



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior de Jaén

Trabajo Fin de Grado

ESTUDIO EXPERIMENTAL Y NUMÉRICO DE UNIONES ESTRUCTURALES FABRICADAS MEDIANTE IMPRESIÓN 3D

Alumna: Beatriz Aranda Martínez

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

Septiembre, 2019



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

Don DANIEL CARAZO ÁLVAREZ , tutor del Proyecto Fin de Carrera titulado:
ESTUDIO EXPERIMENTAL Y NUMÉRICO DE UNIONES ESTRUCTURALES
FABRICADAS MEDIANTE IMPRESIÓN 3D, que presenta BEATRIZ ARANDA
MARTÍNEZ, autoriza su presentación para defensa y evaluación en la Escuela
Politécnica Superior de Jaén.

Jaén, Septiembre de 2019

El alumno:

Beatriz Aranda Martínez

El tutor:

Daniel Carazo Álvarez

Índice

1. INTRODUCCIÓN.....	15
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.	16
2.1. Fabricación aditiva. Impresión 3D.....	16
2.1.1. Introducción.	16
2.1.2. Historia.	16
2.1.3. Cómo se desarrolla la fabricación aditiva.....	18
2.1.4. Algunos tipos de fabricación aditiva.	18
2.2. Uniones estructurales y modelo Tstub.....	23
2.2.1 Introducción.	23
2.2.2. Conceptos generales.	23
2.2.3. Tipos de uniones.....	24
2.2.4. Uniones Viga-Pilar.	25
2.2.5. Modelo Tstub.	36
2.3. Correlación digital de imágenes DIC.....	40
2.3.1. Introducción.	40
2.3.2. Historia.	41
2.3.3. Principios del DIC 2D.....	42
2.3.4. Desarrollo experimental.	42
2.4. Análisis numérico mediante elementos finitos.....	43
2.4.1. Introducción.	43
2.4.2. Estudios previos de elementos finitos en uniones Tstub.	45
3. OBJETIVOS.	46
4. PROGRAMA EXPERIMENTAL.	48
4.1. Objetivo.	48
4.2. Diseño de la fase experimental.....	48
4.3. Fase I experimental. Caracterización mecánica.....	49
4.3.1. Normativa Fase I.....	49
4.3.2. Dimensiones de las probetas y direcciones de impresión.	49
4.3.3. Materiales utilizados.	55
4.3.4. Características de la máquina de fabricación aditiva empleada.	58

4.3.5. Características del ensayo a tracción y maquinaria.	60
4.3.6. Medidas y diseño CAD de las probetas 1BA.	64
4.3.7. Desarrollo de la fase de impresión en Smart Materials 3D.	70
4.3.8. Resultados de caracterización del material.	72
4.4. Fase II experimental. Tstub.	74
4.4.1. Normativa fase II.	74
4.4.2. Diseño de las Tstub. Dimensiones, ensayo de tracción y útiles.	74
4.4.3. Fabricación de las Tstub.	79
4.4.4. Obtención de resultados experimentales. Tstub.	81
5. ANÁLISIS NUMÉRICO. SIMULACIONES EN ELEMENTOS FINITOS.	82
5.1. Descripción del modelo.	82
5.2. Descripción del modelo.	82
5.2.1. Elementos.	82
5.2.2. Mallado.	83
5.2.3. Geometría.	84
5.2.4. Boundary conditions.	85
5.3. Simulaciones realizadas.	88
5.3.1. Tstub ABS.	89
5.3.2. Tstub PLA.	91
5.3.3. Simulaciones realizadas con PA CF y PET CF.	92
6. ANÁLISIS DE RESULTADOS.	96
6.2.1. Curvas de las probetas 1BA-PA CF.	99
6.2.2. Curvas de las probetas 1BA-PET CF.	100
6.2.3. Curvas medias Tensión- Deformación probetas tipo hueso.	102
6.2.4. Análisis de resultados de la caracterización del material.	106
6.2.4. Gráficas para obtener el coeficiente de Poisson.	108
6.3. Resultados Fase II experimental. Probetas Tstub.	112
6.3.1. Curvas Fuerza-Desplazamiento probetas Tstub PA CF.	112
6.3.2. Curvas Fuerza-Desplazamiento probetas Tstub PET CF.	114
6.3.3. Análisis de resultados de las curvas experimentales F- Δ	115
6.3.4. Rigidez, resistencia y modos de fallo de las probetas Tstub de PA CF y PET CF.	117

6.3.5. Comparativas de la curva Fuerza-Desplazamiento entre el estudio experimental, la norma (EC3) y la simulación numérica.....	123
6.3.6. Distintas comparativas respecto a la longitud efectiva de las probetas Tstub.	138
6.3.7. Localización de las rótulas plásticas.	142
6.4. Mapas de desplazamiento.....	158
6.4.1. Mapas de desplazamiento de ABS y PLA.....	158
6.4.2. Mapas de desplazamiento de PA CF y PET CF.....	161
7. CONCLUSIONES.....	165
8. PROPUESTAS PARA TRABAJOS FUTUROS.....	166
9. BIBLIOGRAFÍA.....	167
10. ANEXO I. VIC 2D.....	170
11. ANEXO II. PLANOS.....	174
PLANO nº1: Medidas probetas Tipo Hueso 1BA.....	174
PLANO nº2: Diseño T-stub.....	174

Índice de figuras

Figura 1. Estereolitografía (SLA). [36].....	19
Figura 2. Digital Light Processing (DLP) [38]	20
Figura 3. Multijet Modeling (MJM) [40]	20
Figura 4. Selective Laser Sintering (SLS) [42].....	21
Figura 5. Selective Laser Melting (SLM) [43]	21
Figura 6. Concepto de unión según el Eurocódigo 3. [2].....	24
Figura 7. Distintos tipos de uniones en una estructura. [2].....	25
Figura 8. Unión rígida viga-pilar. [2]	26
Figura 9. Unión semirígida viga-pilar.[2].....	26
Figura 10. Unión articulada viga-pilar. [2].....	27
Figura 11. Clasificación de las uniones según la rigidez.[2]	28
Figura 12. Curva Momento-Rotación de una unión viga-pilar. [2].....	28
Figura 13. Gráfica representativa de los tipos de uniones según su resistencia. [2].....	30
Figura 14. Unión angular o chapa simple al alma de la viga. [2]	30
Figura 15. Unión con dos angulares al alma de la viga. [2]	31
Figura 16. Unión con chapa de testa parcial. [2]	31

Figura 17. Unión con angulares a las alas de la viga. [2]	32
Figura 18. Unión con angulares a las alas y al alma de la viga. [2]	32
Figura 19. Unión con chapa de testa extendida. [2]	33
Figura 20. Unión con chapa de testa enreusada. [2]	33
Figura 21. Unión con perfiles en T. [2]	34
Figura 22. Perfil T-stub. Dimensiones. [2]	37
Figura 23. Rótulas plásticas que aparecen en el modelo T-stub. [2]	38
Figura 24. Modo de fallo I. [2]	39
Figura 25. Modo de fallo II. [2]	39
Figura 26. Modo de fallo III. [2]	40
Figura 27. Cámara Basler usada para los ensayos de DIC.	43
Figura 28. Tstub simulada mediante elementos finitos.	45
Figura 29. Probeta tipo 1A y 1B según norma ISO 527-2.	50
Figura 30. Dimensiones de probetas tipo 1A y 1B según norma ISO 527-2.	50
Figura 31. Pieza fabricada mediante impresión 3D con efecto warping. [20]	51
Figura 32. Impresora 3D con cubierta para controlar la temperatura. [21]	52
Figura 33. Probeta Tipo 1BA y 1BB según norma ISO 527-2.	52
Figura 34. Geometría Probeta Tipo 1BA y 1BB según norma ISO 527-2.	53
Figura 35. Direcciones de simetría según norma UNE 116005-2012.	53
Figura 36. Probeta tipo 1A. Posición horizontal.	54
Figura 37. Probeta tipo 1A. Posición de canto.	54
Figura 38. Probeta tipo 1A. Posición vertical.	55
Figura 39. Rollo de hilo de Poliamida con fibra de carbono. [22]	56
Figura 40. Piezas fabricadas de Poliamida con fibra de carbono. [22]	56
Figura 41. Rollo de hilo de PET con fibra de carbono. [23]	57
Figura 42. Piezas fabricadas de PET con fibra de carbono. [23]	57
Figura 43. Tabla comparativa entre distintos materiales con fibra de carbono. [23]	57
Figura 44. Impresora Ultimaker 2+ de la empresa Smart Materials 3D.	58
Figura 45. Impresora DT LITE de Smart Materials 3D.	60
Figura 46. Curvas típicas de esfuerzo/deformación de distintos materiales.	61
Figura 47. Equipo del laboratorio para ensayo a tracción.	61
Figura 48. Mordaza (izquierda) y base o soporte (derecha) de acero para ensayos.	62
Figura 49. Velocidades de ensayo recomendadas.	62

Figura 50. Realización de los ensayos durante la fase I experimental.	64
Figura 34. Geometría Probeta Tipo 1BA y 1BB según norma ISO 527-2.	65
Figura 51. Diseño CAD Probeta tipo 1BA.	66
Figura 52. Simulación de impresión con Software Cura. Probetas tipo 1BA.	67
Figura 53. Vista previa del relleno de las probetas 1BA.	69
Figura 54. Sede de Smart Materials 3D, en Alcalá la Real (Jaén).....	70
Figura 55. Impresora DT LITE durante la impresión de las probetas de la fase I en todas las direcciones.	71
Figura 56. Probeta tipo hueso y extensómetro en Vic 2D.	72
Figura 57. Probetas tipo hueso una vez ensayadas.....	73
Figura 58. Curvas medias de caracterización de PA CF.	73
Figura 59. Curvas medias de caracterización de PET CF.	74
Figura 22. Perfil Tstub. Dimensiones. [2]	75
Figura 48. Mordaza (izquierda) y base o soporte (derecha) de acero para ensayos.	77
Figura 60. Base o soporte de acero para ensayos de la fase II.....	77
Figura 61. Tornillo, tuerca y arandela utilizados para el ensayo.	78
Figura 62. Proceso de pintar las probetas para la realización del ensayo.	78
Figura 63. Colocación de la probeta T-stub en la máquina para realizar el ensayo.....	79
Figura 64. Diseño CAD de las probetas Tstub de 35, 25 y 15 mm de ancho.	79
Figura 65. Simulación Software Cura Tstub.....	80
Figura 66. Probetas Tstub para Fase II experimental en el laboratorio.	80
Figura 67. Mallado de una Tstub en Vic 2D.	81
Figura 68. Partes del modelo Tstub <i>para Abaqus</i> . Perfil, tornillo y placa (de izquierda a derecha).	83
Figura 69. Mallado modelo Tstub para simulación.	84
Figura 70. Definición de las variables el modelo en el código Phytón.	84
Figura 71. Assembly del modelo Tstub en Abaqus.	85
Figura 72. Modelo simplificado de la Tstub. [16]	85
Figura 73. Profile symmetry L boundary condition.	86
Figura 74. Profile symmetry web boundary condition.	87
Figura 75. Load application boundary condition.....	87
Figura 76. Bolt symmetry shank boundary condition.....	88
.....	89

Figura 77. Simulación Abaqus ABS 15 mm.	89
Figura 78. Simulación Abaqus ABS 25 mm.	90
Figura 79. Simulación Abaqus ABS 35 mm.	90
Figura 80. Simulación Abaqus PLA 15 mm.	91
Figura 81. Simulación Abaqus PLA 25 mm.	91
Figura 82. Simulación Abaqus PLA 35 mm.	92
Figura 83. Simulación Abaqus PA CF 15.3.	92
Figura 84. Simulación Abaqus PA CF 25.2.	93
Figura 85. Simulación Abaqus PA CF 35.2.	93
Figura 86. Simulación Abaqus PET CF 15.2.	94
Figura 87. Simulación Abaqus PET CF 25.2.	94
Figura 88. Simulación Abaqus PET CF 35.2.	95
Figura 89. Curva tensión-deformación probetas tipo hueso PA CF-H.	99
Figura 90. Curva tensión-deformación probetas tipo hueso PA CF-V.	99
Figura 91. Curva tensión-deformación probetas tipo hueso PA CF-C.	100
Figura 92. Curva tensión-deformación probetas tipo hueso PET CF-H.	100
Figura 93. Curva tensión-deformación probetas tipo hueso PET CF-V.	101
Figura 94. Curva tensión-deformación probetas tipo hueso PET CF-C.	101
Figura 95. Curvas tensión-deformación medias de las probetas tipo hueso PA CF.	103
Figura 96. Curvas tensión-deformación medias de las probetas tipo hueso PET CF.	105
Figura 97. Comparativa de tensión de rotura entre PA CF y PET CF, en las tres direcciones de impresión.	107
Figura 98. Curva para determinar el coeficiente de Poisson PA CF H.	108
Figura 99. Curva para determinar el coeficiente de Poisson PA CF H.	108
Figura 101. Curva para determinar el coeficiente de Poisson PA CF C.	109
Figura 102. Curva para determinar el coeficiente de Poisson PET CF H.	110
Figura 103. Curva para determinar el coeficiente de Poisson PET CF V.	111
Figura 104. Curva para determinar el coeficiente de Poisson PET CF C.	111
Figura 105. Curva Fuerza- Desplazamiento de las probetas Tstub PA CF de 15 mm de ancho.	112
Figura 106. Curva Fuerza- Desplazamiento de las probetas Tstub PA CF de 25 mm de ancho.	113
Figura 107. Curva Fuerza- Desplazamiento de las probetas Tstub PA CF de 35 mm de ancho.	113

Figura 108. Curva Fuerza- Desplazamiento de las probetas T-stub PET CF de 15 mm de ancho.....	114
Figura 109. Curva Fuerza- Desplazamiento de las probetas T-stub PET CF de 25 mm de ancho.....	114
Figura 110. Curva Fuerza- Desplazamiento de las probetas Tstub PET CF de 35 mm de ancho.....	115
Figura 111. Modos de rotura de las T-stub de PA CF de 15 mm de ancho.	118
Figura 112. Modos de rotura de las T-stub de PA CF de 25 mm de ancho.	118
Figura 113. Modos de rotura de las T-stub de PA CF de 35 mm de ancho.	119
Figura 114. Modos de rotura de las T-stub de PET CF de 15 mm de ancho.	119
Figura 115. Probeta T-stub 15.1 donde se aprecia el modo de fallo I.	120
Figura 116. Modos de rotura de las T-stub de PET CF de 25 mm de ancho.	120
Figura 117. Modos de rotura de las T-stub de PET CF de 35 mm de ancho.	121
Figura 118. Ccparativa de Fuerza máxima en función de la longitud efectiva para todos los materiales.....	123
Figura 120. Curva Fuerza-Desplazamiento PA CF 15 mm.....	127
Figura 121. Curva Fuerza-Desplazamiento PA CF 25 mm.....	127
Figura 122. Curva Fuerza-Desplazamiento PA CF 35 mm.....	128
Figura 123. Curva Fuerza-Desplazamiento PET CF 15 mm	128
Figura 124. Curva Fuerza-Desplazamiento PET CF 15 mm.	129
Figura 125. Curva Fuerza-Desplazamiento PET CF 35 mm.	129
Figura 126. Procedimiento para graficar el desplazamiento de la simulación en Abaqus.	130
Figura 127. Comparativa curva Desplazamiento-Tiempo entre DIC y simulación numérica PA CF 15 mm.	131
Figura 128. Comparativa curva Desplazamiento-Tiempo entre DIC y simulación numérica PA CF 25 mm.	132
Figura 129. Comparativa curva Desplazamiento-Tiempo entre DIC y simulación numérica PA CF 35 mm.	132
Figura 130. Comparativa curva Desplazamiento-Tiempo entre DIC y simulación numérica PET CF 15 mm.	133
Figura 131. Comparativa curva Desplazamiento-Tiempo entre DIC y simulación numérica PET CF 25 mm.	133
Figura 132. Comparativa curva Desplazamiento-Tiempo entre DIC y simulación numérica PET CF 35 mm.	134

