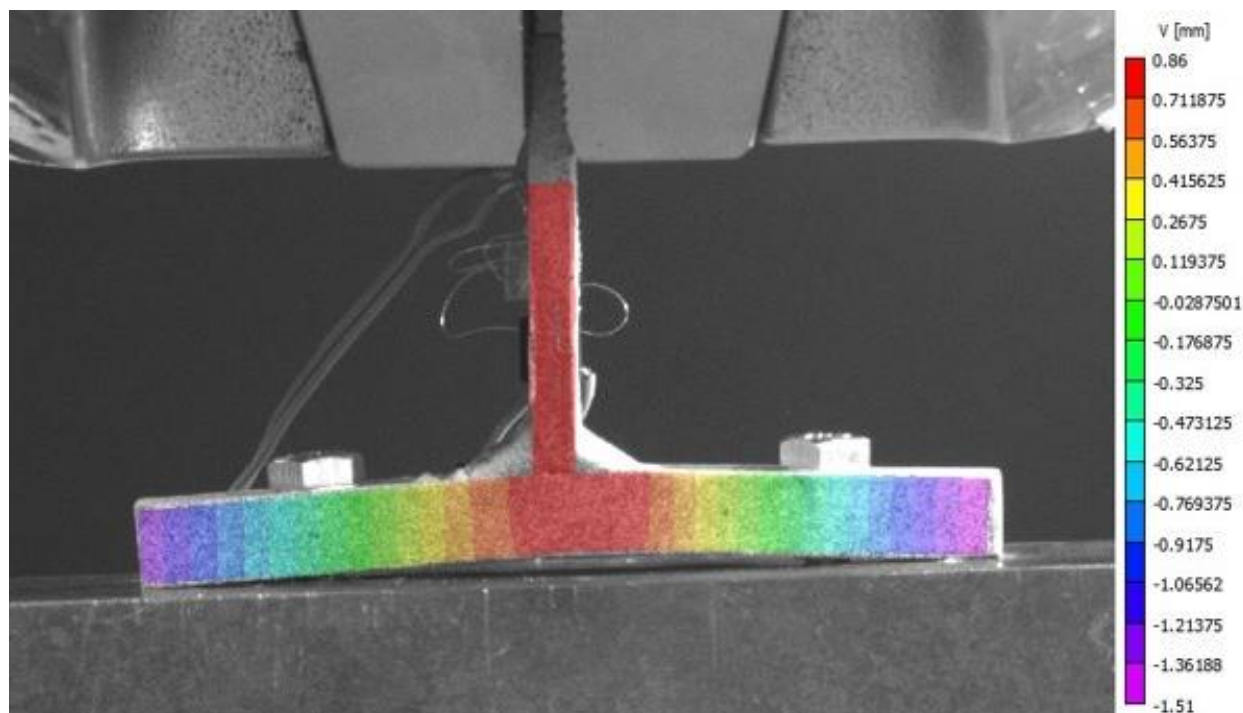


Ilustración 4.2.4.1.1. Mapa de desplazamiento horizontal obtenido con VIC-2D.

En la *Ilustración 4.2.4.1.1* se aprecian los campos de desplazamientos, observándose en los desplazamientos verticales la estructura de bandas simétrica. Se destaca que los desplazamientos negativos son mayores en valor absoluto a los positivos, reafirmando y justificando la fuerza de palanca que surge en el contacto de los extremos del modelo con el soporte.

Las deformaciones se calculan en base a los gradientes de los mapas de desplazamientos medidos por la correlación digital de imágenes, que a su vez son calculados con gradientes también. Por esta razón los mapas de deformaciones pueden ser muy sensible al ruido y no ser representativos.

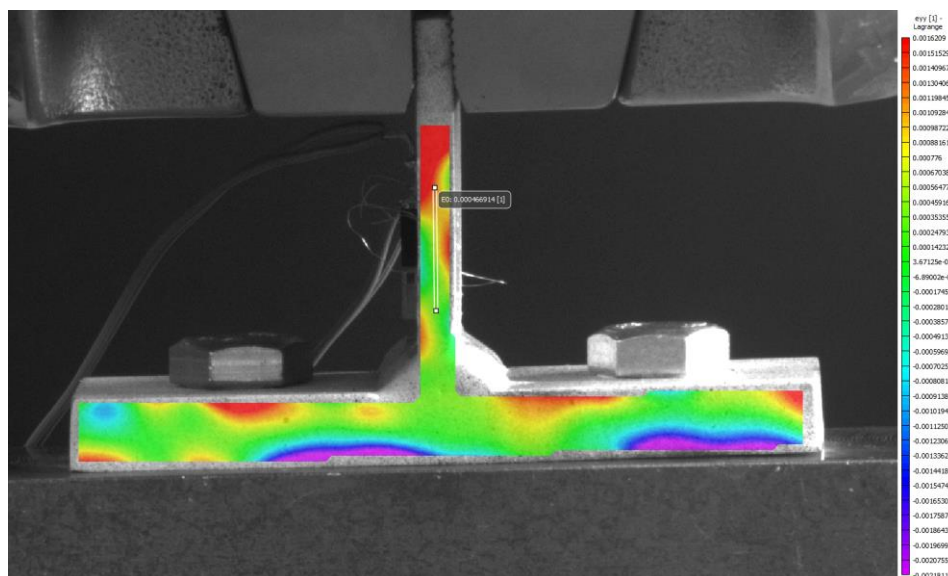


Ilustración 4.2.4.1.2. Campo de deformaciones ε_{yy} con extensómetro en el alma.

En el alma del modelo, podemos suponer un estado de tensión unidimensional, por lo que se asume que la deformación capturada por la galga en la parte posterior del alma, debe ser la misma que los datos de DIC del mapa de deformaciones (ε_{yy}).

Para comprobar si los mapas obtenidos representan un comportamiento que se acerque a la realidad se comparan las deformaciones obtenidas mediante el DIC con las obtenidas por las galgas extensiométricas. Ambas técnicas representan la deformación del alma.

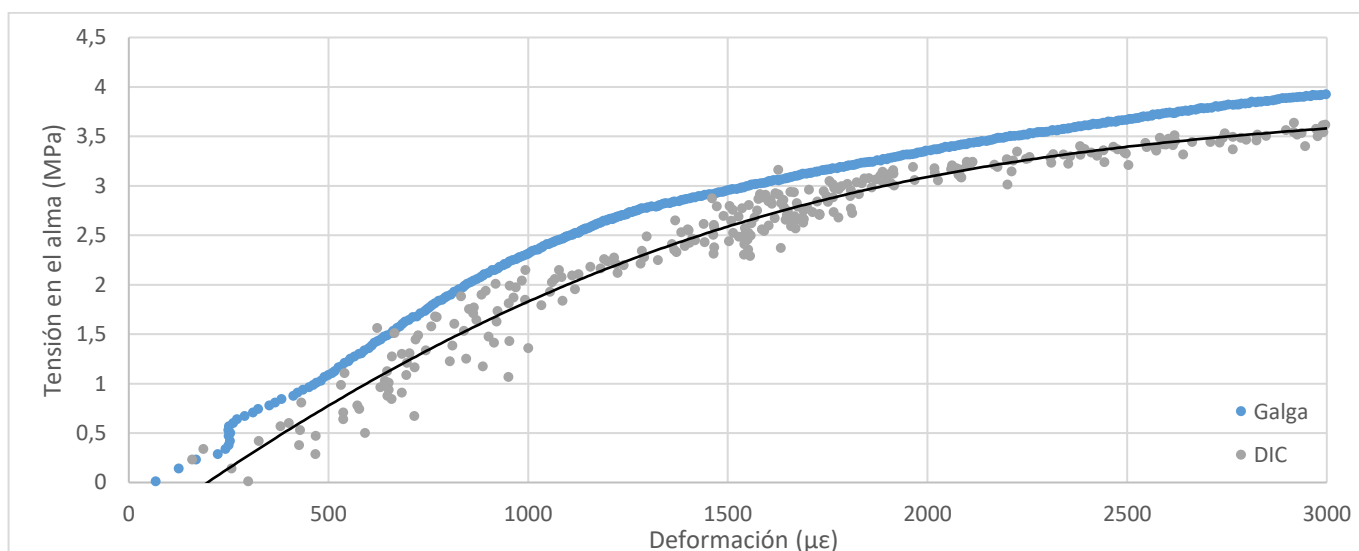


Ilustración 4.2.4.1.3. Curva tensión-deformación del alma obtenida por DIC y galga para el modelo 15.1.

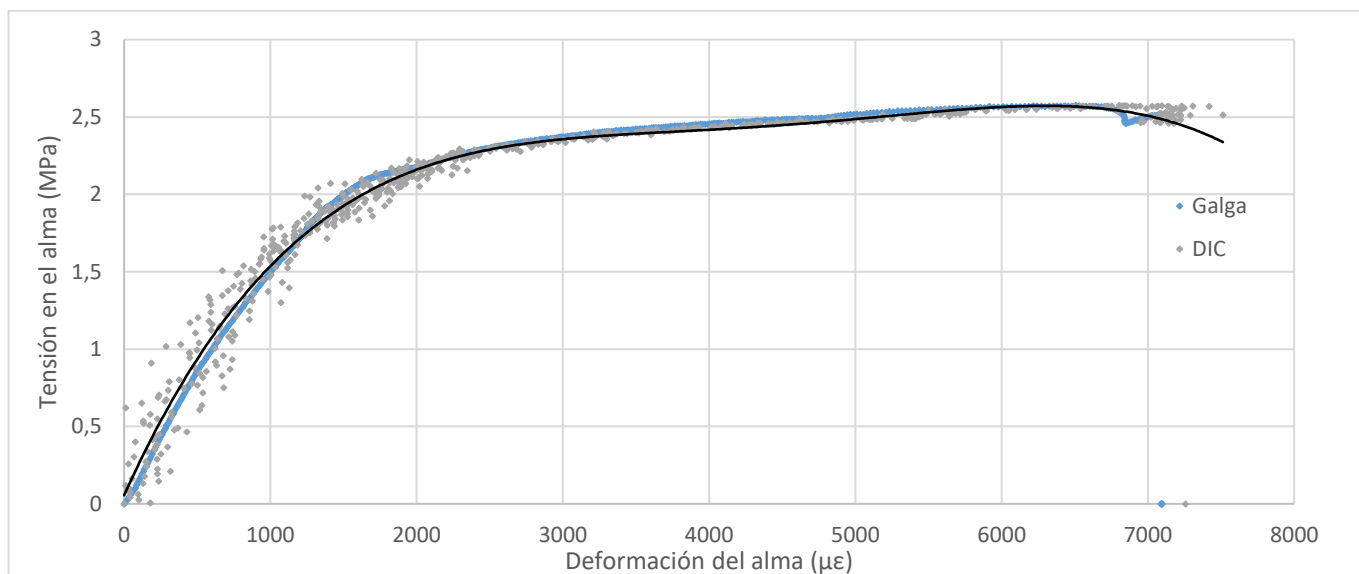


Ilustración 4.2.4.1.4. Curva tensión-deformación del alma obtenida por DIC y galga para el modelo 25.2.