Figura 133. Comparativa Curva Fuerza-Desplazamiento PA CF 15 mm de longitud efectiva.	134
Figura 134. Comparativa Curva Fuerza-Desplazamiento PA CF 25 mm de longitud efectiva.	135
Figura 135. Comparativa Curva Fuerza-Desplazamiento PA CF 35 mm de longitud efectiva.	135
Figura 136. Comparativa Curva Fuerza-Desplazamiento PET CF 15 mm de longitud efectiva.	136
Figura 137. Comparativa Curva Fuerza-Desplazamiento PET CF 25 mm de longitud efectiva.	136
Figura 138. Comparativa Curva Fuerza-Desplazamiento PET CF 35 mm de longitud efectiva.	137
Figura 139. Desplazamiento de rotura frente a longitud efectiva PA CF.	138
Figura 140. Desplazamiento de rotura frente a longitud efectiva PET CF.	139
Figura 141. Rigidez frente a longitud efectiva PA CF.	140
Figura 142. Rigidez frente a longitud efectiva PET CF.	140
Figura 143. Fuerza máxima resistente teórica frente a longitud efectiva.	141
Figura 144. Imagen de Vic 2D calculando la distancia al centro de la probeta.	142
Figura 145. Rótulas plásticas PA CF 15.1.	143
Figura 146. Rótulas plástica PA CF 15.2.	144
Figura 147. Rótulas plásticas PA CF 15.3.	144
Figura 148. Rótulas plásticas PA CF 25.1.	145
Figura 149. Rótulas plásticas PA CF 25.2.	145
Figura 150. Rótulas plásticas PA CF 25.3.	146
Figura 151. Rótulas plásticas PA CF 35.1.	146
Figura 152. Rótulas plásticas PA CF 35.2.	147
Figura 153. Rótulas plásticas PA CF 35.3.	147
Figura 154. Rótulas plásticas PET CF 15.1 Modo II de fallo.	148
Figura 155. Rótulas plásticas PET CF 15.1 Modo I de fallo.	148
Figura 156. Rótulas plásticas PET CF 15.2 Modo II de fallo.	149
Figura 157. Rótulas plásticas PET CF 15.2 Modo I de fallo.	149
Figura 158. Rótulas plásticas PET CF 15.3.	150
Figura 159. Rótulas plásticas PET CF 25.1.	150
Figura 160. Rótulas plásticas PET CF 25.2.	151

Figura 161. Rótulas plásticas PET CF 25.3.	151
Figura 162. Rótulas plásticas PET CF 35.1.	152
Figura 163. Rótulas plásticas PET CF 35.2.	152
Figura 164. Rótulas plásticas PET CF 35.3.	153
Figura 165. Probeta de 15 mm de ancho justo después de romper y terminar el ensayo.	153
Figura 166. Comparación desplazamientos verticales ABS 15 mm Abaqus (izquierda) / DIC (derecha).	158
Figura 167. Comparación desplazamientos verticales ABS 25 mm Abaqus (izquierda) / DIC (derecha).	159
Figura 168. Comparación desplazamientos verticales ABS 35 mm Abaqus (izquierda) / DIC (derecha).	159
Figura 169. Comparación desplazamientos verticales ABS 35 mm Abaqus (izquierda) / DIC (derecha).	159
Figura 170. Comparación desplazamientos verticales ABS 35 mm Abaqus (izquierda) / DIC (derecha).	160
Figura 171. Comparación desplazamientos verticales ABS 35 mm Abaqus (izquierda) / DIC (derecha).	160
Figura 172. Comparación desplazamientos verticales PA CF 15 mm Abaqus (izquierda) / DIC (derecha).	161
Figura 173. Comparación desplazamientos verticales PA CF 25 mm Abaqus (izquierda) / DIC (derecha).	161
Figura 174. Comparación desplazamientos verticales PA CF 35 mm Abaqus (izquierda) / DIC (derecha).	162
Figura 175. Comparación desplazamientos verticales PET CF 15 mm Abaqus (izquierda) / DIC (derecha).	162
Figura 176. Comparación desplazamientos verticales PET CF 25 mm Abaqus (izquierda) / DIC (derecha).	163
Figura 177. Comparación desplazamientos verticales PET CF 35 mm Abaqus (izquierda) / DIC (derecha).	163

Índice de tablas

Tabla 1. Elementos simples en uniones. [1].....	36
Tabla 2. Dimensiones probetas 1BA.....	65
Tabla 3. Codificación probetas 1BA.	66

Tabla 4. Parámetros de impresión probetas tipo hueso.	69
Tabla 5. Dimensiones T equivalente.	76
Tabla 6. Norma EN 1090-2:2008 para diámetro d	76
Tabla 7. Dimensiones Tornillos.	76
Tabla 8. Tolerancias dimensionales Probetas Fase I de PA con fibra de carbono.	96
Tabla 9. Tolerancias dimensionales Probetas Fase I de PET con fibra de carbono.	97
Tabla 10. Tolerancias dimensionales Probetas Fase II T-stub.	98
Tabla 11. Valores de módulo de Young, límite elástico, tensión última de rotura y deformación última de rotura de las probetas tipo hueso PA CF.	103
Tabla 12. Valores de módulo de Young, límite elástico, tensión última de rotura y deformación última de rotura de las probetas tipo hueso PET CF.	105
Tabla 13. Valores medios de PA CF y PET CF para todas las direcciones de impresión.	106
Tabla 14. Comparativa de propiedades en dirección de impresión horizontal para todos los materiales.	107
Tabla 15. Valor del coeficiente de Poisson en las distintas direcciones de impresión de PA CF.	110
Tabla 16. Valor del coeficiente de Poisson en las distintas direcciones de impresión de PET CF.	112
Tabla 17. Valores de resistencia y rigidez de las probetas T-stub de PA CF.	117
Tabla 18. Valores de resistencia y rigidez de las probetas T-stub de PET CF.	117
Tabla 19. Valores medios experimentales de PA CF y PET CF.	121
Tabla 20. Valores de Fuerza máxima teórica de PA CF y PET CF.	122
Tabla 21. Valores medios experimentales de PLA y ABS.	122
Tabla 22. Valores de $F_{T,Rd}$, en Newtons, calculados según EC3 para el PET FC.	125
Tabla 23. Valores de $F_{T,Rd}$, en Newtons, calculados según EC3 para la PA FC.	125
Tabla 24. Valores de $k_{0,b}$, $k_{0,T}$ y K_0 , en N/mm , calculados según EC3 para PET FC y PA FC.	125
Tabla 25. Alargamiento de rotura respecto a longitud efectiva PA CF.	138
Tabla 26. Alargamiento de rotura respecto a longitud efectiva PET CF.	139
Tabla 27. Rigidez respecto a longitud efectiva PA CF.	139
Tabla 28. Rigidez respecto a longitud efectiva PET CF.	140
Tabla 29. Comparativa localización rótulas plásticas PA CF 15 mm.	156
Tabla 30. Comparativa localización rótulas plásticas PET CF 15 mm.	156

Resumen

La impresión 3D es una tecnología de fabricación que se encuentra en pleno desarrollo y cada vez con más aplicaciones, llegando muy rápidamente a la madurez según la conocida como curva de Gartner, siendo hoy en día una parte muy importante de la Industria 4.0.

Recientemente existe interés por indagar sobre las limitaciones del método en cuanto a la fabricación de elementos y conexiones estructurales.

El cálculo de las uniones, como partes críticas en cualquier estructura, es complejo debido principalmente a la interacción de varios elementos con diferentes materiales y geometrías. En Europa, dicho cálculo se rige por el Eurocódigo 3, que establece métodos simplificados para cuantificar las propiedades de una unión de acero estructural. Lo que queremos comprobar será cómo influye en el comportamiento de la unión el hecho de estar fabricada mediante impresión 3D, puesto que el proceso de fabricación produce ortotropía en el material resultante.

Para este fin estudiaremos unas uniones de elementos estructurales, llamadas Tstub o T equivalente, fabricadas mediante impresión 3D, tanto experimentalmente (empleando para ello el método de correlación digital de imágenes DIC, que permite obtener mapas completos de deformación de diferentes superficies de la unión) como mediante simulaciones numéricas (a través del método de los elementos finitos con el software Abaqus). Principalmente se busca caracterizar el comportamiento de la unión, es decir relacionar la carga aplicada con la deformación obtenida, cuantificar propiedades como resistencia y rigidez, y valorar la repercusión del uso de piezas fabricadas mediante impresión 3D. En este proyecto se cuantificarán las diferencias observadas entre los resultados experimentales y numéricos obtenidos y también con las previsiones de la normativa, incluso con otros modelos de comportamiento propuestos por otros autores.

En resumen, se adquirirán importantes conocimientos sobre uniones estructurales, métodos de correlación digital de imágenes, simulación numérica e impresión 3D.

Abstract

3D printing is a manufacturing technology that is in full development and with more and more applications, reaching very quickly to maturity according to the response of Gartner, being today a very important part of Industry 4.0.

Recently there is interest in investigating the limitations of the method in terms of the fabrication of structural elements and connections.

The calculation of the joints, as critical parts in any structure, is complex due mainly to the interaction of several elements with different materials and geometries. In Europe, this calculation is governed by Eurocode 3, which establishes simplified methods to quantify the properties of a structural steel joint. What we want to check will be how it influences the behavior of the union the fact of being manufactured by 3D printing, since the manufacturing process produces orthotropy in the resulting material.

For this purpose we will study structural elements, called Tstub or T equivalente, manufactured by means of 3D printing, both experimentally (using the DIC digital image correlation method, which allows to obtain complete deformation maps of different surfaces of the union) as through numerical simulations (through the finite element method with the Abaqus software). Mainly we seek to characterize the behavior of the union, that is to say to relate the applied load with the obtained deformation, to quantify properties like resistance and rigidity, and to value the repercussion of the use of pieces manufactured by means of 3D printing. In this project, the observed differences between the experimental and numerical results obtained will be quantified and also with the provisions of the regulations, even with other behavior models proposed by other authors.

In summary, important knowledge about structural bonds, digital image correlation methods, numerical simulation and 3D printing will be acquired.

1. INTRODUCCIÓN.

El estudio de las uniones estructurales pasa por el análisis de las componentes básicas que establece la normativa al respecto [1]. Una componente fundamental en toda unión es la T equivalente o modelo Tstub, el cual ha sido ampliamente analizado para preveer su respuesta mecánica [2-4,16,24,27-29].

En este trabajo se analiza el comportamiento mecánico de modelos Tstub obtenidos mediante fabricación aditiva, tanto experimentalmente mediante la realización de ensayos de resistencia, como numéricamente a través de simulaciones realizadas en elementos finitos.

La principal novedad de este trabajo es el empleo de nuevos materiales reforzados con fibra de carbono, se trata de dos materiales compuestos, combinando las propiedades de un termoplástico base y de la fibra de carbono. No se han encontrado en la bibliografía trabajos similares al desarrollado aquí.

Gracias a la empresa *Smart Materials 3D*, ubicada en nuestra provincia de Jaén, que se dedica al desarrollo y fabricación de nuevos materiales para impresión 3D, podremos utilizar unos filamentos compuestos de Poliamida reforzada con fibra de carbono (en adelante, PA CF) y de Polietileno tereftalato también reforzado con fibra de carbono (en adelante, PET CF), con lo que se espera mejorar las propiedades mecánicas que nos ofrecen los termoplásticos más básicos y comunmente empleados, como son ABS y PLA. Los resultados obtenidos con estos nuevos materiales se comparan con los reflejados en trabajos previos de este Departamento que se obtuvieron con materiales básicos, con el fin de cuantificar la mejora en las propiedades mecánicas.

En definitiva, se persigue conocer si las predicciones de la normativa para uniones estructurales son lo suficientemente certeras en el caso de que la T equivalente se obtenga mediante fabricación aditiva, considerando las propiedades mecánicas de cada material. A tal efecto, se han realizado dos programas

experimentales, uno para la caracterización mecánica de estos nuevos materiales, y otro para analizar el comportamiento de las T equivalentes impresas con ellos.

Como muestra de que la investigación de uniones estructurales fabricadas mediante fabricación aditiva es de gran interés actualmente encontramos la reciente publicación del Volumen 59, Número 6 de la revista *Experimental Mechanics*, donde gran parte del contenido trata sobre este tema.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.

2.1. Fabricación aditiva. Impresión 3D.

2.1.1. Introducción.

Uno de los puntos en los que se basa el presente proyecto será la fabricación aditiva, ya que nuestro estudio consistirá en comprobar si las piezas que estamos ensayando cumplen unos criterios marcados si se fabrican mediante esta técnica, cómo se comportan y qué características tienen.

Por tanto, indagaremos en este campo de la fabricación aditiva. Qué es, cuándo surgió, qué importancia tiene hoy en día o qué tipos de impresión 3D encontramos en la actualidad serán algunos de los puntos a conocer.

2.1.2. Historia.

La fabricación aditiva, fabricación por adición o, más comunmente llamada Impresión 3D, es una nueva técnica de producción donde la unión de materiales se realiza capa a capa para hacer objetos modelados en 3D, consiguiendo hacer piezas bastante más rápido que en otros procesos convencionales de fabricación como puede ser el mecanizado. Estas piezas, que pueden ser de material plástico o metal, tienen un coste menor ya que no se generan desperdicios debido a que se usa el material estrictamente necesario para fabricar la pieza [7].

Esta técnica comenzó llamándose 'Prototyping' , un primer término para referirse a la fabricación por capas, aunque el desarrollo de la misma ha hecho que su nombre fuera cambiando, ya que las tecnologías de hoy en día permiten realizar piezas más complejas que un simple prototipo. Por este motivo hoy la conocemos como Impresión 3D, si nos referimos al uso menos profesional de esta técnica, o Fabricación Aditiva, usado en términos de producción industrial [8].

Hace más de 30 años, en 1986, se encuentran los orígenes de la fabricación aditiva a manos de Chuck Hull, que patenta la Estereolitografía (SLA), primera técnica de impresión 3D que se conoce. Como se ha comentado anteriormente, esta técnica se usaba exclusivamente para la fabricación de prototipos, pero poco después surgen más técnicas como la FDM (Modelado por deposición fundida), ampliando así el alcance de esta técnica [9].

Actualmente, las técnicas de fabricación aditiva suponen una auténtica revolución industrial, ya que nos dan la posibilidad de fabricar todo tipo de piezas, con complejas geometrías con el único límite de la imaginación del diseñador, siendo también más demandadas por el cliente debido a su rápida fabricación [9]. Dadas estas grandes ventajas respecto al resto de procesos convencionales, desde el punto de vista industrial conseguimos reducir el 'time to market' de los diseños, hacer series cortas de producción, reducir costes de montaje y de inversión en utillaje y combinar distintos procesos de fabricación (procesos híbridos) [8].

La aplicación aditiva, hoy en día, tiene incidencia en una multitud de sectores, desde productos de consumo electrónicos pasando por automoción, medicina o aeroespacial. Artículos convencionales para el hogar, juguetes, equipos deportivos y un largo etcétera de modelos de ese tipo es lo más demandado para la fabricación aditiva hoy en día. En automoción es muy usada para la fabricación de prototipos de diseño funcional de componentes. Su uso en medicina se ha convertido en todo un avance, dado que permite obtener modelos en 3D de prótesis, preparación de plantillas y guías quirúrgicas que hacen de la cirugía algo más seguro y rápido. En cuanto al sector Aeroespacial, procesos como la sinterización selectiva de polvo

metálico han conseguido fabricar piezas con altas exigencias de comportamiento mecánico y térmico de utillaje aeronáutico [8].

2.1.3. Cómo se desarrolla la fabricación aditiva.

En primer lugar, al igual que en los demás procesos de fabricación, habrá de diseñar el modelo a realizar. Se realizará un diseño en 3D mediante un software que permita hacerlo, como por ejemplo un modelo CAD con CATIA o mediante Autocad.

Una vez realizado el modelo en 3D se procederá a obtener el archivo .STL (Standard Tessellation Language) del mismo desde el mismo programa con el que se realiza diseño. El modelo .STL lo que hace es transformar en una malla formada únicamente por triángulos el modelo CAD creado [9].

Por último, con un software llamado Cura, se seleccionan los parámetros de impresión tales como la altura de capa o la densidad de relleno. En función de los parámetros seleccionados, Cura simula la impresión y da una estimación del tiempo que se tardaría en fabricar la pieza, así como la cantidad de plástico que se usaría. Una vez hecho esto, se exporta el G-code, un código en formato texto que genera el programa a partir del archivo .STL que se haya creado. La impresora interpreta dicho código y fabrica, capa a capa, la pieza que hayamos diseñado.

2.1.4. Algunos tipos de fabricación aditiva.

Los distintos tipos de fabricación aditiva se podrán distinguir en función de la forma en la que encontremos el material base con el que se está fabricando. Dicho esto, nos encontramos con tres grupos: AM con base líquida, AM con base en polvo y AM con base de láminas o sólida.

- Base líquida

- SLA (Estereolitografía)

Las piezas se obtienen a partir de una resina líquida cuya base es de un polímero orgánico que se solidifica mediante un haz de luz ultravioleta procedente de un láser. El material se va depositando en una plataforma, que se mueve a lo largo del eje vertical en pequeños incrementos dependiendo de la altura de capa definida, a través del láser, que va creando y curando la pieza capa a capa quedando unas pegadas a otras. Se consigue una pieza con excelente acabados dimensional y superficial. [35]

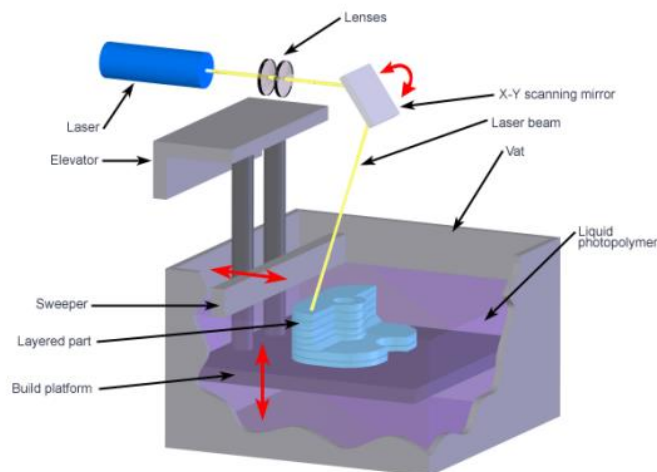


Figura 0. Estereolitografía (SLA). [36]

- DLP (Digital Light Processing)

El proceso de Procesamiento Digital de Luz es muy parecido a la Estereolitografía, dado que ambos usan fotopolímeros y un láser para endurecer la resina. Es capaz de fabricar objetos muy pequeños y la rapidez con la que lo hace es aún mayor que la de la Estereolitografía. [37]

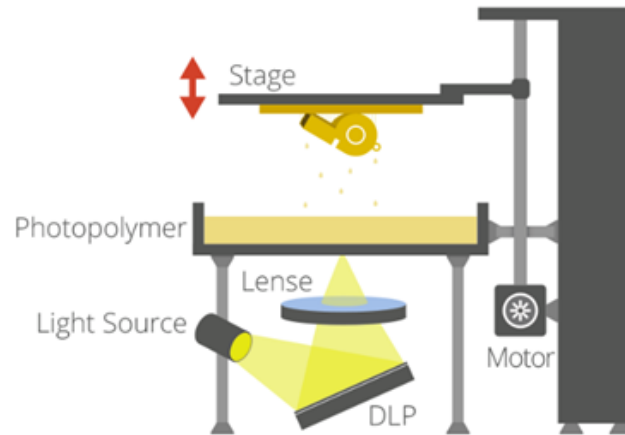


Figura 2. Digital Light Processing (DLP) [38]

- MJM (Multijet Modeling)

El Modelado de Inyección Múltiple, al igual que los dos procesos anteriores, también trabaja con fotopolímeros. En este proceso, un cabezal de impresión con cuatro o más cabezas inyectoras se mueve inyectando el fotopolímero mientras las luces ultravioleta endurecen el material una vez que ya se ha inyectado. El proceso se va repitiendo capa a capa hasta completar la pieza. [39]

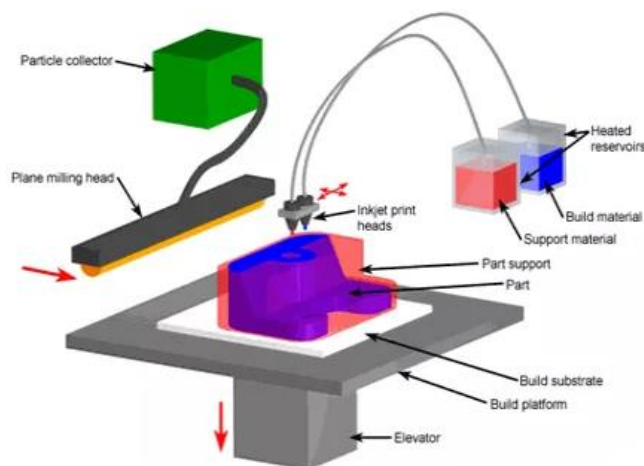


Figura 3. Multijet Modeling (MJM) [40]

- Base en polvo

- SLS (Selective Laser Sintering)

La Sinterización Láser es un proceso mediante el cual se deposita una primera capa de polvo de un material plástico sobre una plataforma caliente donde un láser de alta potencia de CO_2 sinteriza selectivamente, es decir, fusiona dicha capa de polvo. Una vez que se tiene la primera capa, la plataforma se mueve y se vuelve a repetir el proceso hasta que la pieza es terminada. [41]

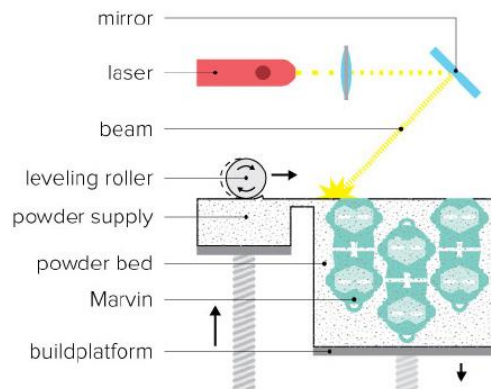


Figura 4. Selective Laser Sintering (SLS) [42]

- SLM (Selective Laser Melting). Fusión selectiva por láser para aleaciones metálicas.

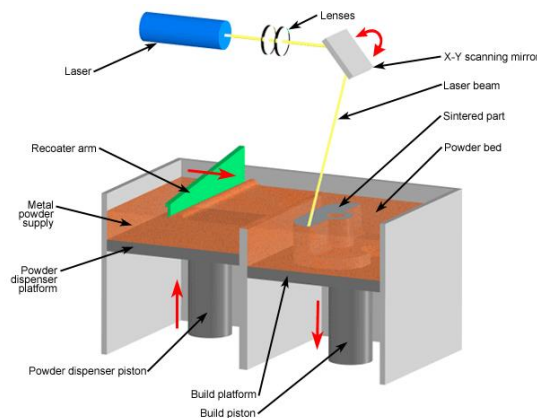


Figura 5. Selective Laser Melting (SLM) [43]

- Base de láminas o sólida

• FDM (Fused Deposition Modeling):

El modelado por deposición fundida es una técnica de impresión en el que la pieza se imprime en una placa o cama de impresión, que se encuentra a una temperatura determinada, donde el material se aporta mediante un extrusor o boquilla. El material se tiene en forma de filamento y se va aportando hacia la cabeza de extrusión, donde se funde y se deposita en la placa de impresión [10].

Para poder imprimir mediante esta técnica, en primer lugar siempre se deberá realizar un modelo en 3D mediante un software de diseño CAD, como puede ser Catia. A continuación, se debe generar un archivo .STL, del cual se necesita dividir en varias capas usando algún tipo de software llamado *licer*, desde donde se definen todos los parámetros de impresión [10].

El primer paso para imprimir es calentar la máquina hasta una temperatura elevada, que dependerá del material que se esté usando. Una vez alcanzada esa temperatura, se extruye el filamento de hilo por la cabeza de impresión, que se mueve en las tres direcciones principales gracias al cabezal en el que está colocado, y se va depositando en la placa. Cuando se coloca la primera capa de material, el cabezal de impresión se eleva una altura igual al espesor seleccionado y se vuelve a aplicar otra capa de material. El mismo proceso continúa hasta que se termina de imprimir toda la pieza, que finalmente se enfría y se endurece [10].

Esta técnica es compatible con una amplia variedad de materiales. Los más utilizados son polímeros termoplásticos como el PLA y el ABS, pero también ofrece la posibilidad de usar materiales compuestos con base metálica, como serán los materiales que analicemos en el presente proyecto.

Pese a su buenos resultados de postprocesado, aún no se tienen los mismos acabados que con técnicas como la estereolitografía o sinterización láser, pero por otro lado, algunas de sus ventajas son el bajo coste y la facilidad de uso. Sus

principales aplicaciones hoy en día son el prototipado rápido o la pequeña producción en serie [10].

La técnica de FDM será la utilizada para la impresión de las piezas que se ensayarán en este proyecto, dado a que nos da la facilidad de imprimir con materiales compuestos con una base de fibra de carbono.

2.2. Uniones estructurales y modelo Tstub.

2.2.1 Introducción.

En esta sección investigaremos acerca de las uniones atornilladas en la edificación, indagaremos en el Eurocódigo 3 [1] (norma que rige las uniones estructurales) para contemplar los distintos conceptos a tener en cuenta a la hora de realizar una unión estructural y especialmente nos centraremos en el estudio de una unión en concreto, la Tstub, la cual vamos a ensayar en el presente proyecto.

2.2.2. Conceptos generales.

En una estructura, una unión es una zona donde dos o más elementos se conectan entre sí. Hoy en día es muy común hacer este tipo de uniones mediante soldadura dado a que es más sencillo, sin embargo, no siempre se podrá usar soldadura y se tendrá que hacer uso de tornillos, con lo que se conocen como uniones atornilladas [11].

Cabe destacar que cuando hablamos del concepto “unión” estamos analizando tanto el alma de la columna como los elementos de unión entre la columna y la viga. Es así debido a que a la hora de analizar el comportamiento de la unión estructural englobamos todo ello, ya que afecta conjuntamente [2].

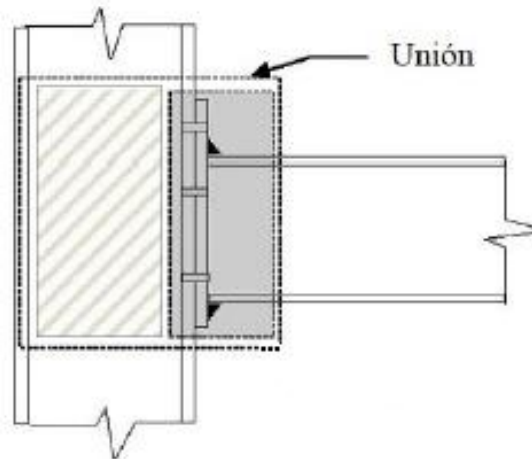


Figura 6. Concepto de unión según el Eurocódigo 3. [2]

En una construcción de una estructura, lo que se pretende es enlazar elementos simples entre sí, fijándolos mediante estas uniones para obtener la estructura final. Lo que hace la unión es transmitir la carga de unos perfiles a otros. Las uniones serán puntos críticos en toda estructura, por lo tanto es necesario calcularlas de forma precisa dado que se pueden producir accidentes si no se han diseñado o ejecutado correctamente [12].

Las uniones atornilladas es una técnica de enlace que ha vuelto con fuerza al campo de las construcciones de estructuras metálicas hace relativamente poco tiempo. Dichas uniones se realizan con tornillos de una muy alta resistencia y, junto con la soldadura, es uno de los medios para uniones más usados en la actualidad.

El modelo Tstub, que estudiaremos en el presente proyecto, es una simplificación para el estudio y diseño de estas uniones estructurales.

2.2.3. Tipos de uniones.

El hecho de que una estructura esté compuesta por una gran variedad de elementos diferentes con las uniones pasará lo mismo. Habrá tantas uniones distintas como sean necesarias para unir todas las combinaciones entre elementos

que tengamos en la estructura. Es por ello que las uniones se dividen en distintos tipos.

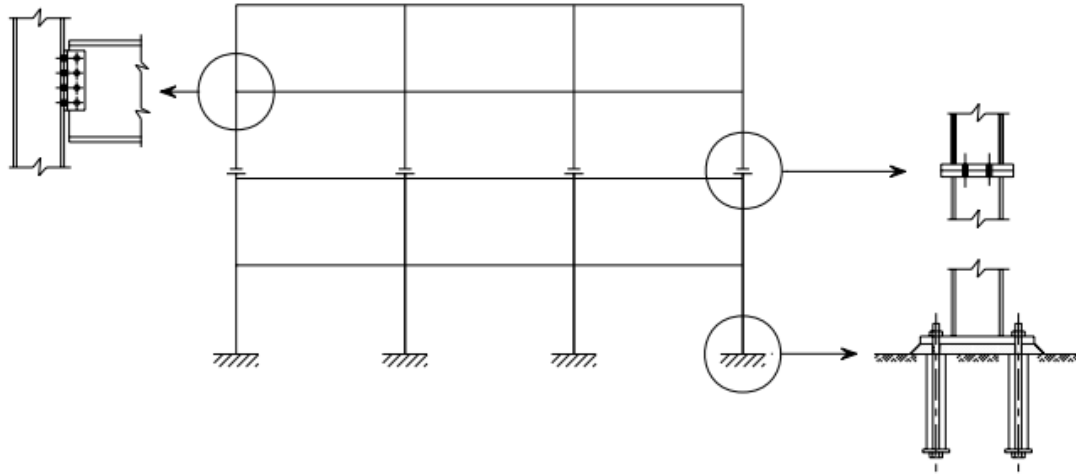


Figura 7. Distintos tipos de uniones en una estructura. [2]

En una edificación podremos encontrarnos con los siguientes tipos de uniones:

- Uniones viga a viga.
- Uniones viga a pilar.
- Empalme de pilares.
- Bases de pilar.
- Uniones a los arriostramientos.

2.2.4. Uniones Viga-Pilar.

En primer lugar, veremos como se clasifican este tipo de uniones viga-pilar. Una de las clasificaciones más comunes para las uniones es según su rigidez. Podremos encontrar tres tipos: unión rígida, semirígida y articulada.

Las uniones rígidas se caracterizan por mantener el ángulo que forman las distintas partes cuando produce un esfuerzo, es decir, que se transmiten todo el

momento flector entre ellas. Por tanto, el giro del nudo de la unión es igual al giro de los componentes que están unidos a el mismo.