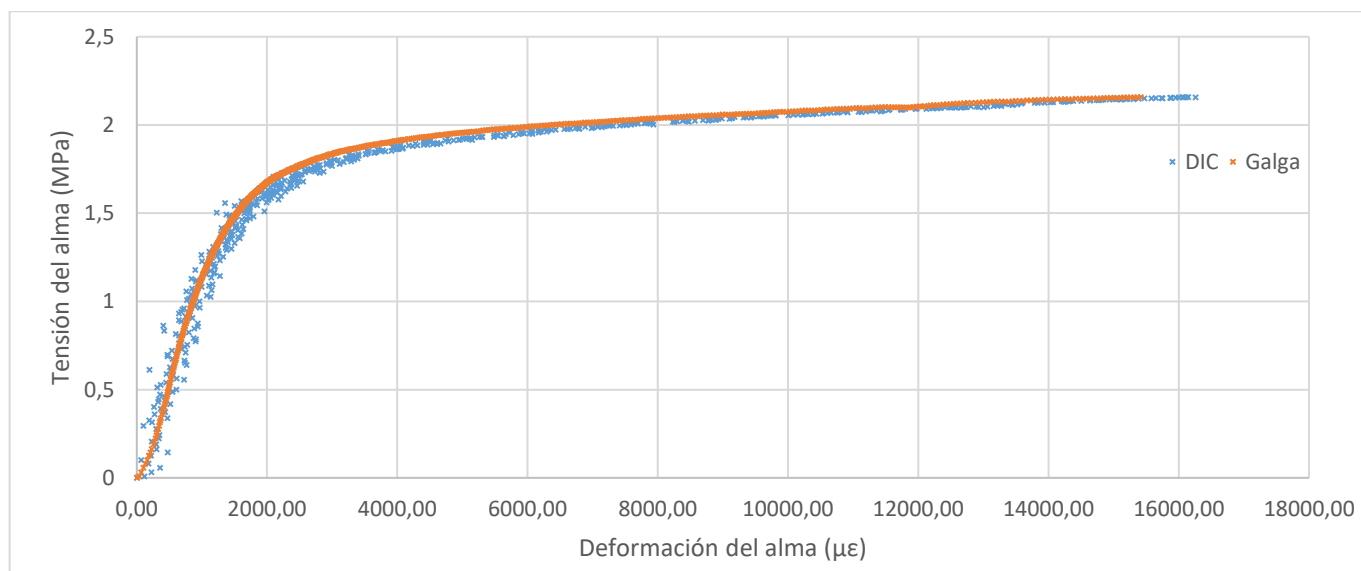


Ilustración 4.2.4.1.5. Curva tensión-deformación del alma obtenida por DIC y galga para el modelo 35.2.

El cálculo de los campos de deformaciones de Von Mises nos va a permitir identificar que zonas de la superficie frontal se encuentran trabajando a régimen plástico y cuales a régimen elástico. Para ello, se necesita la deformación correspondiente al límite elástico (calculada previamente en la caracterización). La figura Ilustración 4.2.4.1.6. Campo de deformación de Von-Mises del modelo 35.2. muestra el campo de deformaciones de Von Mises con una escala limitada por la deformación elástica, diferenciándose el régimen de las zonas de la T.

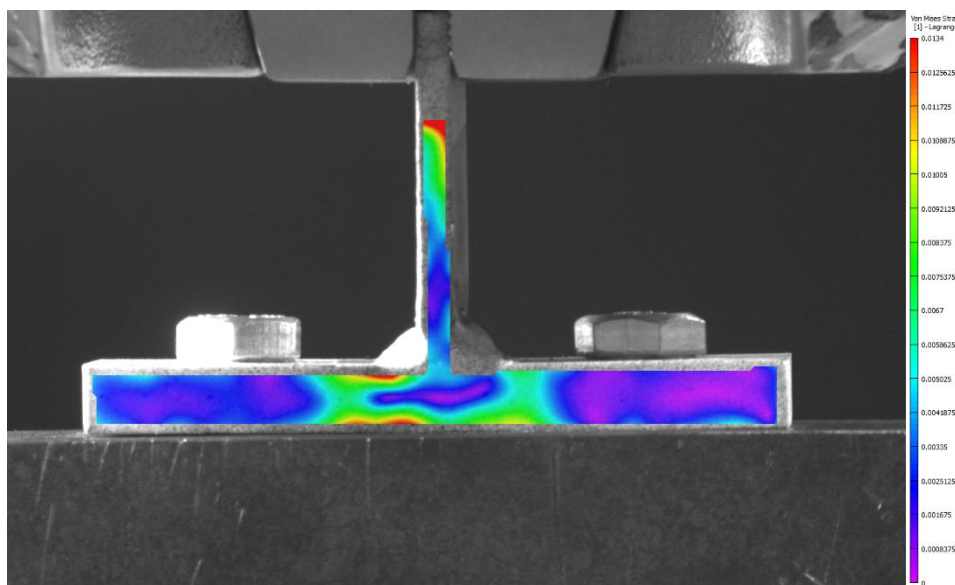


Ilustración 4.2.4.1.6. Campo de deformación de Von-Mises del modelo 35.2.

La determinación de la situación a la que están sometidas las diferentes partes del espécimen permitirá localizar la formación de las rótulas plásticas, así como el modo de rotura que se produce.

Como se aprecia en la *Ilustración 4.2.4.1.6* el comportamiento plástico no aparece de forma simétrica, ni horizontal en ambos lados del alma, ni vertical en la parte inferior y superior del alma ya que el comportamiento plástico está localizado en lugares diferentes.

4.2.4.2 Curva de comportamiento de *T-stub*

Como se explica en el *apartado 2.2* el comportamiento de los modelos *T-stub* se define mediante la curva fuerza-desplazamiento. El desplazamiento de esta curva se corresponde con el desplazamiento vertical del punto central del modelo. Para representar la curva se hace corresponder cada desplazamiento con su estado de carga. En la figura [] se puede apreciar la curva fuerza-desplazamiento para cada uno de los modelos ensayados.

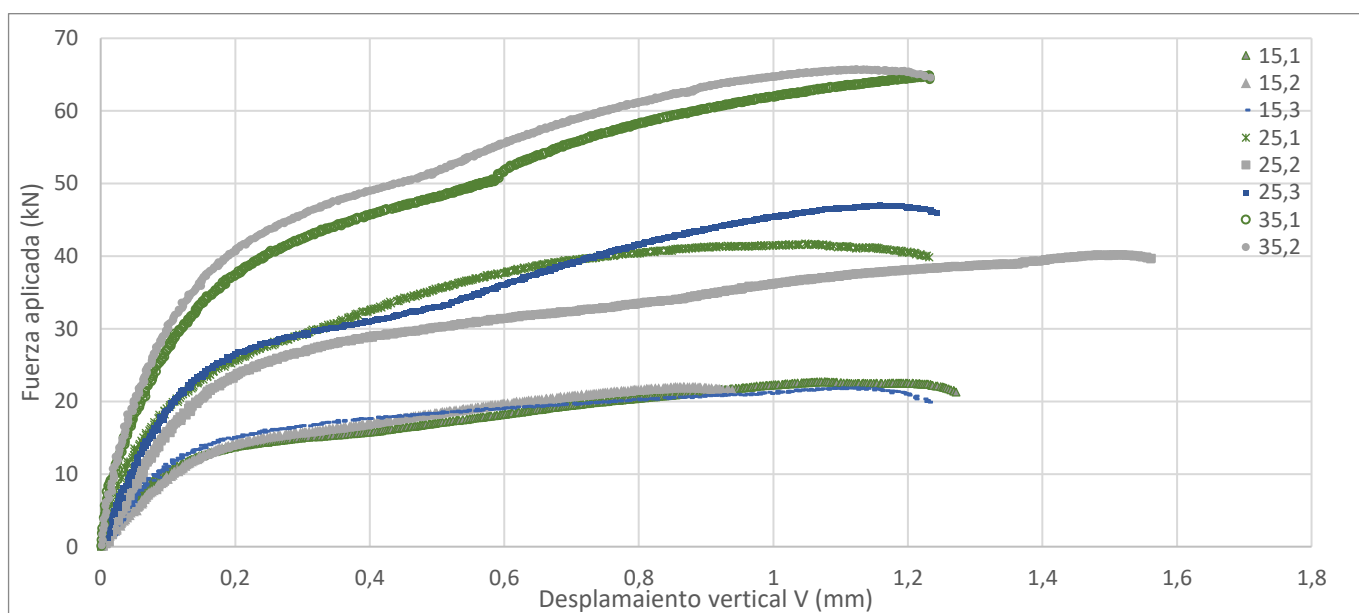


Ilustración 4.2.4.2.1. Curva fuerza-deformación experimental para los modelos T-stub.

5. Análisis de los resultados

Una vez llevado a cabo el programa experimental y obtenido los resultados, el siguiente paso es el análisis de lo obtenido. En este apartado se lleva a cabo un procesamiento de los resultados descritos en apartados anteriores con el objetivo de abordar temas de interés para el estudio de uniones.

5.1 Resultados de la caracterización.

Para la determinación de la curva media se hizo el promedio para cada uno de los tramos de las diferentes muestras. El primer tramo se aproxima mediante una recta que tendrá de pendiente el módulo elástico (E), el segundo tramo se aproxima mediante una curva polinómica de cuarto grado, que tiene unos coeficientes de:

x^4	$-1,65 \cdot 10^4$
x^3	$2,17 \cdot 10^4$
x^2	$-1,10 \cdot 10^4$
x^1	$2,72 \cdot 10^3$
x^0	$1,03 \cdot 10^1$

Tabla 5.1.1. Coeficiente del polinomio de 4º de la transición del ala.

El tercer y último tramo, correspondiente al régimen plástico, se aproxima mediante un polinomio de sexto grado con unos coeficientes de:

x^6	$-1,25 \cdot 10^5$
x^5	$2,25 \cdot 10^5$
x^4	$-1,63 \cdot 10^5$
x^3	$6,19 \cdot 10^4$
x^2	$-1,46 \cdot 10^4$
x^1	$2,61 \cdot 10^3$
x^0	$3,21 \cdot 10^2$

Tabla 5.1.2. Coeficientes del polinomio de 6º grado del comportamiento plástico del ala.

Para la determinación del límite elástico y según el manual de aceros inoxidables (2), el límite elástico se determina mediante el criterio de la deformación remanente (0.2%).

El tipo aproximación usado en la curva media del acero del alma son del mismo tipo que las usadas para la curva media del ala. El régimen de transición se aproxima con un polinomio de cuarto grado y el plástico con uno de sexto grado.

x^4	$-2,55 \cdot 10^6$
x^3	$3,01 \cdot 10^4$
x^2	$-1,40 \cdot 10^2$
x^1	$3,28 \cdot 10^{-1}$
x^0	$3,28 \cdot 10^1$

Tabla 5.1.3. Coeficientes del polinomio de 4º grado para la transición del alma.

x^6	$-4,46 \cdot 10^5$
x^5	$7,10 \cdot 10^5$
x^4	$-4,51 \cdot 10^5$
x^3	$1,46 \cdot 10^5$
x^2	$-2,46 \cdot 10^4$
x^1	$3,61 \cdot 10^3$
x^0	$3,25 \cdot 10^2$

Tabla 5.1.4. Coeficientes del polinomio de 6º para el comportamiento plástico del alma.

Al comparar las dos gráficas se ve aprecia como las curvas de las probetas individuales del alma (*Ilustración 4.1.4.2. Curva tensión-deformación de las probetas del alma.*), son prácticamente una. Este hecho indica una menor dispersión de los datos que a su vez se traduce en que las propiedades del acero del alma son muy fiables.

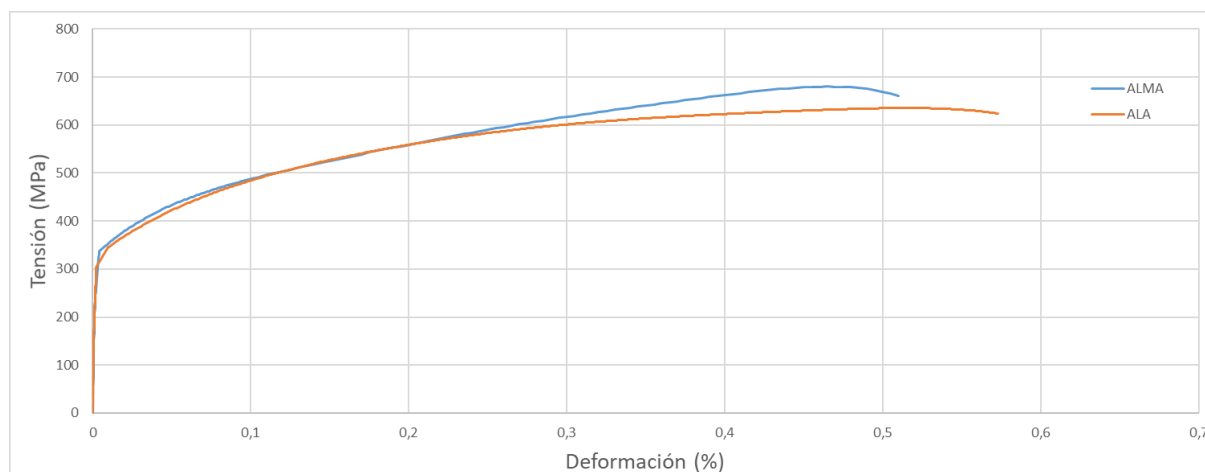


Ilustración 5.1.1. Curva tensión-deformación media del acero del ala y el alma.

Como se ve en la *Ilustración 5.1.1. Curva tensión-deformación media del acero del ala y el alma.*, las curvas medias del ala y el alma tienen un comportamiento muy similar, siendo más distante a partir de una deformación del 35 % y siendo muy diferente su deformación última (ϵ_u).

5.1.1 Coeficiente de Poisson (ν)

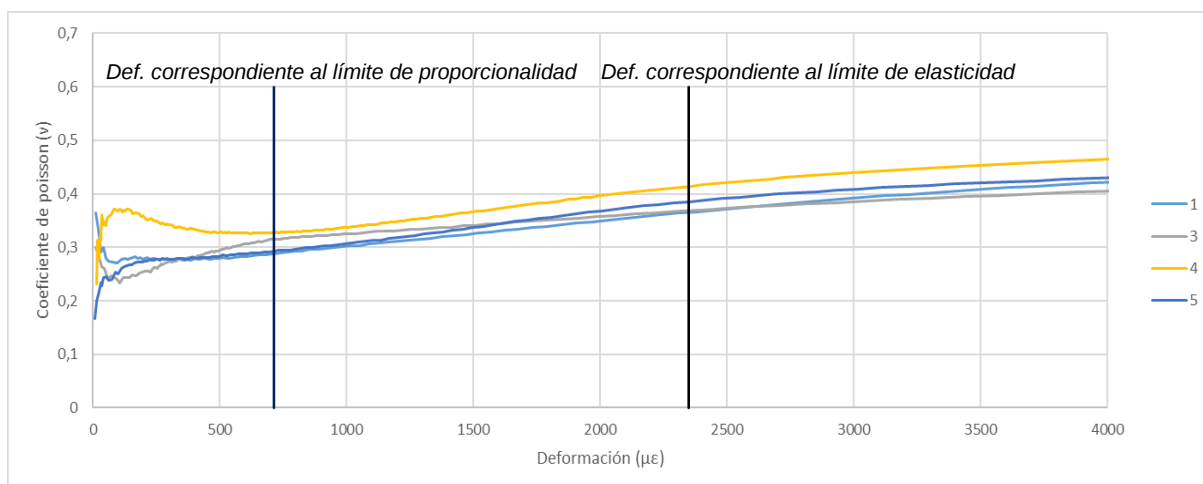


Ilustración 5.1.1.1. Coeficiente de Poisson frente a la deformación principal.

Como podemos apreciar en la *Ilustración 5.1.1.1. Coeficiente de Poisson frente a la deformación principal.*, el valor del coeficiente de Poisson se comporta de forma estable en el régimen elástico y plástico tomando una tendencia ascendente en la transición de un régimen a otro.

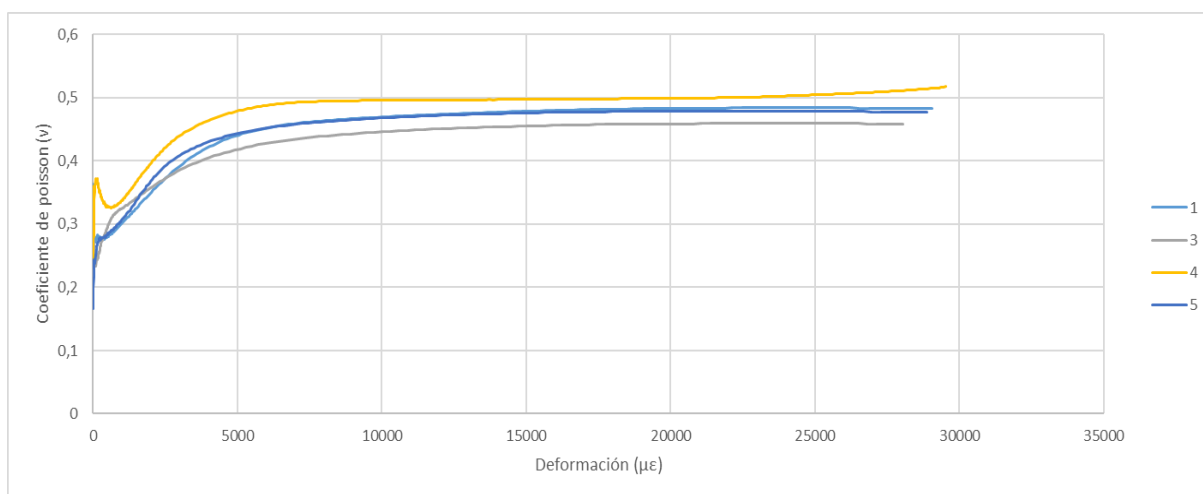


Ilustración 5.1.1.2. Coeficiente de Poisson en régimen plástico.

El resto de propiedades se determinan en base a las curvas de comportamiento de los aceros del ala y el alma que para analizar posteriormente el modelo *T-stub*, se analizarán de forma independiente, aunque tanto el material del ala y el alma sean el mismo acero.

5.1.2 Propiedades del acero del alma y el ala

	ALA		ALMA	
	Valor medio	Desviación	Valor medio	Desviación
$E(MPa)$	216150	10,48%	192460	12,75%
$f_p(MPa)$	154,28	13,19%	166,13	19,41%
$f_y(MPa)$	300,08	3,59%	307,71	5,90%
$v_{elástico}$	0,295	10,06%	X	X
$v_{plástico}$	0,45	5,00%	X	X
$f_{max}(MPa)$	627,95	2,32%	668,65	0,55%
$\varepsilon_u(\%)$	0,61	11,14%	0,49	2,02%
$E_h(MPa)$	612,82	14,06%	783,88	6,69%

Tabla 5.1.2.1. Propiedades características del acero AISI 304 experimentales.

5.2 Resultados de los modelos T-stub

5.2.1 Influencia del régimen del modelo en los desplazamientos verticales

Representando los desplazamientos verticales a lo largo de una línea horizontal situada en la superficie frontal se puede apreciar la deformación que sufre la T, observándose diferencias significativas entre el comportamiento elástico y plástico, junto con las fuerzas de palanca en los extremos de las alas. Para ello, se han seleccionado cuatro imágenes correspondientes a distintos estados de carga durante el ensayo. Obteniendo lo siguiente:

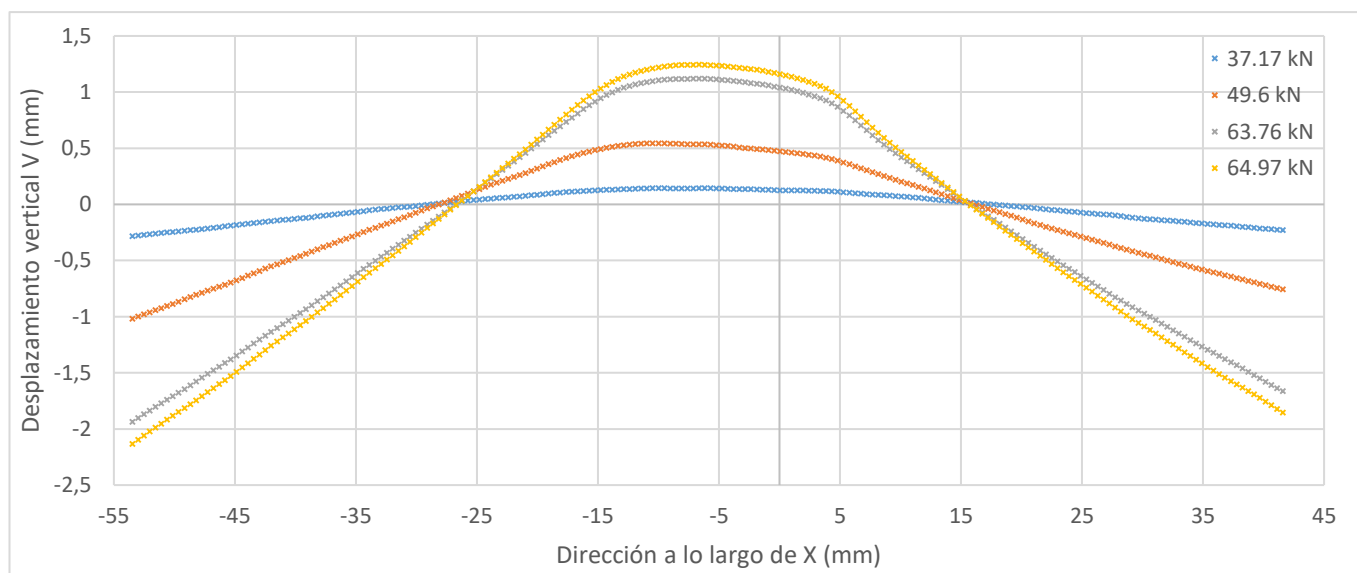


Ilustración 5.2.1.1. Línea de desplazamientos verticales para distintos estados de carga.

Cada fuerza corresponde a una zona diferente como se muestra en la siguiente figura:

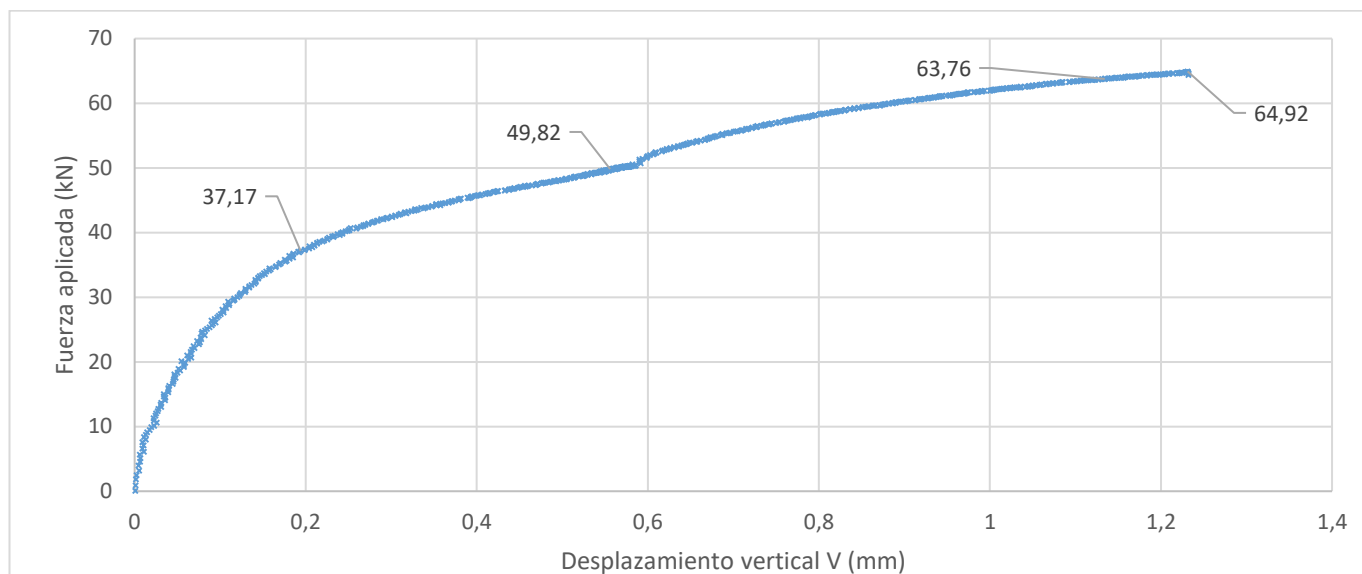


Ilustración 5.2.1.2. Situación de los estados de carga en la curva fuerza-desplazamiento del modelo 35.2.

5.2.2 Localización de rótulas plásticas

Para la determinación de las rótulas plásticas se pretenden representar dos líneas con las deformaciones de Von-Mises a lo largo del espécimen, una en el borde superior y otra en el borde inferior, ambas en el ala, donde se puede apreciar el lugar exacto donde se supera la deformación de Von-Mises.

Teniendo la coordenada superior e inferior de la rótula, se toma el promedio para obtener la coordenada exacta en la fibra central. Para poder hacer una comparativa que sea objetiva el cálculo se hizo para los modelos de $\lambda \approx 1,125$. En este trabajo se asume que la rótula se encuentra localizada donde la deformación de Von-Mises sea máxima.