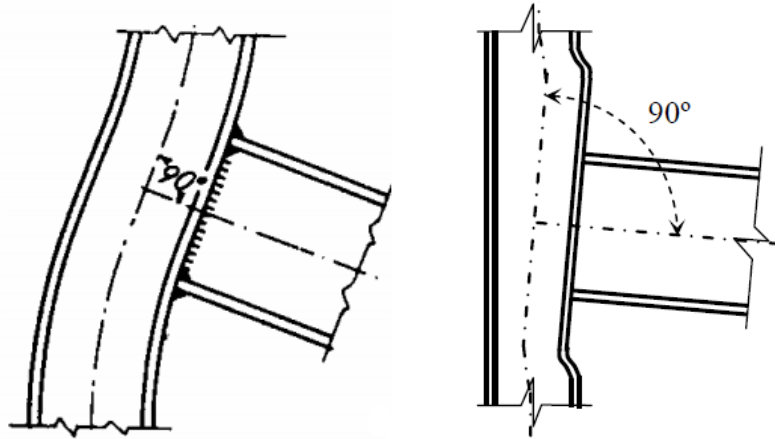


Figura 8. Unión rígida viga-pilar. [2]

Las uniones semirrígidas se caracterizan por un giro relativo entre la viga y el pilar, caracterizado por un ángulo que se forma entre las distintas partes al que llamaremos ϕ . Este giro provocará una deformación en la unión que habrá que tener en cuenta. En esta unión también se transmiten momentos entre los componentes, pero no será al completo.

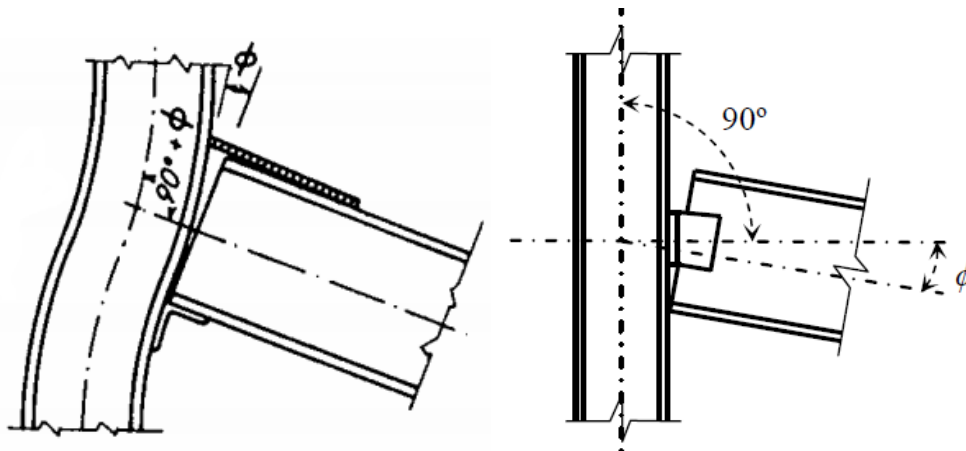


Figura 9. Unión semirrígida viga-pilar.[2]

Las uniones articuladas se caracterizan por no transmitir momento entre la viga y el pilar, por tanto, el pilar se mantiene en su posición mientras que, tras aplicar el esfuerzo, el componente que varía un ángulo ϕ es únicamente la viga.

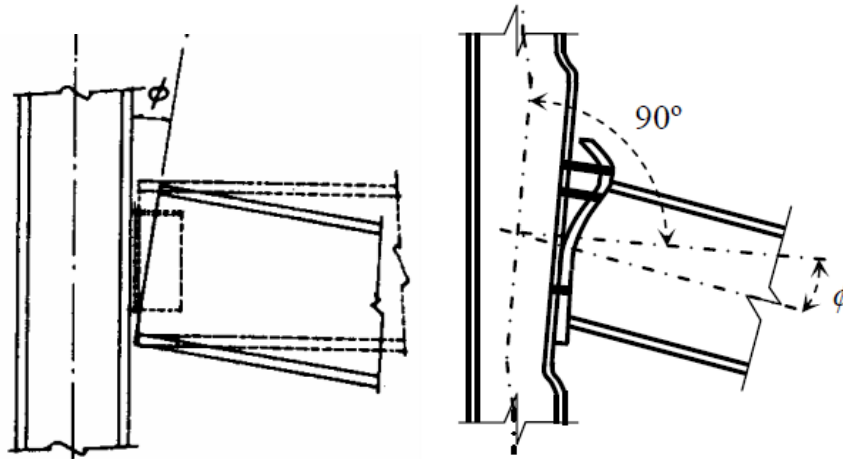


Figura 10. Unión articulada viga-pilar. [2]

Para determinar qué tipo de unión de las nombradas anteriormente tenemos haremos uso del Eurocódigo 3 [1]. Si $S_{j,ini}$ es la rigidez rotacional inicial, se diferenciarán según lo siguiente:

- Si $S_{j,ini} \leq k_b \cdot \frac{E \cdot I_b}{l_b}$, estamos hablando de Uniones Rígidas.
- Si $S_{j,ini} \leq 0.5 \cdot k_b \cdot \frac{E \cdot I_b}{l_b}$, serán uniones articuladas.
- Si $S_{j,ini}$ es un valor intermedio, las uniones serán Semirrígidas.

,siendo E el módulo de elasticidad del material, I_b el momento de inercia de la viga, l_b la longitud del vano de la viga y por último k_b un coeficiente que depende del pórtico donde se esté haciendo la unión.

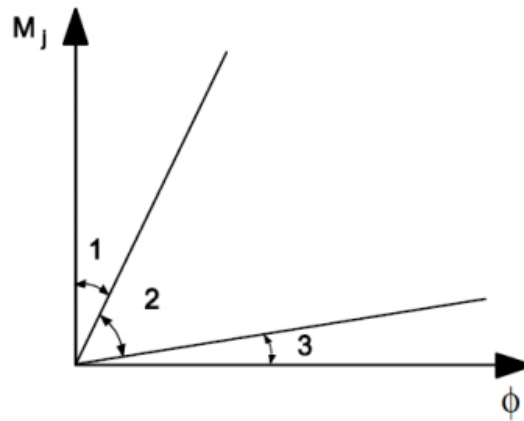


Figura 11. Clasificación de las uniones según la rigidez.[2]

Si observamos la Figura 11 anterior, la zona 1 corresponde a las uniones rígidas, la zona 2 a uniones semirrígidas y, por último, la zona intermedia o zona 2 a las uniones articuladas.

El comportamiento de la unión entre una viga y un pilar se caracteriza mediante la curva Momento-Rotación, donde representamos el momento de rotación M_j frente al ángulo ϕ del que hemos hablado anteriormente. Dicha curva es la que se puede ver en la siguiente Figura 12:

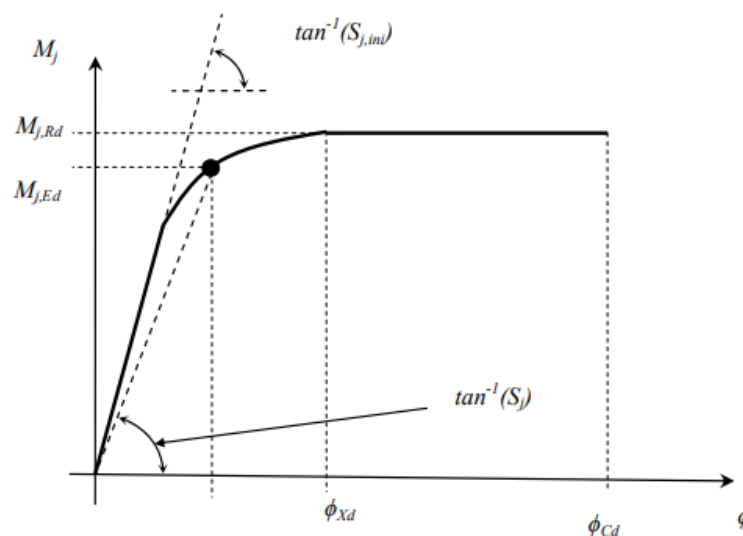


Figura 12. Curva Momento-Rotación de una unión viga-pilar. [2]

En esta curva podemos diferenciar varios términos:

- $M_{j,Rd}$: Es el momento resistente de cálculo, es decir, según la Norma cuánto puede resistir esa unión como máximo.
- ϕ_{cd} : Este término representa la capacidad rotacional de cálculo. Si volvemos al concepto del ángulo ϕ que ya hemos mencionado anteriormente, que es el ángulo que se forma entre los dos componentes de la unión, este sería el máximo ϕ que soporta dicha unión.
- S_j : Es la rigidez rotacional de la unión. Representa la tangente del ángulo que se forma entre la línea imaginaria que une el origen de coordenadas con el punto de la curva que se quiera estudiar con la horizontal. Se podrá obtener siempre y cuando se cumpla que ϕ sea menor o igual a ϕ_{cd} .
- $S_{j,ini}$: Este término es la rigidez rotacional inicial, es decir, la rigidez cuando el comportamiento aún es elástico.

Una vez introducidos estos conceptos, podemos clasificar las uniones entre una viga y un pilar en base a su resistencia. Para ello lo que se hace es comparar el momento $M_{j,Rd}$ del que hemos hablado anteriormente, que es el momento de cálculo, con el momento de la unión que estemos estudiando, M_{Rd} . Dicho esto, según su resistencia podemos clasificar las uniones en:

- Uniones de resistencia completa (Zona 1).

$$M_{j,Rd} \geq M_{Rd}$$

- Uniones de resistencia parcial (Zona 3).

$$0.25 \cdot M_{j,Rd} < M_{j,Rd} < M_{Rd}$$

- Articulación (Zona 2): En este caso se permite el giro de los elementos entre sí.

$$0.25 \cdot M_{Rd} < M_{j,Rd}$$

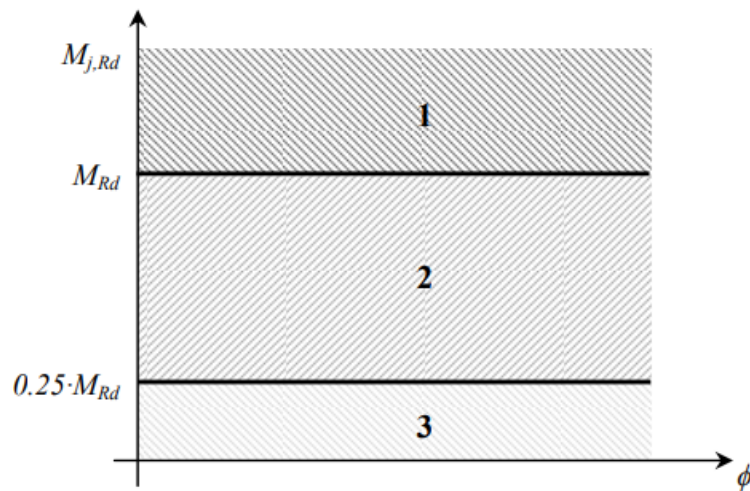


Figura 13. Gráfica representativa de los tipos de uniones según su resistencia. [2]

Por último, otra forma de clasificar las uniones estructurales será mediante la forma de ejecutarlas. De esta forma, nos podemos encontrar con varios tipos:

- Unión con un angular o chapa simple al alma de la viga (Figura 14): Esta unión se caracteriza por tener muy poca rigidez y una capacidad de rotación alta. Es una unión articulada.

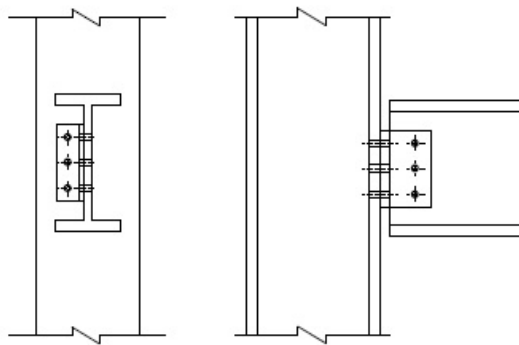


Figura 14. Unión angular o chapa simple al alma de la viga. [2]

- Unión con dos angulares al alma de la viga (Figura 15): Por el contrario que la unión anterior, ésta presenta hasta el doble de rigidez y resistencia. Es una unión articulada en su mayoría.

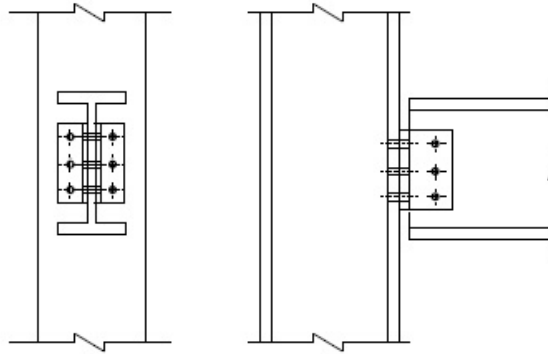


Figura 15. Unión con dos angulares al alma de la viga. [2]

- Unión con chapa de testa parcial (Figura 16): Su curva característica es muy parecida a la de dos angulares unidos al alma pero sin embargo se considera una unión semirrígida.

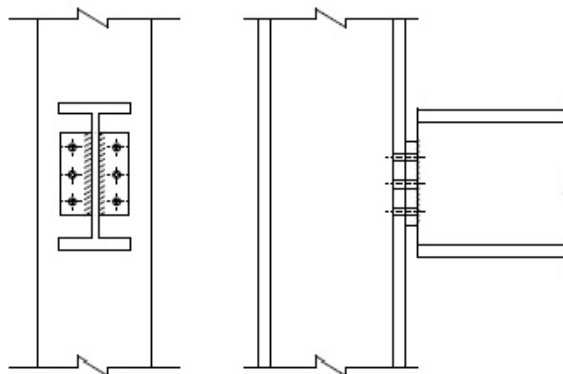


Figura 16. Unión con chapa de testa parcial. [2]

- Unión con angulares a las alas de la viga (Figura 17): Tiene una capacidad rotacional alta, aunque menor a las tres uniones anteriores. Se ha

demostrado experimentalmente que este tipo de uniones presentan un comportamiento semirrígido en su mayoría.

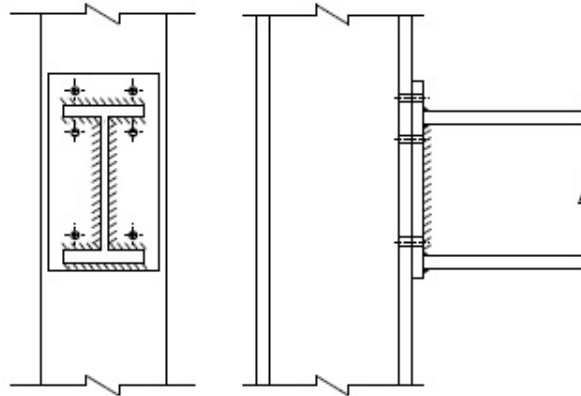


Figura 17. Unión con angulares a las alas de la viga. [2]

- Unión con angulares a las alas y al alma de la viga (Figura 18): Tiene un valor de $S_{j,ini}$ mayor que una unión con angulares a las alas de la viga y ligeramente mayor rigidez. Presenta un comportamiento semirrígido.