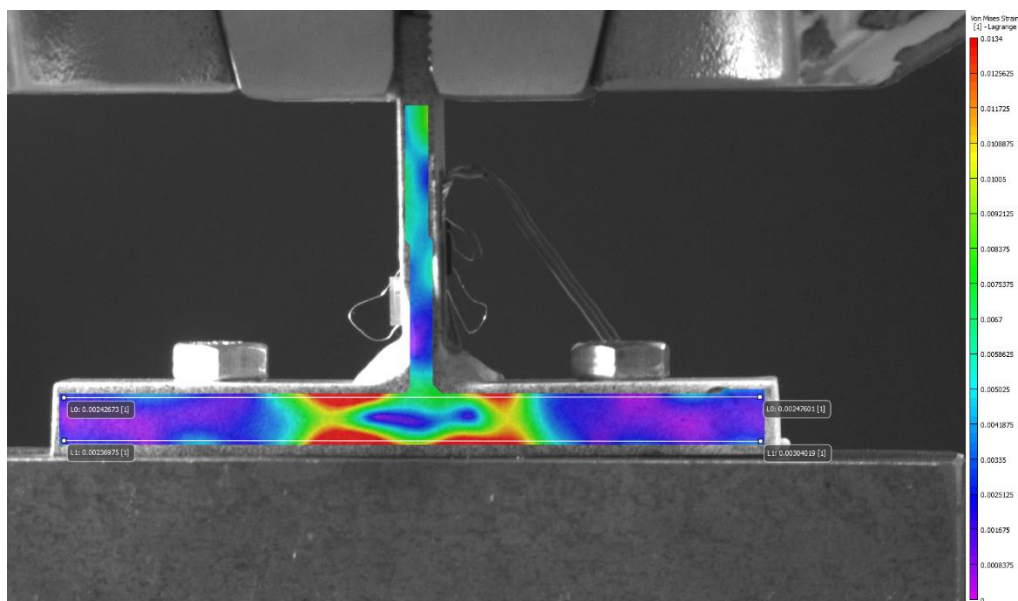


Ilustración 5.2.2.1. Situación de las líneas a representar para el modelo 25.2.

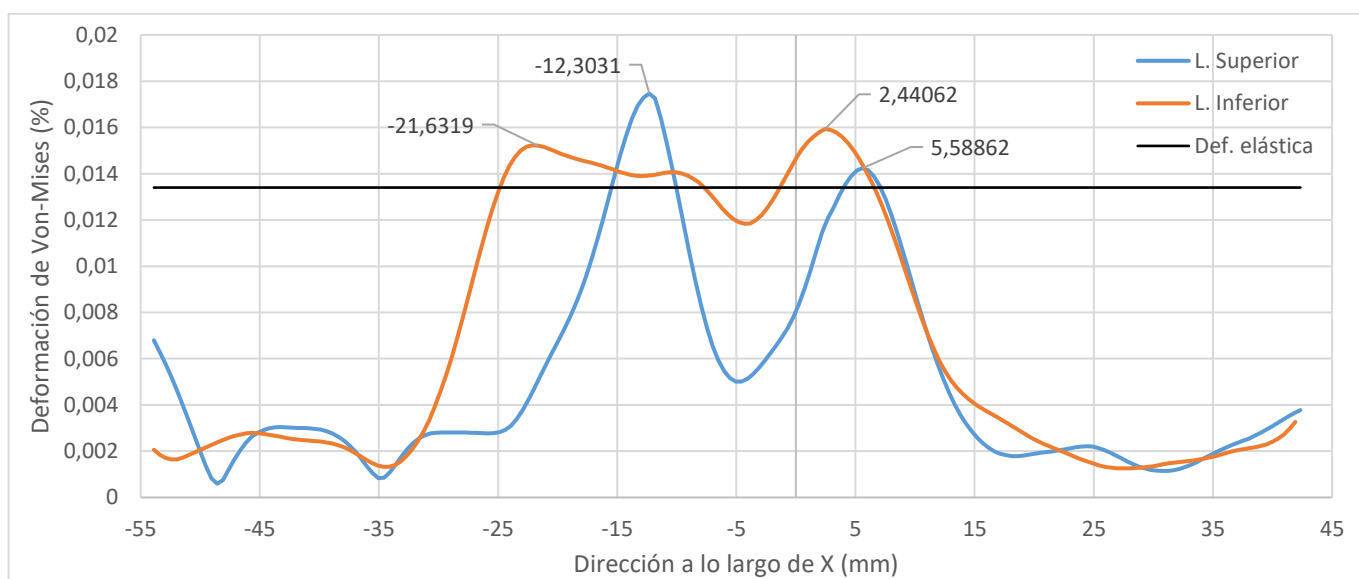


Ilustración 5.2.2.2. Líneas de deformación de Von-Mises para el modelo 15.2.

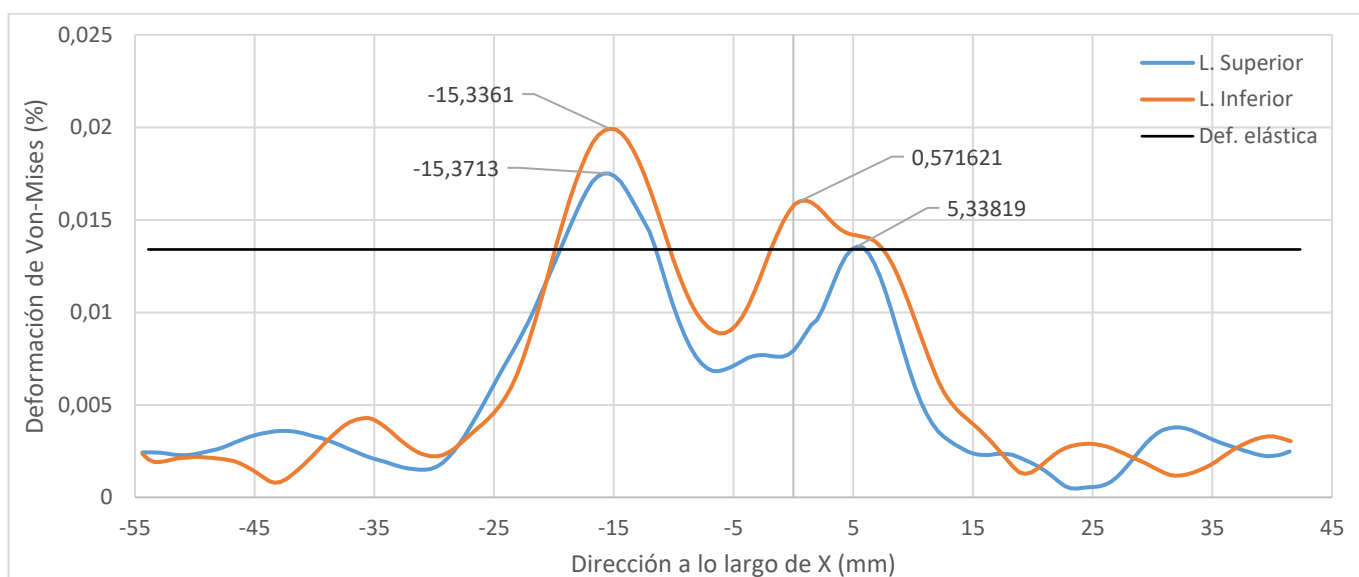


Ilustración 5.2.2.3. Líneas de deformación de Von-Mises para el modelo 25.2.

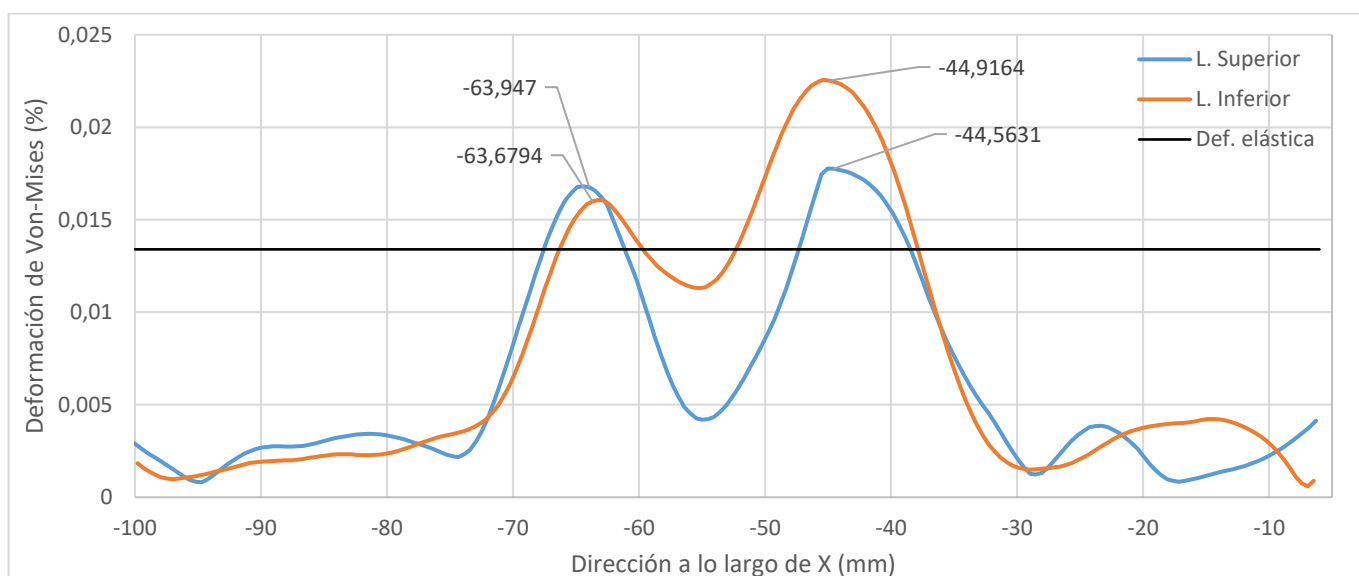


Ilustración 5.2.2.4. Líneas de deformación de Von-Mises para el modelo 35.2.

Según el modelo establecido en el Eurocódigo (1) y como se presenta previamente en el apartado 2.2.2, las rótulas plásticas aparecen a la misma distancia para los modos de fallo uno y dos: la suma de los parámetros n y m .

En la siguiente tabla se exponen las localizaciones de las rótulas teórica (establecida en la norma) y experimentalmente. Para cada espécimen se obtienen dos rótulas a cada lado del alma (izquierda y derecha), las correspondientes a las líneas horizontales a ambos extremos del ala (superior e inferior) como se puede apreciar en la figura Ilustración 5.2.2.1. Situación de las líneas a representar para el modelo 25.2.

	Rótula	$L_{Rp} \text{ (exp)}$	$L_{Rp} \text{ (teo)}$	Diferencia
15.2	Izq.	37,919	41,391	-3,47%
	Der.	39,685		-1,71%
25.2	Izq.	40,026	41,074	-1,05%
	Der.	40,043		-1,03%
35.2	Izq.	36,913	41,707	-4,79%
	Der.	39,742		-1,97%
Diferencia media				-2,34%
Desviación				1.50%

Tabla 5.2.2.1. Situación de rótulas plásticas.

5.2.3 Curva Fuerza-Deformación

En este apartado se representa la comparación entre las curvas implicadas de la norma con las obtenidas experimentalmente. El modelo bilineal de Jaspart se añade de forma adicional.

Obteniendo así los desplazamientos del punto deseado y teniendo los datos de la fuerza en cada instante para cada una de las imágenes podemos construir la curva experimental para cada uno de los modelos. Se compara con los modelos simplificados del Eurocódigo (apartado 2.2.4) y de Jaspart (apartado 2.2.5).

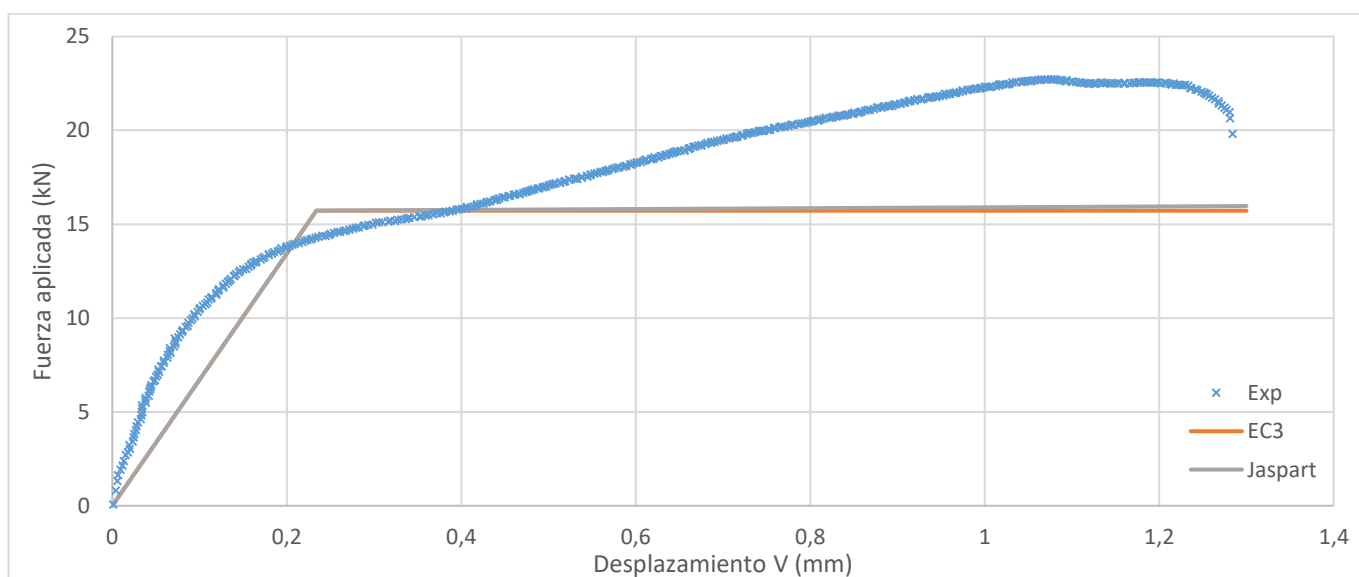


Ilustración 5.2.3.1. Curva de comportamiento del modelo 15.1 frente al EC3 y Jaspart

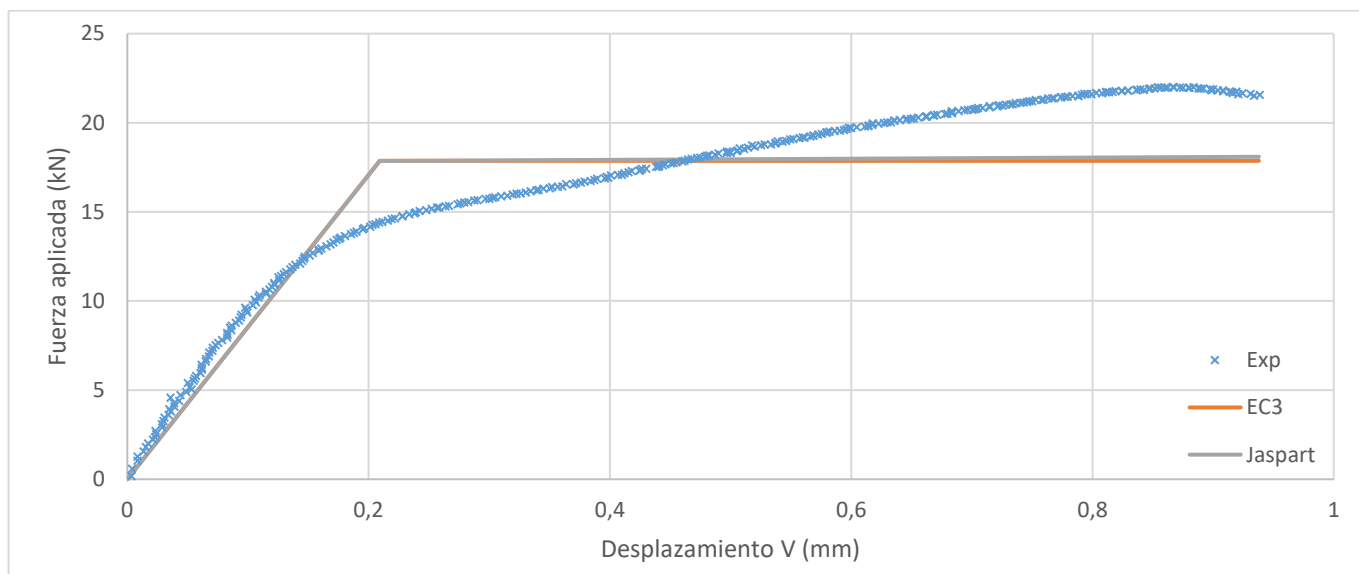


Ilustración 5.2.3.2. Curva de comportamiento del modelo 15.2 frente al EC3 y Jaspart.

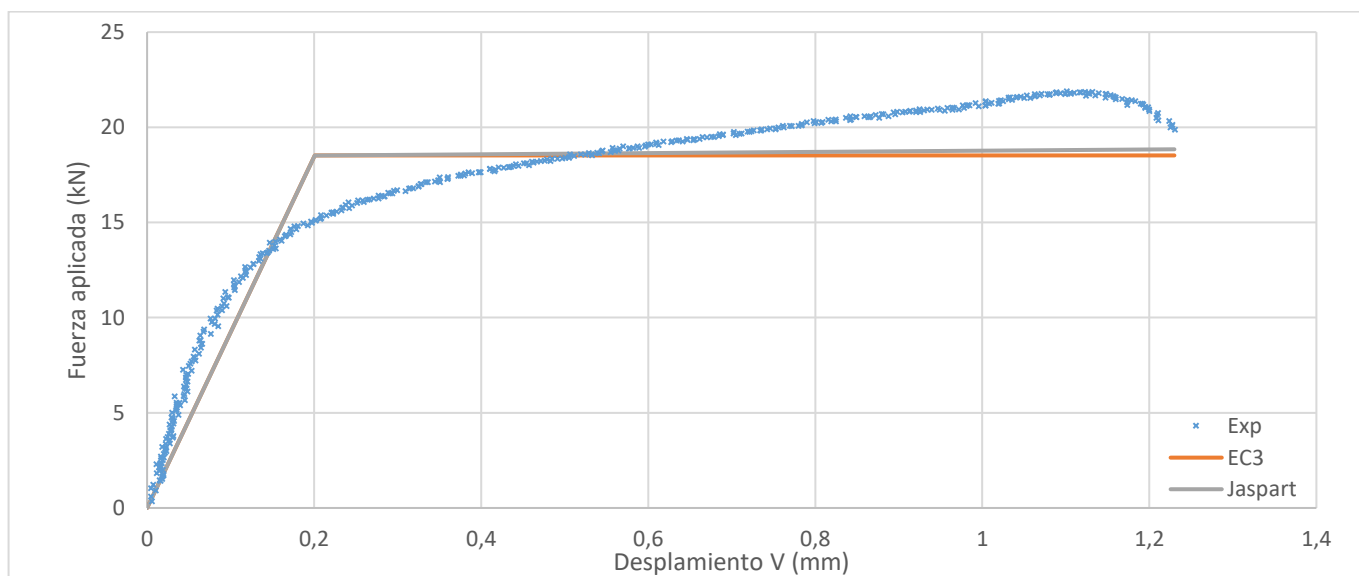


Ilustración 5.2.3.3. Curva de comportamiento del modelo 15.3 frente al EC3 y Jaspart.

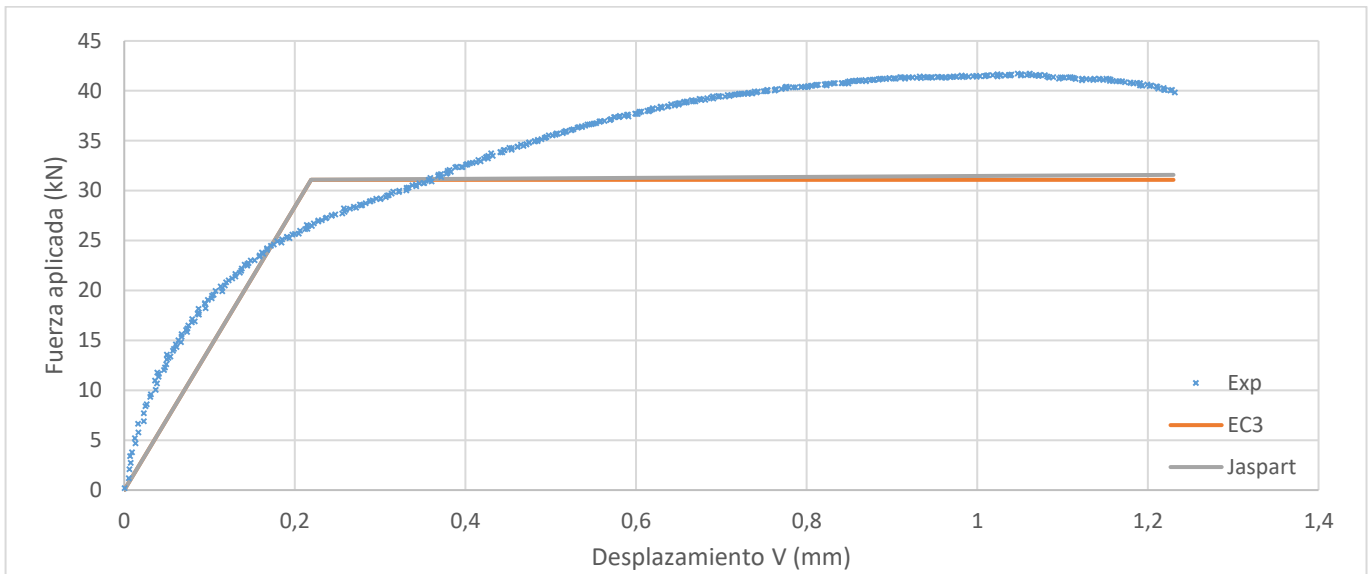


Ilustración 5.2.3.4. Curva de comportamiento del modelo 25.1 frente al EC3 y Jaspart

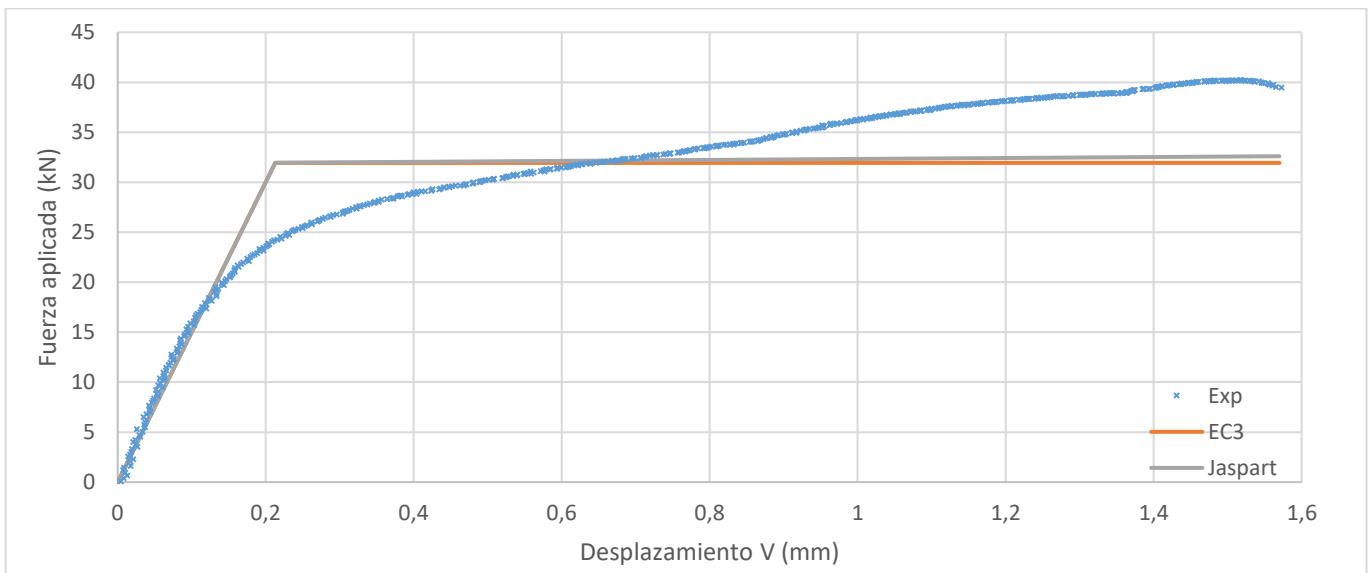


Ilustración 5.2.3.5. Curva de comportamiento del modelo 25.2 frente al EC3 y Jaspart.