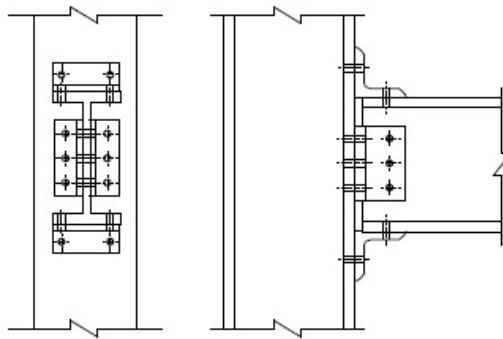


Figura 18. Unión con angulares a las alas y al alma de la viga. [2]

- Unión con chapa de testa extendida (Figura 19): Esta unión tiene un valor alto de $S_{j,ini}$ y una resistencia muy parecida a la unión anterior (Figura 19f). Presenta un comportamiento semirrígido.

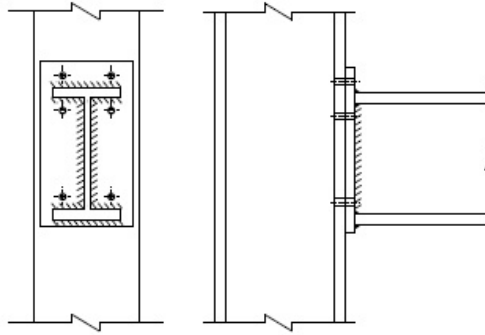


Figura 19. Unión con chapa de testa extendida. [2]

- Unión con chapa de testa enrasada (Figura **): Presenta un comportamiento semirrígido y una resistencia parecida a la unión con angulares a las alas y al alma de la viga (Figura 20).

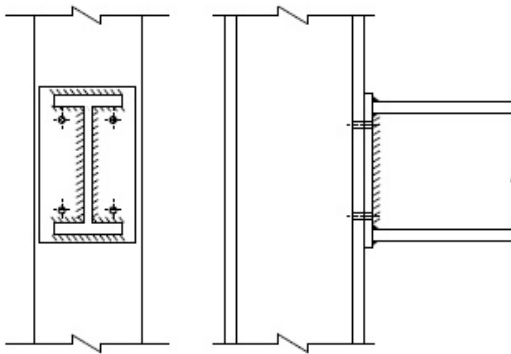


Figura 20. Unión con chapa de testa enrasada. [2]

- Unión con perfiles en T (Figura 21): Se forma con la unión de dos perfiles en forma de T unidos a la viga y a la columna.

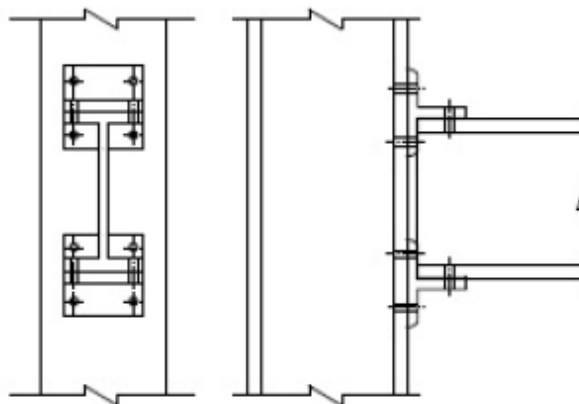
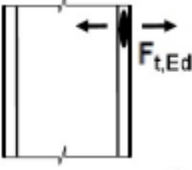
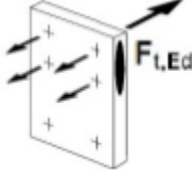
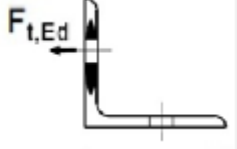
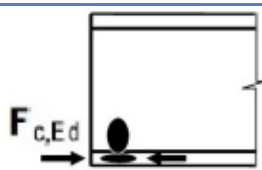
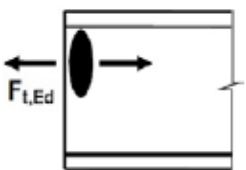
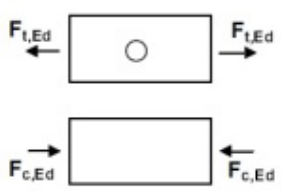
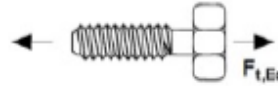
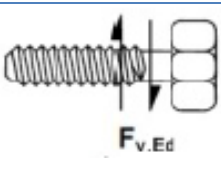
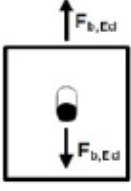


Figura 21. Unión con perfiles en T. [2]

Una vez terminada la clasificación de las uniones, cabe identificar qué elementos componen dichas uniones. Dado el gran número de tipos de ejecución, nos encontraremos también con un gran número de elementos simples y características diferentes. En el Eurocódigo 3 [1] podemos encontrar un pequeño esquema de estos elementos, como se puede ver a continuación:

Código	Elemento	Solicitación	Abreviatura	Esquema
C01	Alma de columna	cortante	wp	
C02	Alma de columna	Compresión transversal	c,wc	
C03	Alma de columna	Tracción transversal	t,wc	

C04	Ala de columna	flexión	fc	
C05	Chapa de testa	flexión	ep	
C06	Angulares de asiento	flexión	cl	
C07	Alma y ala de viga o columna	compresión	c,fb	
C08	Alma de viga	tracción	t,wb	
C09	Chapa	Tracción o compresión	t,p	
C10	Tornillo	tracción	t	
C11	Tornillo	cortante	v	
C12	Tornillo en ala de viga o columna, chapa o angular	aplastamiento	b	

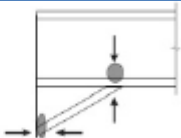
C13	Hormigón	Compresión	cc
C14	Placas de anclaje	Flexocompresión	c,pl
C15	Placas de anclaje	Flexotracción	t,pl
C16	Pernos de anclaje	Tracción	t,ab
C17	Pernos de anclaje	Cortante	v,ab
C18	Pernos de anclaje	aplastamiento	b,ab
C19	Cordón de soldadura		w
C20	Cantonera de refuerzo	hb	

Tabla 1. Elementos simples en uniones. [1]

Todas las uniones que se han discutido anteriormente se componen de estos elementos simples en su combinación. Por ejemplo, una unión con perfiles en *T* se compone de los elementos C01, C02, C03, C04, C07 y C08, o bien con un elemento más, el C06, si a esta unión se le añaden angulares.

2.2.5. Modelo Tstub.

En el presente proyecto vamos a estudiar un tipo de unión estructural en concreto, fruto de la combinación de los elementos C04, C05, C06, C14 y C15 que podemos observar en la Tabla 1. Esta unión es estudiada mediante una simplificación que se llama Tstub o T equivalente. El principal objetivo de este proyecto es analizar el comportamiento de la Tstub fabricada mediante impresión 3D.

El modelo Tstub consiste en dos perfiles en forma de T unidos en su base por tornillos de acero. Para analizar su comportamiento lo que se hace es aplicar una carga progresiva de desplazamiento a tracción en dirección vertical en la parte superior del alma del perfil. Las dimensiones, según el Eurocódigo 3 [1], se van a definir según los siguientes parámetros que se ven en la Figura 22:

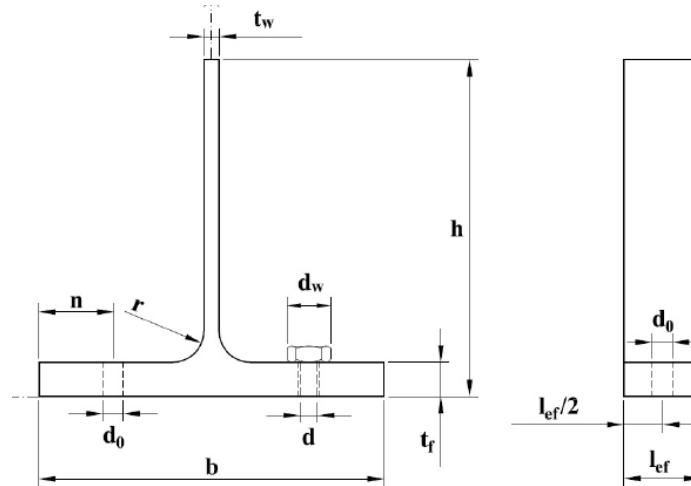


Figura 22. Perfil Tstub. Dimensiones. [2]

Quedan definidas, por tanto, las dimensiones del perfil en T como de los tornillos. La longitud efectiva será el ancho del perfil. En este proyecto variaremos la longitud efectiva, estudiando hasta tres diferentes, dejando las demás dimensiones sin modificar, y las compararemos entre sí.

El modelo de mecanismo de colapso del modelo Tstub nos indica dónde se forman las rótulas plásticas. En este caso serán en las zonas donde se está aplicando una fuerza, que será por un lado en el alma del perfil debido a la fuerza de tracción a la que la estamos sometiendo y, por otro lado, en las zonas donde se colocan los tornillos dado a la fuerza de reacción existente. Cabe destacar que no siempre se producen las rótulas plásticas en estos puntos, pueden aparecer o pueden no aparecer, por esto habrá que diferenciar entre varios modos de fallo que analizaremos a continuación. El punto exacto donde aparece la rótula plástica debido a la fuerza de tracción vertical se define mediante un parámetro que se denomina m , que se calcula de la siguiente manera según lo especificado en el Eurocódigo 3 [1]:

$$m = \frac{b}{2} - \frac{t_w}{2} - n - 0.8 \cdot r$$

Siendo n la distancia desde el extremo del ala del perfil hasta el agujero del tornillo, el Eurocódigo 3 nos define también una relación entre los parámetros n y m , a lo que llama λ . Se deberá cumplir siempre que $\lambda = \frac{n}{m} \leq 0.25$.

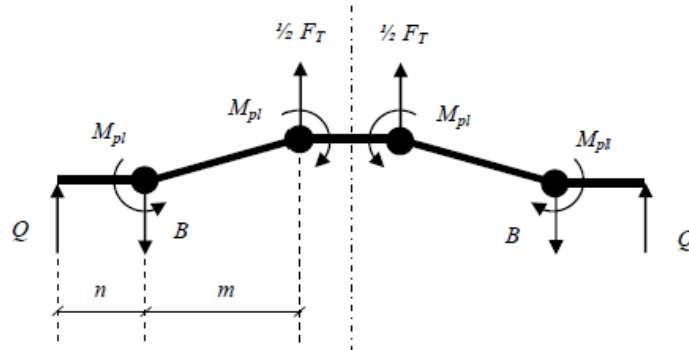


Figura 23. Rótulas plásticas que aparecen en el modelo T-stub. [2]

Como se ha adelantado anteriormente, el fallo del modelo Tstub se puede producir de tres formas diferentes según cómo aparezcan las rótulas plásticas. Definiremos la resistencia de diseño como la menor de entre las tres posibles correspondientes a cada uno de los modelos de fallo. Según el Eurocódigo 3 [1], los modelos Tstub presentan los siguientes modos de fallo.

- Modo I. Mecanismo de ruina flexible.

Las rótulas plásticas aparecerán tanto en la zona de unión entre el alma y el ala del perfil como en el tornillo, siendo simétricas, por lo que tendremos cuatro rótulas plásticas como se puede observar en la siguiente Figura 24:

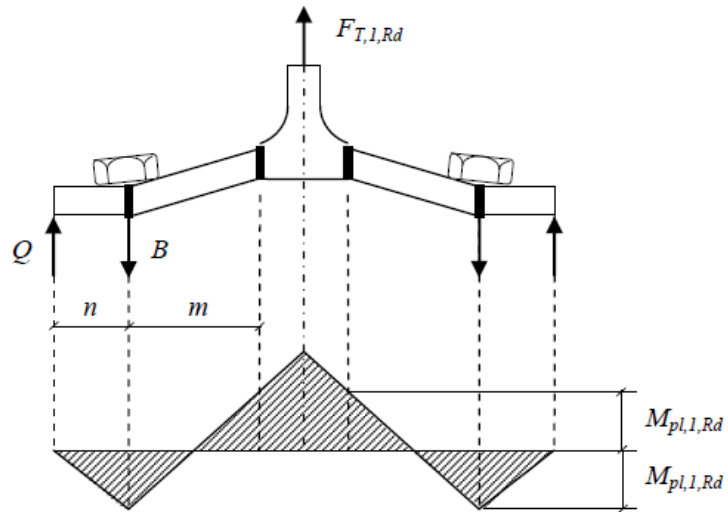


Figura 24. Modo de fallo I. [2]

- Modo II: Mecanismo de ruina semirrígido.

En este caso no hay rótulas plásticas en los tornillos, solamente aparecerán en la zona de unión entre el alma y el ala del perfil. El fallo se va a producir en este caso por la rotura del tornillo.

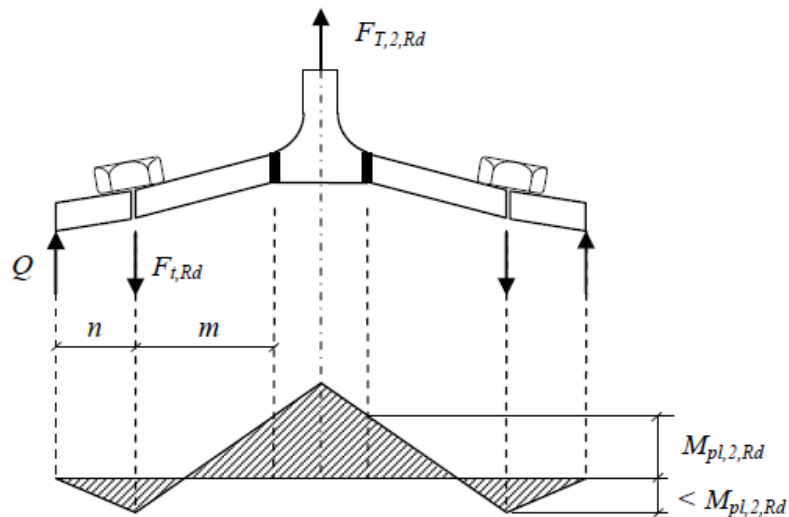


Figura 25. Modo de fallo II. [2]

- Modo III: Mecanismo de ruina rígido.

En este último caso no se llega a la plastificación en ninguna zona del perfil cuando los tornillos se ropan. Esto es debido a que alcanzan su límite de resistencia a tracción antes de que el perfil plastifique por ninguna zona.

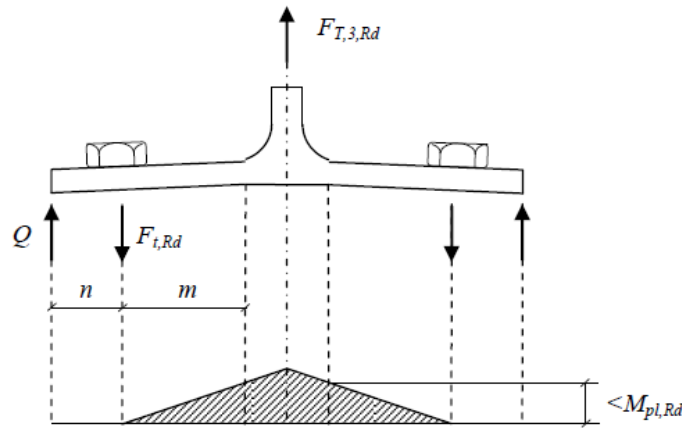


Figura 26. Modo de fallo III. [2]

Las dimensiones del tornillo juegan un papel importante en cuanto a la resistencia del perfil, aunque en este proyecto no se va a tener en consideración. No obstante, decir que si consideramos toda el área de contacto entre el ala y la cabeza tornillo, y no solo el eje del mismo, se modifica la resistencia especificada para el modelo I de fallo. Aunque como se acaba de decir, no se va a tener en cuenta en el presente proyecto.