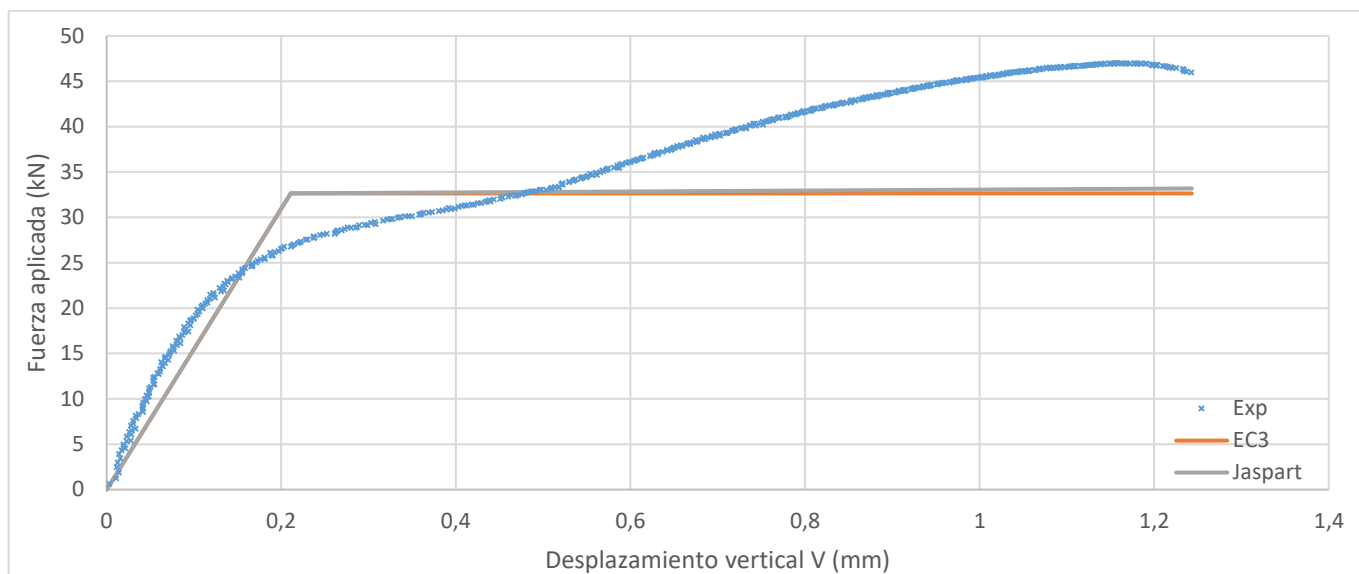


Ilustración 5.2.3.6. Curva de comportamiento del modelo 25.3 frente al EC3 y Jaspart.

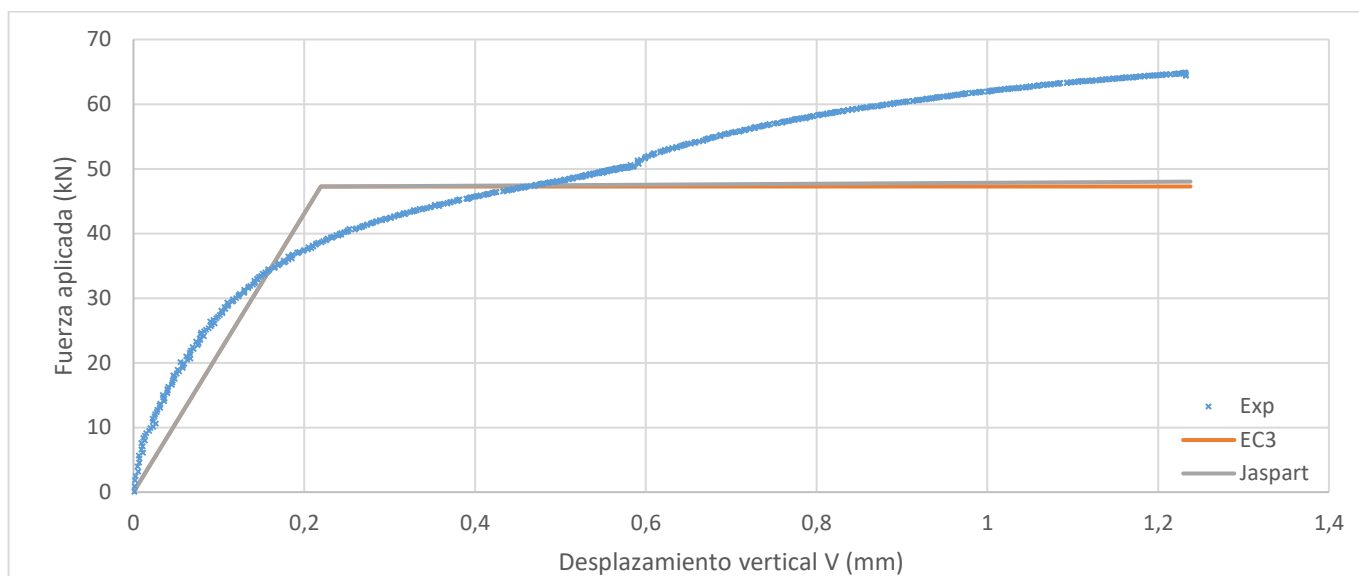


Ilustración 5.2.3.7. Curva de comportamiento del modelo 35.1 frente al EC3 y Jaspart.

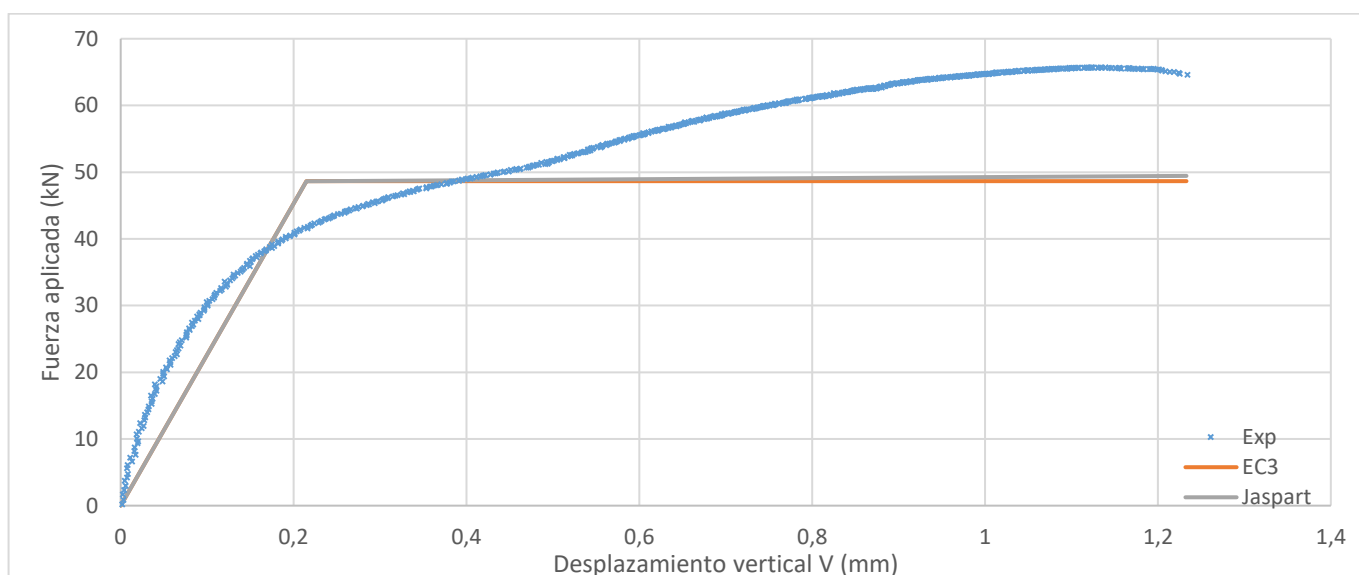


Ilustración 5.2.3.8. Curva de comportamiento del modelo 35.2 frente al EC3 y Jaspart.

Como puede apreciarse en las ilustraciones anteriores, el comportamiento experimental se adapta bien a la curva propuesta por el Eurocódigo durante el primer tramo lineal. A medida que tenemos mayor desplazamiento se ven diferencias significativas en el comportamiento real en cuanto al establecido en la norma. Estas diferencias aumentan en los modelos más resistentes (más ancho efectivo, l_{ef}).

En cuanto al modelo de Jaspart, está casi solapado con el EC3. Esto es debido a que el primer tramo es exactamente el mismo con la diferencia que se tiene en cuenta el endurecimiento por deformación (E_h). El endurecimiento por deformación es menor en los aceros inoxidable que en los aceros al carbono normales.

5.2.4 Influencia de λ

Los modelos de este trabajo presentan diferentes localizaciones del tornillo respecto al borde del ala, es decir, diferentes valores de n y m y a su vez de λ . Es una comparación interesante, ver la influencia de la variación de este parámetro. Para ello, se presentan las curvas de comportamiento para un mismo lote de anchos efectivos. Obteniendo así:

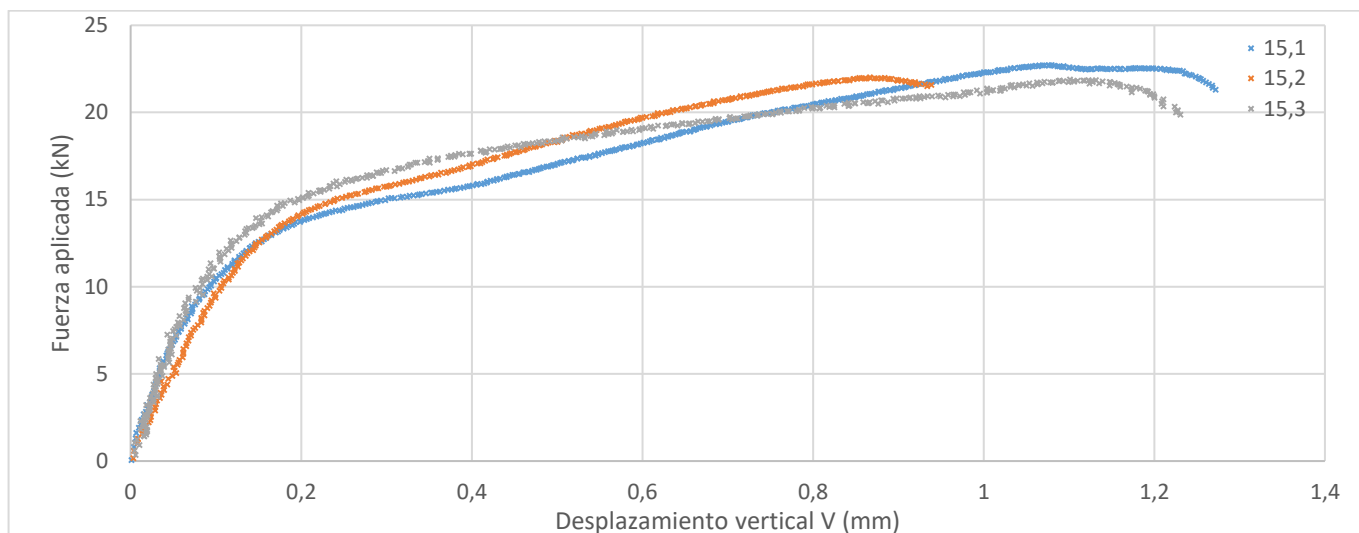


Ilustración 5.2.4.1. Curvas de comportamiento de especímenes con $l_{ef} = 15$ mm.