2.3. Correlación digital de imágenes DIC.

2.3.1. Introducción.

La correlación digital de imágenes (DIC) es una técnica experimental óptica de campo completo en donde, gracias a las imágenes que se toman durante el ensayo, se pueden obtener mapas completos de deformación y desplazamiento [13]. Las imágenes se almacenan en formato digital para su posterior análisis y obtención de datos [2]. Previamente al ensayo de DIC, las piezas a ensayar deben ser tratadas

con una base de pintura blanca por toda la superficie de la pieza junto con un pequeño moteado de pintura negra para tener el mayor contraste posible [13].

Existen dos tipos de ensayos con DIC, que son DIC 2D y DIC 3D. Si lo que se requiere es una imagen de deformaciones sobre el plano se usará la técnica de DIC 2D, mientras que si lo que si es una imagen fuera del plano se usará el DIC 3D [2]. En este proyecto no será necesario obtener imágenes fuera del plano, luego la técnica a emplear será el DIC 2D.

2.3.2. Historia.

Para indagar sobre el comienzo de la utilización de esta técnica tenemos que remontarnos a los años 80, donde concretamente en 1982 se realizan los primeros documentos en los que se hacía uso de la correlación digital de imágenes para el cálculo de deformaciones. Fue a cargo de W.H. Peters y W.F. Ranson [5] [6], los cuales publicaron unos estudios donde gracias a las capturas de imágenes en el instante inicial y el instante final del ensayo obtuvo un campo completo de desplazamientos mediante la comparación de dichas imágenes. A partir de este momento se realizaron numerosas investigaciones sobre este método [14].

En un principio, el método de la correlación digital de imágenes sólo se extendía en el campo de las dos dimensiones. No fue hasta principios de los años 90 cuando se introdujo el concepto a las tres dimensiones, dando un nuevo impulso a esta técnica. Para ello ya no se usaba una única cámara, sino que era necesario el uso de una más [2].

Estas técnicas son ya hoy en día muy utilizadas en multitud de ámbitos de la ingeniería, como por ejemplo en la cuantificación experimental de la zona plástica de la punta de la grieta durante su crecimiento por fatiga en la ingeniería mecánica, donde se hace uso del DIC para obtener mapas de tensión calculados a partir de campos de desplazamiento [32].

2.3.3. Principios del DIC 2D.

En el presente trabajo, la técnica de Correlación Digital de Imágenes que vamos a utilizar será la 2D. Se basa en el análisis de cada píxel, nombre que se le llama a cada uno de los puntos de la superficie, tomado antes y después de la deformación. Cada píxel se se enmarca en una ventana cuadrada de $2M+1$ píxeles para poder determinar el desplazamiento del punto que se encuentra en el centro, siendo M la distancia entre el punto que estamos analizando hasta el límite de la ventana que lo enmarca. Una vez realizada la deformación y teniendo dos imágenes, una antes de deformar y otra después, se busca el punto en cuestión y comparando ambos datos se calcula el desplazamiento que se ha producido. Al deformarse también la ventana, hay que establecer un criterio de correlación para poder comparar con la ventana inicial. Si se identifica el valor máximo del coeficiente de correlación de entre todos los puntos de la ventana, se llega al lugar donde ha quedado el punto estudiado después de la deformación y, por tanto, se conoce el desplazamiento producido, ya que la posición inicial era de referencia y conocida [2].

2.3.4. Desarrollo experimental.

Para la realización de un ensayo experimental de DIC 2D como el de este proyecto será necesaria una cámara de grabación, en nuestro caso una cámara acA2440 Basler de 75um, de alta definición, que ofrece 75 cuadrados por segundo a una resolución de 5.0 MP, con un tamaño de píxel de $3,45 \mu\text{m} \times 3,45 \mu\text{m}$. La cámara tomará las imágenes, soportada por un trípode, de forma en que enfoque de manera perpendicular a la pieza, y se grabarán en el ordenador mediante el software *Basler Video Recording*, instalado en el PC. Las piezas han de ser pintadas previamente antes del ensayo, sobre una hora o dos antes de ensayar para que le de tiempo a la pintura a secarse bien, de un color blanco con una pequeña aportación de pintura de spray negra para obtener un buen patrón de moteado. Para facilitar la grabación y obtener mejores imágenes, es recomendable colocar un foco de luz enfocando a las piezas durante el ensayo. El análisis posterior de las imágenes tomadas durante los ensayos se hará con un software llamado Vic-2D

[31], sistema que sirve de herramienta para realizar mediciones de tensión o desplazamientos, obteniendo mapas bidimensionales completos de cualquier espécimen plano.



Figura 27. Cámara Basler usada para los ensayos de DIC.

2.4. Análisis numérico mediante elementos finitos.

2.4.1. Introducción.

El método de los elementos finitos es una técnica que ha tomado valor en los últimos años gracias a los avances tecnológicos y a la facilidad que da para resolver problemas de gran complejidad. Fue a principios de los años cincuenta cuando se planteó por primera vez, con el trabajo de M. Turner, R.W. Clough, H.C. Martin y L.J. Topp [15], pero no ha podido utilizarse con éxito hasta hace unos 20 años [2].

La técnica de elementos finitos nos aproxima un problema continuo dividiéndolo en elementos, los cuales están divididos a su vez en nodos que se conectan entre sí formando un mallado en el modelo. Con otras palabras, lo que se hace es transformar un modelo continuo en una discretización del mismo. Si es posible conocer los valores de tensiones, deformaciones o desplazamientos en todos los nodos será posible hacer una aproximación del comportamiento final del

modelo. Teóricamente, esto se consigue gracias a un método matricial basado en el principio de los trabajos virtuales [2].

Una de las ventajas que tenemos hoy en día para la utilización del método de los elementos finitos es la posibilidad de obtener un software adaptado para ello. El más utilizado es ABAQUS, con el que se realizarán las simulaciones para el presente proyecto. ABAQUS ofrece versiones gratuitas también, por lo que cualquier persona puede conseguirlo y trabajar con él. Por ejemplo, uno de los software gratuitos que ofrece está destinado a estudiantes que, aunque no es tan potente como las comerciales, es lo suficientemente bueno para facilitar a personas que comienzan a descubrir el programa y se están formando. Para la realización de este trabajo se ha contado con una versión de ABAQUS disponible gracias a la licencia de la Universidad de Jaén, que es una versión más potente y que permite mallados más precisos, necesarios para llevar a cabo simulaciones con mayor exactitud y resultados con mayor precisión, ya que la versión estudiante está limitada a un mallado con un determinado número de nodos.

Para realizar con éxito una simulación mediante elementos finitos hay que seguir los siguientes pasos [2]:

- Preprocesado: En esta fase se definen todos los parámetros del análisis. Los pasos a seguir serían en primer lugar definir la pieza, con todas las partes de las que se componga, a continuación definir las propiedades del material y ensamblar el modelo en caso de tener varias partes, por otro lado establecer las cargas y condiciones de contorno que tengamos en el problema que estemos planteando. Por último, habría que mallar el elemento y definir los distintos pasos, llamados *Steps*, que va a realizar la simulación.
- Procesado: En esta parte se procede al cálculo del modelo matricial que se compone de la matriz de rigidez y del vector de desplazamientos y condiciones de contorno, que da lugar a un sistema de ecuaciones donde se resuelve para obtener las incógnitas del problema.

- Postprocesado: Se obtienen el resto de variables que se deseen conocer a partir de los desplazamientos, que se han obtenido en la fase anterior. Una vez terminada la simulación se pueden ver los resultados obtenidos.

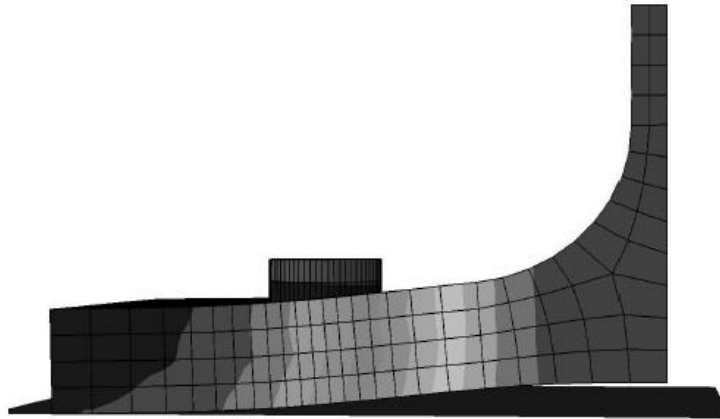


Figura 28. Tstub simulada mediante elementos finitos.

2.4.2. Estudios previos de elementos finitos en uniones Tstub.

Anteriormente, numerosos trabajos han sido realizados con el objetivo de simular mediante elementos finitos una unión Tstub y que, hoy en día, sirven de base para todos los estudios similares que se ralicen con este tipo de uniones [2]. Todo comenzó cuando se propuso estudiar el modelo para posteriormente poder modelar uniones atornilladas completas, donde en 1994 Jaspart [24] realizó estudios experimentales que, después, fueron esenciales para poder simular la T . Jaspart se unió a Bursi [25] para crear un modelo y así poder simular la unión en tensión, mejorándolo más adelante y conseguir estudiar también modos de fallo en el modelo [26] [27].

Mientras que el modelo de Jaspart y Bursi se simuló mediante elementos sólidos y de contacto, Gomes *et al.* [28] propuso una alternativa donde el modelo era simulado mediante elementos laminados. De esta forma, consiguió estudiar el comportamiento no lineal del material. No obstante, sus resultados no fueron

demasiado satisfactorios, por lo que más adelante surgieron otros modelos aunque con poco éxito también, dado que los resultados experimentales y los simulados no concordaban como para decir que representaba con precisión el comportamiento de la Tstub.

Con el paso del tiempo, otras investigaciones fueron consiguiendo acercarse más al comportamiento real de la unión atornillada, como por ejemplo Swanson [29], que consiguió un modelo suficientemente bueno como para tener unos resultados precisos. Uno de los estudios más recientes es el de Girao [30], en el cual los resultados simulados son muy parecidos a los experimentales, sobre todo en cuanto a la parte elástica se refiere.

3. OBJETIVOS.

El objetivo del presente trabajo es estudiar el comportamiento de uniones estructurales fabricadas mediante la técnica de fabricación aditiva, o impresión 3D, y comparar con la normativa del Eurocódigo 3 para verificar si cumplen o no lo especificado en dicha norma, así como la comparación con los resultados obtenidos mediante simulaciones numéricas de elementos finitos. Se busca cuantificar la mejora en las propiedades mecánicas (resistencia y rigidez) de estas uniones impresas, empleando materiales reforzados con fibra de carbono, frente a modelos ensayados en trabajos previos de este Departamento e impresos con materiales más comunes (ABS y PLA).

En concreto, los objetivos específicos que se en este proyecto son los siguientes:

- Caracterizar dos materiales recientemente sacados al mercado para la fabricación 3D por la empresa de la provincia de Jaén *Smart Materials 3D*, PA CF y PET CF, mediante una primera fase de nuestro programa experimental que consistirá en ensayos de tracción (según normativa) para la obtención de la curva característica tensión-deformación de los

materiales empleando correlación digital de imágenes para registrar las deformaciones sufridas por las probetas.

- Ensayar y analizar el comportamiento de las Tstub, unas uniones estructurales, en una segunda fase del programa experimental, fabricadas con los mismos materiales caracterizados en la primera fase con la posterior comparación con el estudio previo de las mismas uniones fabricadas con ABS y PLA. El procedimiento de ensayos sería el mismo que anteriormente, con ensayos de tracción.
- Realizar con éxito las simulaciones mediante elementos finitos para los cuatro materiales (ABS, PLA, PA CF y PET CF).

En cuanto al aprendizaje personal y educativo, este proyecto tendrá como objetivos conseguir:

- Profundizar en el conocimiento de uniones estructurales, e investigar el comportamiento de uniones realizadas con elementos fabricados mediante impresión 3D.

- Conocer y aplicar adecuadamente el método experimental para análisis de deformaciones denominado correlación digital de imágenes (DIC), sus principios, opciones, potencial y limitaciones.

- Aprender a diseñar y realizar un programa experimental partiendo de la normativa existente, estableciendo número y geometría de las muestras, metodología de ensayo, adquisición de datos, procesamiento de resultados y valoración del error cometido.

- Comprender cómo se realiza un análisis numérico, la construcción de modelos, establecimiento de condiciones de contorno y realización de simulaciones.

- Adquirir conocimientos sobre los materiales empleados en la impresión 3D y sus propiedades mecánicas.

Las motivaciones que nos llevan a proponer este estudio experimental son sobre todo la innovación de hacer algo que nadie ha intentado antes y comprobar si es factible en la práctica. Sobreponerse a todos los problemas que vayan surgiendo es algo fundamental. Tratándose de un estudio experimental suelen surgir muchos inconvenientes que hacen que se tenga que abrir un abanico más amplio de posibilidades para poder llegar al objetivo final. Por tanto, se buscará realizar el estudio más completo posible con todas las herramientas de las que podamos disponer, hacer frente a los problemas y tener la capacidad de encontrar soluciones.

Otro de los objetivos propuestos será poder obtener los resultados suficientemente buenos para que se pueda continuar investigando sobre el tema que tratamos con mayor profundidad una vez acabado este proyecto y, si es posible, conseguir publicar el trabajo realizado.

4. PROGRAMA EXPERIMENTAL.

4.1. Objetivo.

El objetivo del programa experimental de este proyecto será, en primer lugar, el de la caracterización de los dos materiales a ensayar mediante probetas tipo hueso fabricadas mediante impresión 3D y, en segundo lugar, el del ensayo de los casquillos Tstub. Dicho programa experimental se intentará asemejar casi en exactitud con el Proyecto Fin de Grado del compañero Pedro Herranz Colomina, con el objetivo posterior de que a la hora de comparar resultados entre este Proyecto y el suyo los experimentos hayan sido de la mayor similitud posible.

4.2. Diseño de la fase experimental.

En la primera fase del programa experimental estudiaremos probetas tipo hueso de PA CF y de PET CF, dos materiales nuevos que lanza al mercado la

empresa *Smart Materials 3D*, con la que estamos colaborando para la fabricación de las probetas.

Dichas probetas serán impresas en 3D con una densidad de relleno del 100% con el objetivo de caracterizar ambos materiales. El resto de parámetros de impresión se mantendrán constantes, la única variación será la dirección de impresión. Se seguirán las recomendaciones de la norma UNE 116005, que recomienda imprimir en cada una de las tres direcciones principales, asunto que veremos con más detenimiento a continuación.

En la segunda fase del programa experimental ensayaremos las uniones estructurales llamadas Tstub fabricadas mediante fabricación aditiva al igual que las probetas y con los mismos materiales caracterizados previamente en la primera fase del programa experimental. Estas uniones serán fabricadas con 100% de relleno ya que lo que vamos buscando es analizar su resistencia.

4.3. Fase I experimental. Caracterización mecánica.

4.3.1. Normativa Fase I.

Las normas consultadas para la realización de este programa experimental son las siguientes:

- Norma UNE 116005:2012 Fabricación por adición de capas en materiales plásticos. Fabricación aditiva. Preparación de probetas.
- Norma UNE ISO 527-1 Determinación de las propiedades a tracción.

4.3.2. Dimensiones de las probetas y direcciones de impresión.

De acuerdo con la norma UNE 116005-2012 para la fabricación por adición de capas en materiales plásticos, fabricación aditiva y preparación de probetas, encontramos las especificaciones necesarias para el diseño de las dimensiones de las probetas a ensayar, así como las direcciones de impresión y número de piezas

a ensayar para que los resultados de dicho ensayo sean lo suficientemente precisos para su posterior evaluación y comparación.