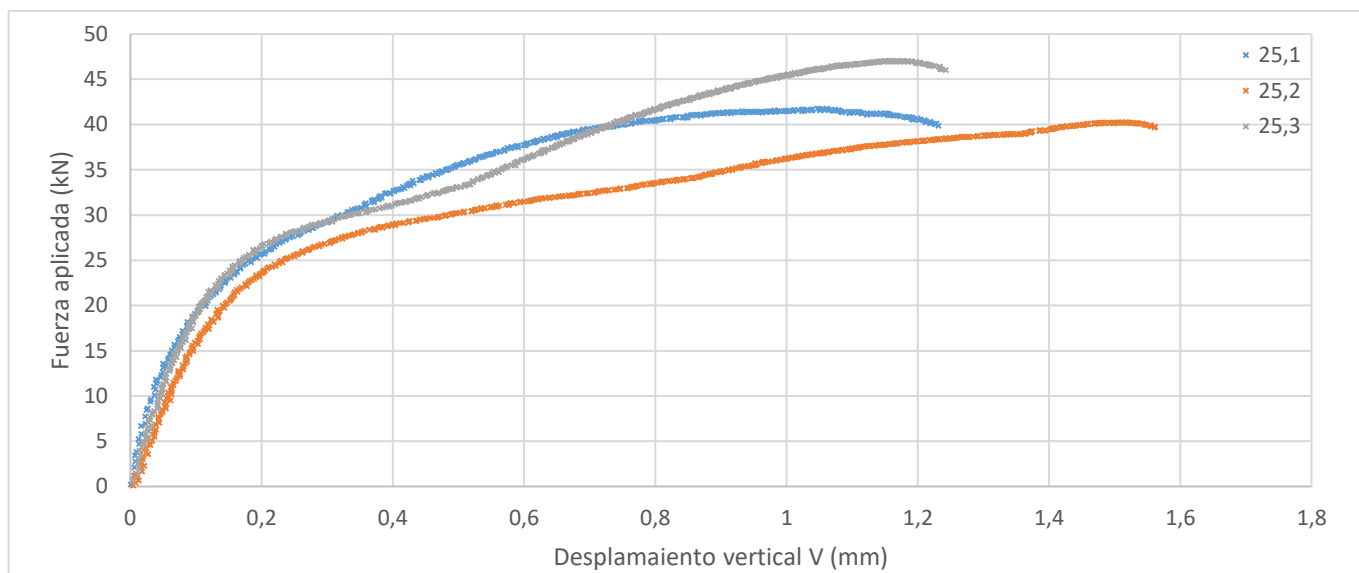


Ilustración 5.2.4.2. Curvas de comportamiento de especímenes con $l_{ef} = 25$ mm.

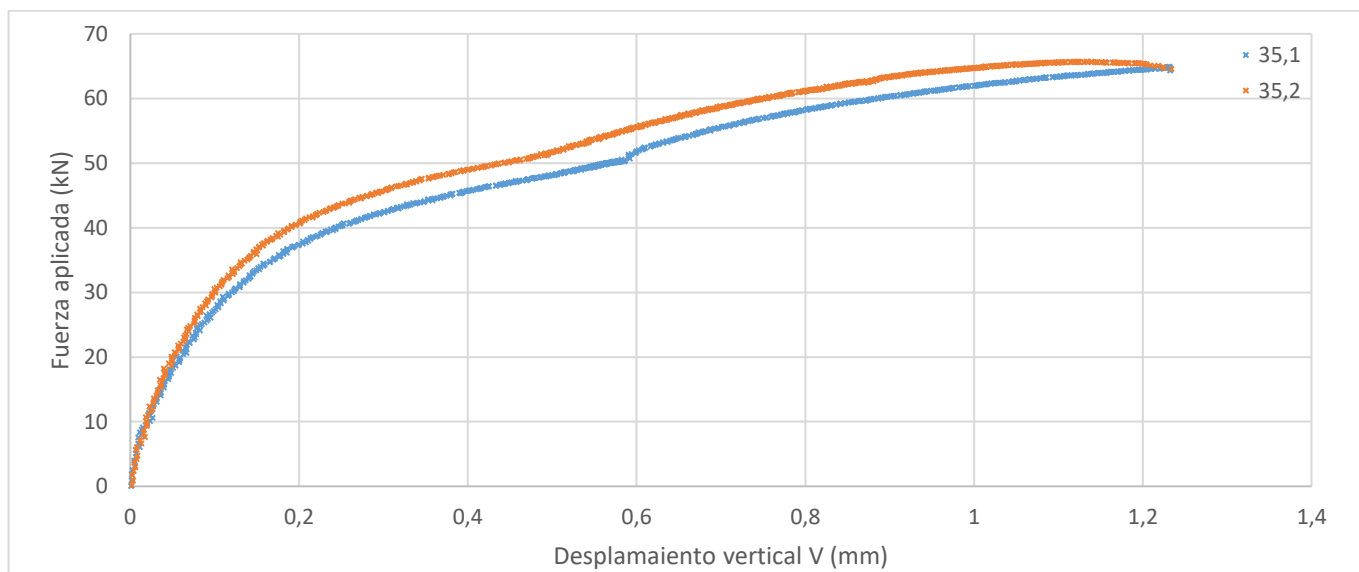


Ilustración 5.2.4.3. Curvas de comportamiento de especímenes con $l_{ef} = 35 \text{ mm}$.

Para un $l_{ef} = 15 \text{ mm}$ (figura Ilustración 5.2.4.1. Curvas de comportamiento de especímenes con $l_{ef} = 15 \text{ mm}$.), el aumentar λ no parece que las propiedades del modelo aumenten de forma significativa y sin seguir ninguna tendencia. Esto puede ser debido a que la resistencia del modelo no es lo suficientemente alta como para que el valor de λ sea significativo. Aun así, se puede apreciar como durante un comportamiento elástico tanto la resistencia como la rigidez alcanza valores superiores para un λ próximo a 1,25.

En la figuras Ilustración 5.2.4.2. Curvas de comportamiento de especímenes con $l_{ef} = 25 \text{ mm}$. y Ilustración 5.2.4.3 si se ve una clara mejora de propiedades a medida que λ aumenta, siendo más visible para un $l_{ef} = 35 \text{ mm}$.

5.2.5 Influencia del ancho efectivo (l_{ef})

En el diseño de los especímenes se procuró que el valor de λ fuese el mismo o al menos que tomase valores parecidos para los tres valores de ancho efectivo. Por motivos de una mala soldadura en uno de los modelos el valor de λ se distancia de valor de diseño. Más concretamente en el modelo 15.1. Aun así, es de interés ver la influencia del ancho efectivo en el comportamiento del modelo. Para llevar a cabo la comparación se presentan las curvas de comportamiento para un mismo valor de λ .

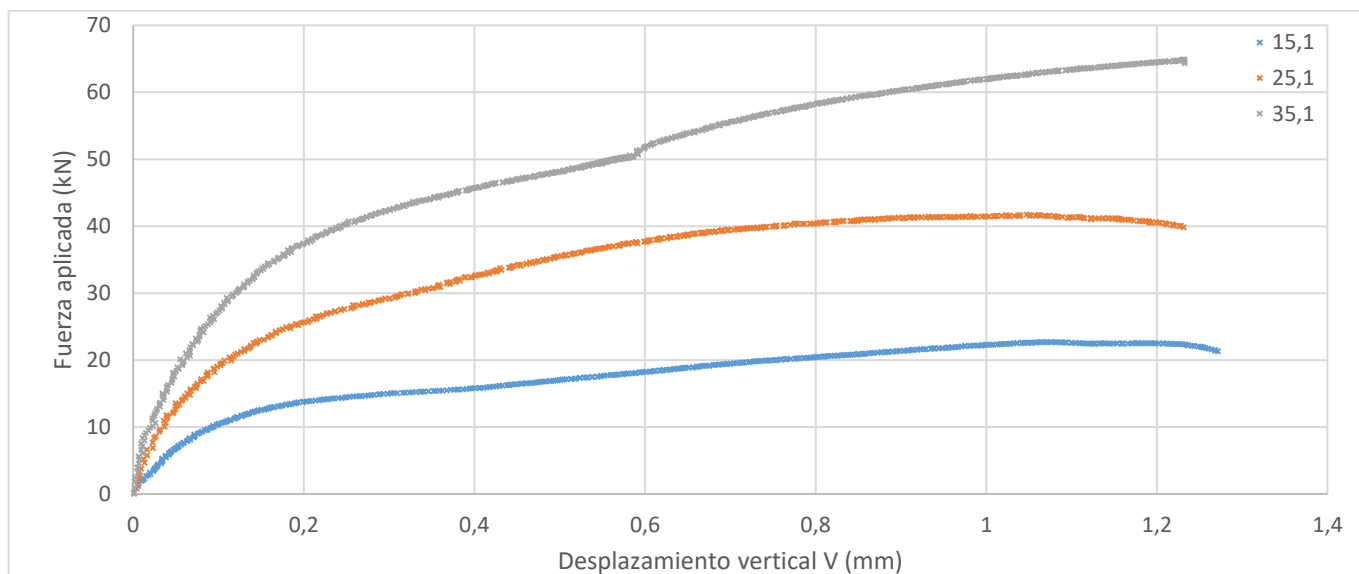


Ilustración 5.2.5.1. Curvas de comportamiento de especímenes con $\lambda \approx 1.04$.

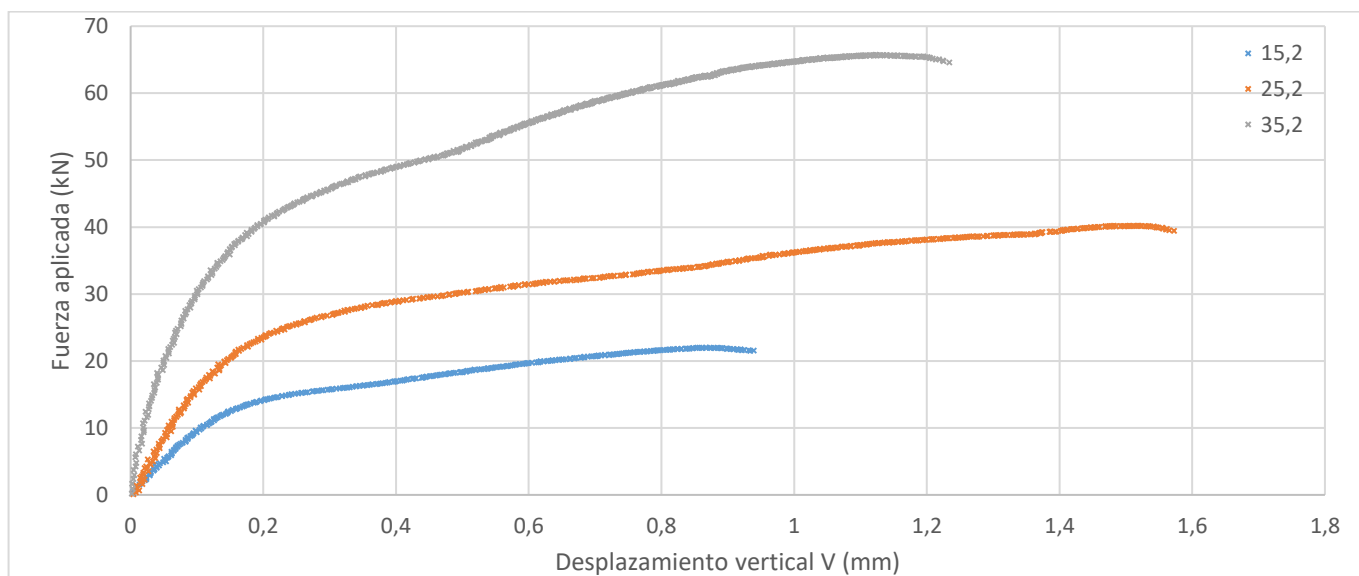


Ilustración 5.2.5.2. Curvas de comportamiento de especímenes con $\lambda \approx 1.12$.