La UNE 116005-2012 nos señala que habrá que seguir lo indicado en la norma ISO 527 para ensayo de tracción en cuanto a la elección de las dimensiones. El tipo de probeta recomendada siempre que sea posible será la probeta tipo 1A, cuyas dimensiones se muestran en las figuras siguientes:

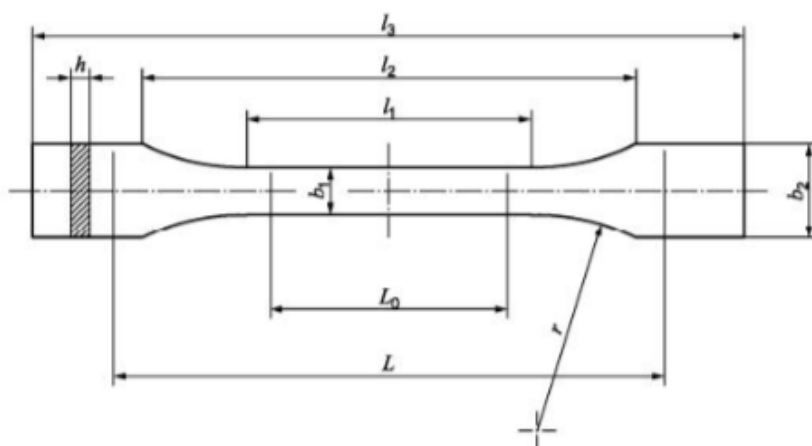


Figura 29. Probeta tipo 1A y 1B según norma ISO 527-2.

Tipo de probetas	1A	1B
l_3 Longitud total ^a	170	≥ 150
l_1 Longitud de la parte estrecha de caras paralelas	80 ± 2	$60,0 \pm 0,5$
r radio	24 ± 1	$60 \pm 0,5$
l_2 Distancia entre las partes anchas de caras paralelas ^b	$109,3 \pm 3,2$	$108 \pm 1,6$
b_2 Anchura en los extremos	$20,0 \pm 0,2$	
b_1 Anchura de la parte estrecha	$10,0 \pm 0,2$	
h Espesor recomendado	$4,0 \pm 0,2$	
L_0 Longitud de referencia (recomendada) Longitud de referencia (aceptable si se requiere para el control de calidad o cuando se especifique)	$75,0 \pm 0,5$ $50,0 \pm 0,5$	$50,0 \pm 0,5$
L Distancia inicial entre las mordazas	115 ± 1	115 ± 1

^a La longitud total recomendada de 170 mm para el tipo 1A concuerda con las Normas ISO 294-1 e ISO 10724-1. Para algunos materiales, puede ser necesario alargar la longitud de los extremos (por ejemplo $l_3 = 200$ mm) para evitar la rotura o el deslizamiento en las mordazas de la máquina de ensayo.

^b $l_2 = l_1 + [4r(b_2 - b_1) - (b_2 - b_1)^2]^{1/2}$, que resulta de l_1 , r , b_1 y b_2 , pero dentro de las tolerancias indicadas.

Figura 30. Dimensiones de probetas tipo 1A y 1B según norma ISO 527-2.

No obstante, la norma más adelante nos da la alternativa de que, en caso de que las medidas anteriores se considerasen demasiado grandes, se podrían usar otro tipo de probetas, llamadas 1BA y 1BB, que son una reducción proporcional de las probetas 1B anteriormente descritas en la Figura 30, con la única excepción del espesor, que sí será el mismo.

Dada a esta alternativa propuesta, la idea inicial que se tenía diseñada de las dimensiones fue cambiada para que las probetas a ensayar fueran más pequeñas. Esta decisión fue tomada en base a que, en gran parte por las probetas que se fabricarán en la dirección vertical, se podría producir efecto warping y pandeo a la hora de imprimir.

El efecto warping es un defecto común en la impresión 3D cuando las piezas tienen unas dimensiones grandes, en las cuales las esquinas tienden a levantarse. Dado que el material sale de la boquilla a una temperatura bastante elevada respecto a la temperatura a la que se encuentra la placa de impresión, el material se enfría provocando una contracción y produciendo el defecto [20].

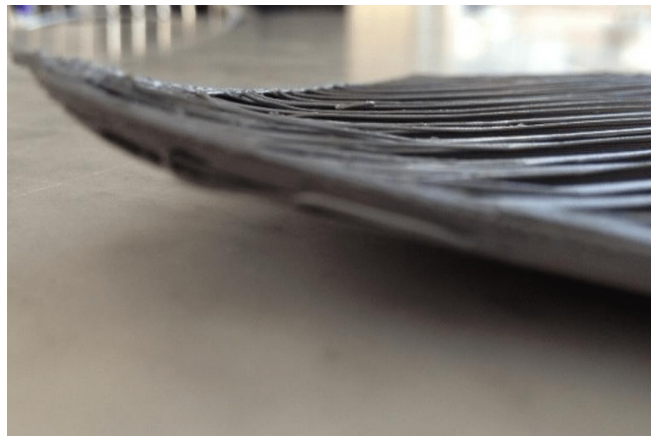


Figura 31. Pieza fabricada mediante impresión 3D con efecto warping. [20]

Una solución para poder evitar el efecto warping en la pieza sería colocar una cubierta en la impresora para controlar la temperatura, como se muestra en la Figura 32:



Figura 32. Impresora 3D con cubierta para controlar la temperatura. [21]

Por tanto, para evitar todos estos defectos de impresión se decidió cambiar las dimensiones de las probetas y hacerlas más pequeñas, concretamente del tipo 1BA.

	Tipo de probetas	1BA	1BB
l_3	Longitud total	≥ 75	≥ 30
l_1	Longitud de la parte estrecha de caras paralelas	$30,0 \pm 0,5$	$12,0 \pm 0,5$
r	Radio	≥ 30	≥ 12
l_2	Distancia entre las partes anchas de caras paralelas	58 ± 2	23 ± 2
b_2	Anchura en los extremos	$10,0 \pm 0,5$	$4 \pm 0,2$
b_1	Anchura de la parte estrecha	$5,0 \pm 0,5$	$2,0 \pm 0,2$
h	Espesor	≥ 2	≥ 2
L_0	Longitud de referencia	$25,0 \pm 0,5$	$10,0 \pm 0,2$
L	Distancia inicial entre las mordazas	$l_2 +2_0$	$l_2 +1_0$
NOTA Los tipos de probetas 1BA y 1BB son una reducción proporcional de las probetas tipo 1B con un factor de reducción del 1:2 y 1:5, respectivamente, con excepción del espesor.			

Figura 33. Probeta Tipo 1BA y 1BB según norma ISO 527-2.

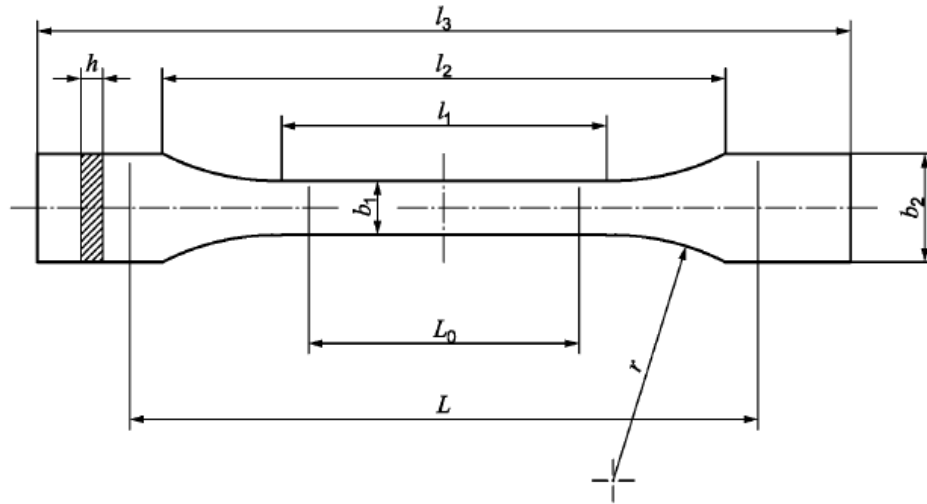


Figura 34. Geometría Probeta Tipo 1BA y 1BB según norma ISO 527-2.

Por otro lado, volviendo a la norma UNE 116005-2012, encontramos las especificaciones respecto a las direcciones de impresión recomendadas, que serán cada uno de los ejes de simetría de la pieza como se muestra en la ilustración, así como el número de probetas a fabricar en cada una de las direcciones.

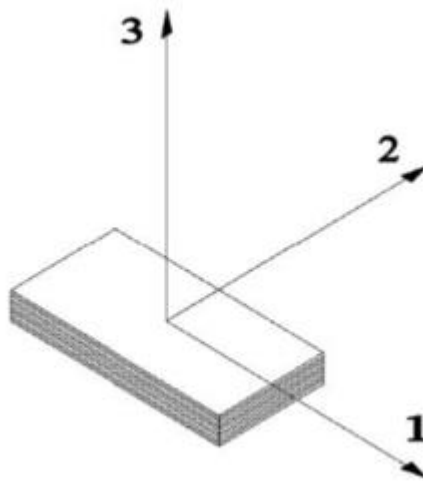


Figura 35. Direcciones de simetría según norma UNE 116005-2012.

Dadas las posiciones a imprimir marcadas por la norma, podemos asegurar que el material va a presentar propiedades anisótropas, con lo cual dicha norma nos

dice el número de probetas a ensayar para que obtengamos los resultados deseados.

Los ensayos que vamos a realizar en esta primera fase del programa experimental serán con probetas tipo 1BA para las direcciones de impresión horizontal, de canto y vertical.

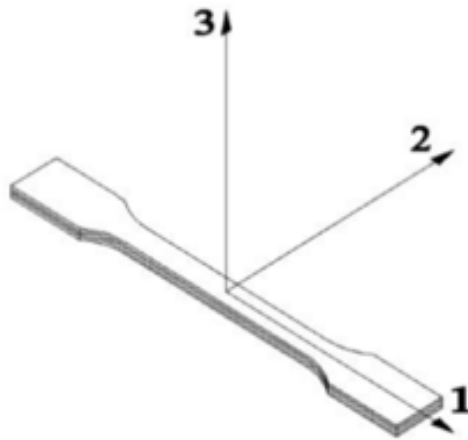


Figura 36. Probeta tipo 1A. Posición horizontal.

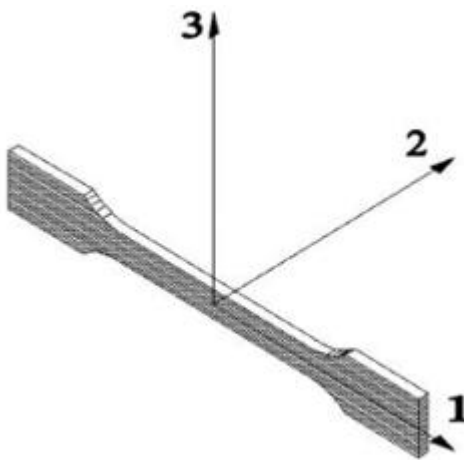


Figura 37. Probeta tipo 1A. Posición de canto.

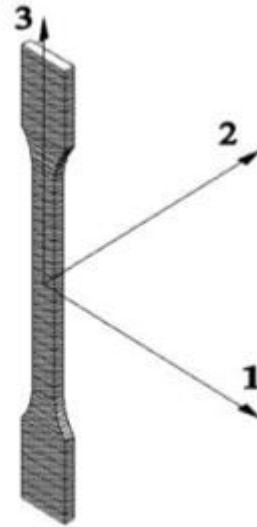


Figura 38. Probeta tipo 1A. Posición vertical.

La norma nos dice que deberemos ensayar cinco probetas fabricadas en cada una de las direcciones de ensayo como mínimo para que los resultados sean precisos. Por tanto, nuestro programa experimental para esta primera fase queda definido como el ensayo de 48 probetas tipo 1BA, 24 de PA CF y 24 de PET CF, de las cuales se ensayarán 8 probetas por cada una de las tres direcciones marcadas por la norma.

4.3.3. Materiales utilizados.

Como se ha comentado anteriormente, los dos materiales que se usarán tanto para la fabricación de las probetas como de las Tstub serán PA CF y PET CF. Ambos materiales pertenecen y serán suministrados por la empresa *Smart Materials 3D*, situada en la provincia de Jaén. Dichos materiales los acaba de sacar al mercado la ya citada empresa.

- Poliamida con fibra de carbono.

Innovatefil® Poliamida con Fibra de Carbono es un material que, según esta empresa, presenta una gran resistencia mecánica y un buen rendimiento a las altas temperaturas. Se pueden imprimir piezas grandes sin deformaciones y fuertes. Esto es debido a la mezcla de poliamida y de la fibra de carbono, que hace que el

filamento aumente su resistencia y rigidez. Tiene la capacidad de trabajar a una temperatura de 150° y presenta una gran adhesión entre capas, por lo que tiene una gran resistencia independientemente de la dirección de impresión [22].

Este material se imprime a una temperatura de impresión entre 240 y 260 grados, siendo la temperatura de la cama superior a 60 grados. Es recomendable usar una velocidad de impresión entre 30 y 50 *mm/s* [22].



Figura 39. Rollo de hilo de Poliamida con fibra de carbono. [22]



Figura 40. Piezas fabricadas de Poliamida con fibra de carbono. [22]

- PET con fibra de carbono.

Innovatefil® PET con Fibra de Carbono es un material usado para impresión 3D con base PET que incorpora fibra de carbono. Al igual que pasaba anteriormente con la combinación entre poliamida con la fibra de carbono, en este caso con la combinación de ambos componentes se consigue mantener las cualidades del PET, pero la unión hace que tengamos un material con mejores propiedades mecánicas y térmicas. Podremos conseguir piezas con un muy buen acabado dada la estabilidad y facilidad de impresión [23].

Algunas de las propiedades que obtenemos con este material son [23]:

- Elevada resistencia mecánica y térmica.
- Gran Resistencia química.

- Baja absorción de humedad.
- Buena estabilidad dimensional.
- Acabado superficial perfecto.

Al igual que con la poliamida con fibra de carbono, este material también se imprime a una temperatura de impresión entre 240 y 260 grados, siendo la temperatura de la cama superior a 60 grados. Es recomendable usar una velocidad de impresión entre 30 y 50 *mm/s* [23]:



Figura 41. Rollo de hilo de PET con fibra de carbono. [23]



Figura 42. Piezas fabricadas de PET con fibra de carbono. [23]

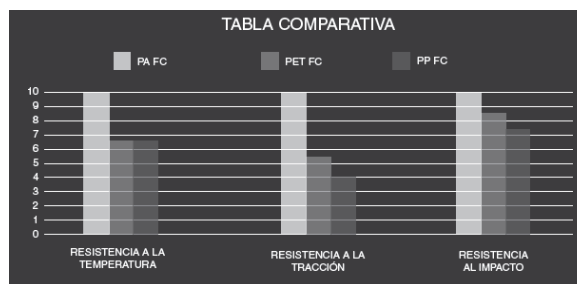


Figura 43. Tabla comparativa entre distintos materiales con fibra de carbono. [23]

4.3.4. Características de la máquina de fabricación aditiva empleada.

La impresión 3D se encuentra dentro de la llamada fabricación aditiva o por adición de capas. Dentro de este tipo de fabricación, en este proyecto utilizaremos el modelado por deposición fundida, por tanto, usaremos una máquina de FDM. Concretamente, la máquina que usaremos para la fabricación de las probetas de esta primera fase I experimental como de los casquillos en T de la fase II experimental será la DT LITE de Dynamical Tools, propiedad de la empresa *Smart Materials 3D*.