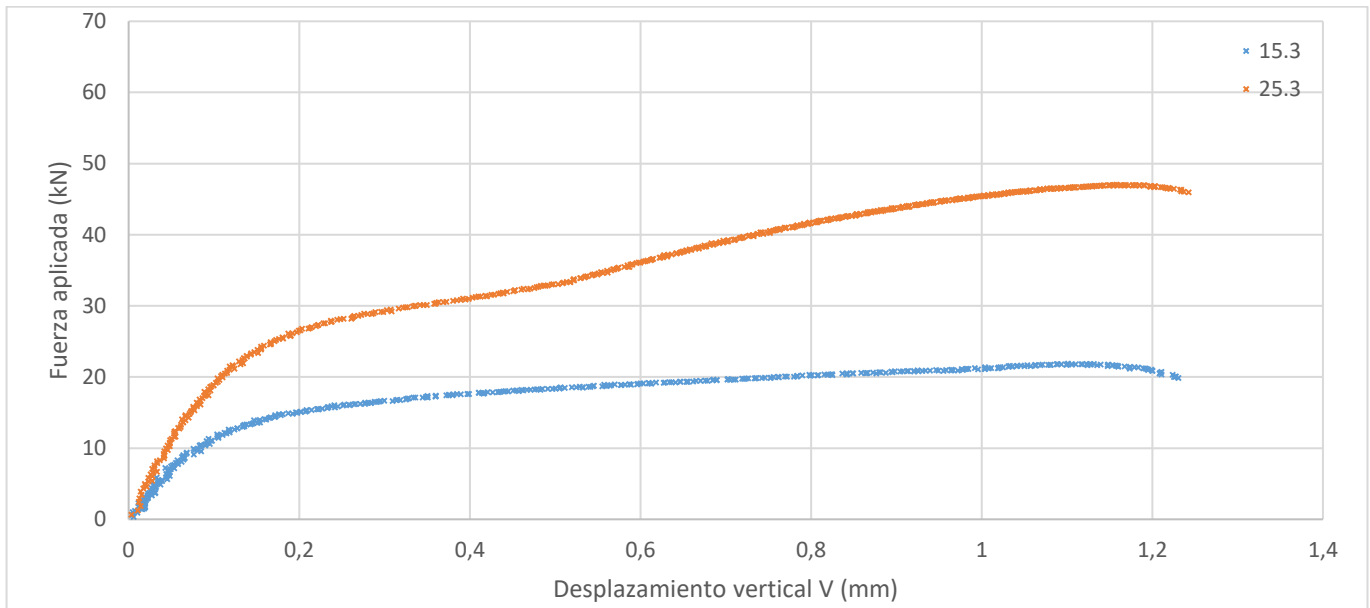


Ilustración 5.2.5.3. Curvas de comportamiento de especímenes con $\lambda \approx 1.25$.

En la mayoría de los especímenes se produce una rotura modo dos, donde el modelo antes de llegar a plastificar en la zona del taladro sufre pérdidas de filetes tanto en el tornillo, como en la tuerca. En la *Ilustración 5.2.5.5* pueden verse en detalle estos efectos.



Ilustración 5.2.5.4. Tornillos de los especímenes después de los ensayos.



Ilustración 5.2.5.5. Tornillo y tuerca del modelo 25.2 después del ensayo.

5.2.6 Resistencia, rigidez y capacidad de rotación

Los valores teóricos que resiste cada modelo se calcularon usando las ecuaciones establecidas en el Eurocódigo para el modo de fallo que sufre cada espécimen. Para seleccionar el valor experimental no hay un criterio claro que defina el valor límite de resistencia. Se propone como alternativa usar el criterio de Von-Mises, seleccionando el valor de la fuerza de la primera imagen donde el valor de la deformación de Von-Mises supera el valor de la deformación correspondiente al límite elástico del material. La siguiente tabla presenta la resistencia de cada modelo tanto experimental como teórica y su diferencia porcentual.

	Experimental (kN)	Teórica (kN)	Diferencia
15.1	16,43	15,48	5,79%
15.2	15,18	17,37	-14,41%
15.3	13,43	18,00	-34,02%
25.1	34,99	30,20	13,69%
25.2	30,26	31,03	-2,54%
25.3	32,46	31,70	2,34%
35.1	47,21	45,91	2,75%
35.2	49,66	47,27	4,82%
Diferencia media			10,04%
Desviación			10,83%

Tabla 5.2.6.1. Resistencias teóricas y experimentales de los modelos T-Stub.

Para calcular los valores de la rigidez teóricos se usó la ecuación [2.2.4.1] del Eurocódigo presentadas en el apartado 2.2.4. Para la determinación de la rigidez experimental se hizo una regresión lineal en la zona inicial de la curva fuerza-

desplazamiento, mientras está presente una tendencia lineal, para cada uno de los modelos. Se obtiene así la siguiente tabla:

	Experimental (kN/mm)	Teórica (kN/mm)	Diferencia
15,1	71,67	67,24	6,18%
15,2	90,73	85,35	5,93%
15,3	112,42	92,24	17,95%
25,1	138,81	142,00	-2,30%
25,2	161,88	150,03	7,32%
25,3	175,95	154,90	11,97%
35,1	220,12	215,40	2,15%
35,2	225,76	226,27	-0,22%
Diferencia media			6,75%
Desviación			5,83%

Tabla 5.2.6.2. Rigidez teórica y experimental de los modelos T-stub.

La capacidad de rotación es el valor del desplazamiento máximo que es capaz de soportar una unión. Su valor experimental se determina con el último valor de deformación de la curva fuerza-desplazamiento. Según la norma, cuando la falla del modelo se produce en el tornillo, la capacidad de rotación será el producto de la longitud de elongación del tornillo y la deformación última del acero del tornillo. Se obtiene la siguiente tabla:

Cap. De Rotación	Exp. (mm)	EC3 (mm)
15.1	1,24842	16,7018
15.2	0,9387	16,7018
15.3	1,22731	16,7018
25.1	1,23137	17,2874
25.2	1,57239	17,2874
25.3	1,24231	17,2874
35.1	1,23241	16,1284
35.2	1,23382	16,1284

Tabla 5.2.6.3. Capacidad de rotación teórica y experimental de los modelos T-Stub.

Como se puede apreciar, los valores experimentales difieren una cantidad significativa de los valores establecidos en la norma debido a que el fallo no se produjo por los tornillos en sí. Durante todos los ensayos tenemos presente un modo de fallo dos, donde la falla de los tornillos se produce por perdidas de filete, tanto del tornillo como de la tuerca.

6. Conclusiones y trabajos futuros

6.1 Conclusiones académicas

En primer lugar, destacar que los objetivos didácticos planteados se han alcanzado casi en su totalidad.

- Se ha llevado a cabo un estudio bibliográfico para documentar el trabajo en el cual se ha aprendido a seleccionar información relevante para el mismo.
- La planificación y desarrollo de un programa experimental para llevar a cabo los ensayos de la forma más ordenada posible.
- Aprendizaje y noción del potencial de la técnica DIC.

Además de lo mencionado anteriormente, en el desarrollo de un programa experimental pueden surgir problemas difíciles de predecir. Esto lleva a la necesidad de resolverlos sobre la marcha lo que hace mejorar la capacidad de adaptación y resolución de problemas aprovechando todos los recursos disponibles.

6.2 Conclusiones técnicas

La correlación digital de imágenes (DIC), tiene mucho potencial para analizar y predecir el comportamiento en una unión estructural. que podría usarse para otros ámbitos dentro de la ingeniería.

Como se ve en las *figuras Ilustración 4.2.4.1.3. Curva tensión-deformación del alma obtenida por DIC y galga para el modelo 15.1., Ilustración 4.2.4.1.4. Curva tensión-deformación del alma obtenida por DIC y galga para el modelo 25.2. y Ilustración 4.2.4.1.5. Curva tensión-deformación del alma obtenida por DIC y galga para el modelo 35.2.* las lecturas proporcionadas por correlación digital de imágenes se adaptan mejor a las que proporcionan las galgas. Esto es debido a que para cada modelo se aprovechó mejor la resolución de la cámara. Obteniéndose así, unas deformaciones con menos ruido y por tanto más próximas al comportamiento real. En todo caso, ambas técnicas (extensometría y DIC) proporcionan resultados fiables, siendo más sencilla la utilización del DIC que además es una técnica no intrusiva y de campo completo.

Como ya se podía intuir, los modelos tienen algunos defectos geométricos. El alma en algunos especímenes no se soldó en el centro del ala exacto, los espesores de garganta de soldadura son algo irregulares, lo que sumado a los defectos que puedan tener los materiales en su fabricación hacen que los modelos no sean

simétricos. Este hecho se puede apreciar tanto en los campos de desplazamientos verticales, como en los de deformaciones.

El modelo bilineal establecido en la norma europea se adapta bien en la primera etapa de la curva fuerza-desplazamiento, incluso en parte de la segunda. Sin embargo, cuando se alcanzan altos valores de fuerza, el comportamiento de la norma se distancia del comportamiento real.

Al calcular la situación de las rótulas plásticas de los modelos (*Tabla 5.2.2.1. Situación de rótulas plásticas.*) y compararlos con los modos de fallo establecidos en el Eurocódigo se obtiene un error inferior al 2.5 %. Podemos concluir pues, que la localización de las mismas queda bien definida con el criterio del 80% de la unión entre el ala y el alma que se propone en la norma europea.

Como se puede apreciar en las curvas de comportamiento para un mismo λ , la resistencia y la rigidez aumentan significativamente para un aumento de ancho efectivo (l_{ef}). Sin embargo, la capacidad de rotación alcanza valores próximos. Se asume entonces que la capacidad de rotación depende, en mayor medida, de la configuración de n y m .

6.3 Futuras trabajos y líneas de investigación.

Durante el desarrollo del trabajo se han observado comportamientos que pueden tener cierta influencia en el comportamiento del modelo T-stub y que sería interesante ver su repercusión real.

En concreto, estudiar más a fondo la influencia de ambos tornillos, tanto de la cabeza como del esparrago y como puede influir que el hecho de que los tornillos se curven.

Para complementar el trabajo hubiese sido importante estudiar la concentración de tensiones que se produce alrededor de los agujeros del tornillo, así como los mapas de desplazamientos y deformaciones en torno a él.

7. Bibliografía

1. **European Committee for Standardization.** *Eurocode 3: Design of steel structures - Part1-8: Desing of joints. prEN 1993-1-8:2003 E.* December, 2003.
2. **Universitat politécnica de Catalunya.** *Manual de diseño para acero inoxidable estructural.* Cuarta edición. 2017.
3. **T.C. Chu, W.F. Ranson, M.A. Sutton and W.H. Peters.** *Applications of Digital-Image-Correlation Techniques to Experimental Mechanics.* s.l. : Experimental Mechanics, Septiembre, 1985.
4. **Ministerio de Fomento.** *EAE, Instrucción de Acero Estructural.* s.l. : Gobierno de España, 2011.
5. **Ranson, W. H. Peters and W. F.** *Digital Imaging techniques in experimental stress analysis.* Columbia : University of South Carolina, 1982.
6. **Alvarez, Daniel Carazo.** *Estudio de uniones T-stub en estructuras metalicas utilizando métodos opticos para la medida de tensiones y deformaciones.* Universidad de Jaen : s.n., 2012.
7. **P.F. Luo, Y.J. Chao, M.A. Sutton and W.H. Peters, III.** *Accurate Measurement of Three-dimensional Deformations in Deformable and Rigid Bodies Using Computer Vision.* s.l. : Experimental Mechanics, June, 1993.
8. **H. Yuah, M. Theofanous and Lu Yang.** *Experimental behaviour of stainless steel bolted T-stub connections under monotonic loading.* s.l. : Journal of Constrctional Steel Research, 2019.
9. **Bing Pan, Kemao Quian, Huimin Xie and Anand Asundi.** *Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a reviuw.* s.l. : Measurement Science and Technology, 2009.
10. **Jaspart, Jean-Pierre.** *Etue de la semi-rigidite des noeuds potre-colonne et son influence sur la resistance et la stabilite des ossatures en acier.* s.l. : Mecanique des structures, 1991.
11. **Una Norma Española. UNE-EN ISO, 6892-1.** *Materiales metálicos. Ensayo de tracción. Parte 1: Método de ensayo a temperatura ambiente.* Espña : Asociación Española de Normalización y Certificación, Abril 2010.
12. **Michael A. Sutton, Stephen R. Mcneill, Jeffrey D. Helm and Yuh J. Chao.** *Advances in Two-Dimensional and Three-Dimensional Computer Vision.* Columbia, USA : University of South Carolina, 2000.
13. **C. Faella, V. Piluso, G. Rizzano.** *Structual steel semirigid connections. Theory.* 1999.

14. **Una Norma Española.** *Acero y productos de acer. Localización y preparacion de muestras y probetas para ensayos mecánicos.* UNE-EN ISO 377:1988. s.l. : Aenor, Noviembre, 2013.

15. **Correlated Solutions.** *User guide Vic-2d.* 2013.

16. **INOX. IBERICA, S.A.** *Tornilleria inoxidable.* s.l. : Inoxiber.