En el Trabajo Fin de Grado del compañero Pedro Herranz Colomina [3], que imprimió las mismas piezas en *Smart Materials 3D* pero con materiales plásticos básicos (ABS y PLA) y cuyos resultados tomaremos como referencia para comparar con dichos materiales, usó la impresora Ultimaker 2+, que podemos observar en la Figura 44:



Figura 44. Impresora Ultimaker 2+ de la empresa Smart Materials 3D.

Para comparar los resultados, como he comentado anteriormente, entre este trabajo y el realizado por el compañero, sería lógico imprimir en la misma impresora, con las condiciones lo más parecidas posibles a las que tuvo él con la fabricación de sus piezas, por lo que en un principio los parámetros de impresión serían los

mismos que definió en su proyecto (exceptuando la temperatura de impresión de los materiales) y la impresora a utilizar sería la Ultimaker 2+. No obstante, esto no ha sido posible. Tanto la imposibilidad de uso de la Ultimaker 2+ como la necesidad de hacer cambios en los parámetros de impresión harán que las condiciones no sean exactamente las mismas, pero no había otra opción. Dado que los materiales que se van a estudiar en el presente proyecto son muy diferentes a los que ensayó él, ABS y PLA, se tuvo que buscar una alternativa. En cuanto a la impresora (ya hablaremos más adelante de los cambios en los parámetros de impresión), sugirió que si se imprimía en la Ultimaker 2+ tendríamos varios problemas:

- En primer lugar, el filamento de PA CF no se podía fabricar con 2,85 mm de diámetro debido a su rigidez, por tanto, no se podía usar este material en esta impresora.
- En segundo lugar, el filamento de PET CF requiere una temperatura de impresión de 260-270 °C, estando en el límite de temperatura de la impresora, y podría ocurrir que la adhesión entre capas no fuera la correcta.

La solución a estos problemas fue realizar la fabricación de las piezas en otra impresora. En *Smart Materials 3D* disponían de otras dos impresoras que podían servir, la DT LITE de Dynamical Tools y la RAISE 3D PRO2 de RAISE3D. Se tomó la decisión de imprimir en la primera de ellas, la DT LITE, que podemos observar en la ilustración 45. En un principio, los resultados teóricamente no deberían variar de una impresora a otra.



Figura 45. Impresora DT LITE de Smart Materials 3D.

4.3.5. Características del ensayo a tracción y maquinaria.

El ensayo a tracción vendrá definido por la norma UNE ISO 527, donde se explica los principios generales para obtener las propiedades a tracción de los materiales plásticos y sus compuestos. El objetivo será el estudio del comportamiento y resistencia a tracción de la PA CF y del PET CF, así como el módulo de elasticidad en tracción para ambos materiales, con el ensayo de las probetas tipo hueso diseñadas.

A continuación, en la Figura 46, se muestra una gráfica de curvas típicas de esfuerzo frente a deformación de distintos tipos de materiales que nos ofrece la norma en uno de sus apartados. En ella podemos ver como cambia la curva desde un material frágil (curva a), que rompe a una deformación baja y sin fluencia, a un material blando (curva d) que romperá a unas deformaciones elevadas.

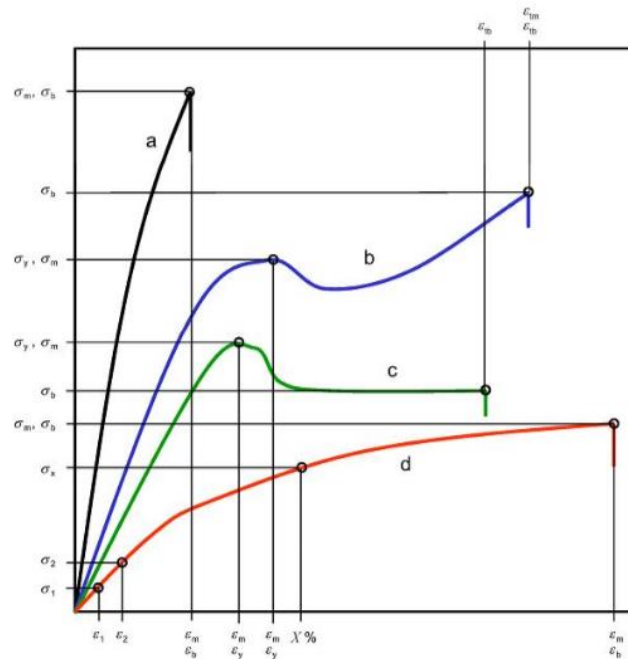


Figura 46. Curvas típicas de esfuerzo/deformación de distintos materiales.

La máquina que usaremos para el ensayo de tracción será la INSTRON 5567A de 30 KN de capacidad de carga que se encuentra en el laboratorio de Medios Continuos y Teoría de Estructuras de la Universidad de Jaén, donde realizaremos todos los ensayos.



Figura 47. Equipo del laboratorio para ensayo a tracción.

La realización del ensayo, según la norma UNE ISO 527, consistirá en colocar las probetas a lo largo de su eje longitudinal principal sujetas mediante unas mordazas de acero, como la que podemos ver en la parte izquierda de la Figura 48, y, a una velocidad constante, someterlas a tracción hasta que la probeta rompa o bien hasta que la carga o la deformación lleguen a un valor predeterminado. El software utilizado en la realización de los ensayos para definir los parámetros es el software *Blue Hill*, que tenemos en el ordenador conectado a la máquina. Lo primero que hay que hacer será crear un método nuevo con las características del ensayo que vayamos a utilizar.



Figura 48. Mordaza (izquierda) y base o soporte (derecha) de acero para ensayos.

La norma nos recomienda que la máquina pueda mantener las velocidades de ensayo mostradas en la Figura 49, dependiendo de su tolerancia:

Velocidad de ensayo v mm/min	Tolerancia %
0,125	± 20
0,25	
0,5	
1	
2	
5	
10	± 10
20	
50	
100	
200	
300	
500	

Figura 49. Velocidades de ensayo recomendadas.

En el software *Blue Hill* crearemos un método para nuestro ensayo conforme a la norma y las medidas de nuestras probetas. Deberemos medir en modo Extensión, definiendo una velocidad de ensayo de 1 mm/s , en el caso de las probetas tipo hueso, y de 2 mm/s para las probetas Tstub. Las velocidades fueron definidas así dado a que la máquina lo permitía y eran las más óptimas para que el ensayo no fuera ni demasiado corto ni demasiado largo. Un aspecto que queríamos definir en un principio también fue el de la precarga para ajustar el ensayo y tomar datos correctos, reduciendo el efecto talón lo máximo posible. Para ello, mediríamos con el pie de rey las probetas para calcular el área de su sección transversal, multiplicaríamos ese valor al límite elástico del material y le calcularíamos entre el 5 y el 10 por ciento. A este valor le tendríamos que sumar la carga que, por el peso de la mordaza superior, tenemos por defecto. Por tanto, habría que calibrar en un primer lugar la mordaza, viendo el valor que marca en el PC que indica su peso (y teniendo en cuenta que sube un poco más cuando se aprieta para sujetar la probeta) y sumarlo todo. Quedaría pues definida en el ensayo cuando coloquemos ese valor en el método que estamos creando. Dada la complejidad para poder calcularla, se acabó optando por obviarla y corregir el efecto talón, en caso de que apareciera, cuando se realizara el análisis de resultados. Por otro lado, para definir un límite de carga con el que terminar el ensayo de forma inmediata, lo haremos mediante un parámetro que se llama Sensibilidad, dentro del módulo de velocidad de carga. Nosotros hemos dejado definida una sensibilidad del 40%, es decir, que el ensayo empezará e irá registrando cargas, y si la carga en un momento determinado sufre una caída de un 40% la máquina para automáticamente el ensayo.

Por último, es necesario configurar los datos que nos va a exportar del ensayo. La captura de datos la haremos de forma manual y como criterio vamos a establecer que tome datos cada un segundo. Por tanto, el programa al finalizar cada ensayo nos va a devolver un archivo Excel con dos columnas, en una la carga y en otra el desplazamiento, con datos en un intervalo de un segundo como habíamos definido. No obstante, mediremos la deformación mediante DIC porque es mucho más preciso que los datos que nos proporciona la *INSTRON*. Para ello, a la vez que se

realiza el ensayo en la máquina de tracción, grabaremos con la cámara Basler una imagen por cada segundo, el mismo periodo de tiempo del que toma datos de carga y extensión la INSTRON, para poder luego casar ambos resultados.



Figura 50. Realización de los ensayos durante la fase I experimental.

4.3.6. Medidas y diseño CAD de las probetas 1BA.

Como se ha explicado en el anterior apartado 4.3.2, finalmente se fabricarán probetas normalizadas 1BA siguiendo las especificaciones marcadas por la norma ISO 527. Recordamos que las dimensiones se deberán ajustar a las medidas que se mostraron en la Figura 33.

Dado que uno de los objetos del presente proyecto es el de la comparación con los resultados obtenidos con las mismas piezas aunque fabricadas con materiales plásticos básicos, como son el ABS y el PLA, lo que haremos a la hora de escoger las medidas de nuestras probetas tipo hueso 1BA será tomar todas las medidas elegidas por Pedro Herranz Colomina en su Trabajo Fin de Grado [3] con el fin de que lo único que cambie sea el material empleado, ya que son sus

resultados los que disponemos para hacer una comparativa. Lo que se busca con esto es poder obtener la comparación más ajustada posible.

El plano correspondiente a las medidas de las probetas se incluye en el Anexo II: Planos.

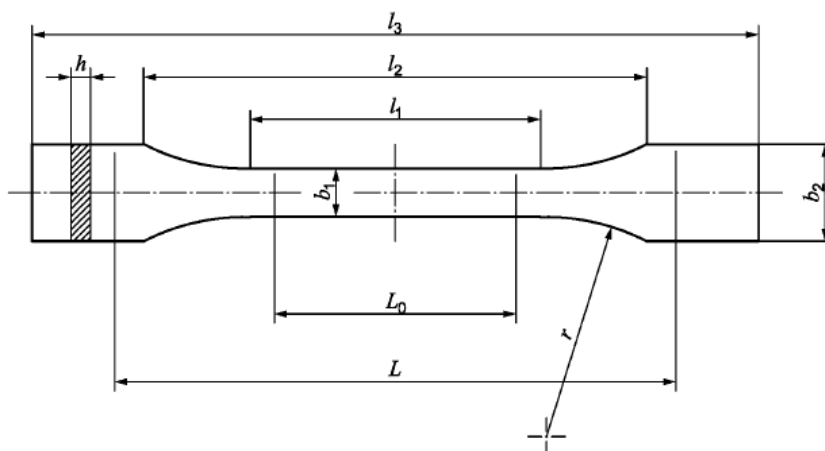


Figura 34. Geometría Probeta Tipo 1BA y 1BB según norma ISO 527-2.

Las dimensiones, por tanto, de las probetas tipo hueso 1BA elegidas para la realización de ensayos son las siguientes:

l_3 Longitud total $\rightarrow 75 \text{ mm}$
l_1 Longitud de la parte estrecha de caras paralelas $\rightarrow 30 \text{ mm}$
r Radio $\rightarrow 40 \text{ mm}$
l_2 Distancia entre las partes anchas de las caras paralelas $\rightarrow 58 \text{ mm}$
b_2 Anchura de los extremos $\rightarrow 10 \text{ mm}$
b_1 Anchura de la parte estrecha $\rightarrow 5 \text{ mm}$
h Espesor $\rightarrow 4 \text{ mm}$
l_0 Longitud de referencia $\rightarrow 25 \text{ mm}$
L Distancia entre mordazas $\rightarrow 60 \text{ mm}$

Tabla 2. Dimensiones probetas 1BA.

Codificaremos las probetas tipo hueso 1BA para diferenciarlas, dado que tenemos tres direcciones de impresión diferentes. Quedaran definidas como se muestra en la Tabla 3:

Código 1BA
Horizontal 1BA-H
De canto 1BA-C
Vertical 1BA-V

Tabla 3. Codificación probetas 1BA.

Posteriormente, se procedió a la realización del modelo CAD de la pieza mediante el software *Catia V.5* con el objetivo de obtener un archivo .stl, necesario a la hora de imprimir, ya que es el que genera el llamado G-Code de la impresión.

Para definir los parámetros de impresión se usará un software para impresión 3D, llamado Cura, donde se seleccionan las distintas propiedades. Una vez decididos todos los parámetros ya se puede obtener el G-Code y empezar a imprimir.

En las ilustraciones siguientes se puede observar cómo quedó el modelo CAD de la probeta 1BA y una imagen aclarativa de las tres distintas posiciones a las que se van a imprimir las probetas según la norma visualizadas desde Cura.

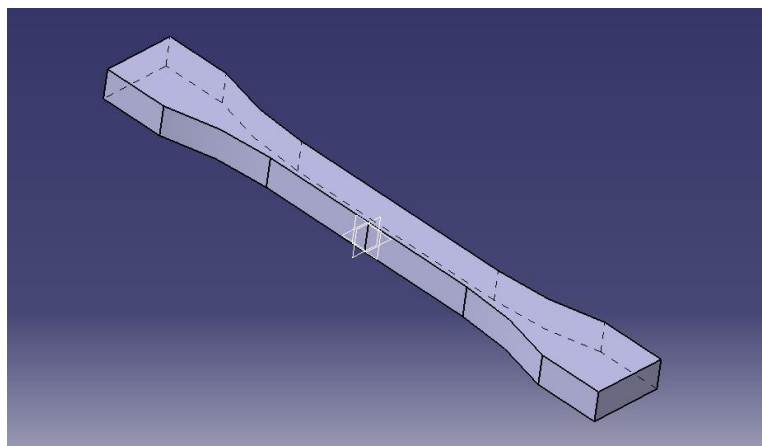


Figura 51. Diseño CAD Probeta tipo 1BA.

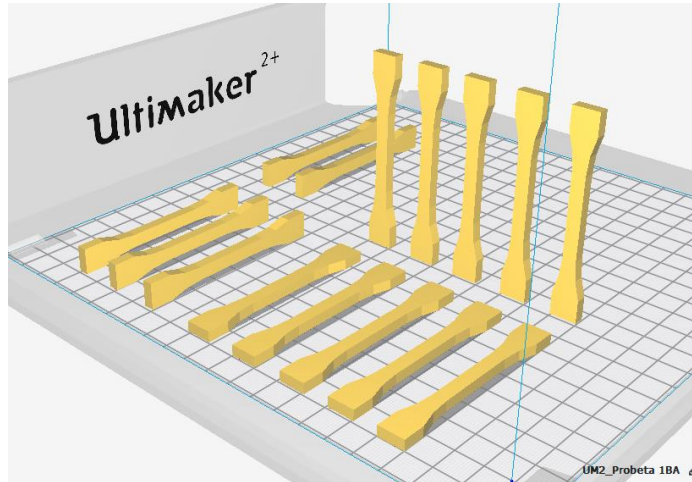


Figura 52. Simulación de impresión con Software Cura. Probetas tipo 1BA.

Las propiedades de impresión han sido elegidas por un profesional de *Smart Materials 3D*, con el que personalmente me he podido reunir para analizar y acordar dichos parámetros tras haber trabajado con el software Cura por mi cuenta, habiéndome familiarizado con dicho programa y habiendo probado distintas combinaciones de impresión con el objetivo de aprender el funcionamiento.

Durante el aprendizaje de este nuevo software he podido descubrir que algunos de estos parámetros son recomendados o estándar, como por ejemplo la altura de capa o el diámetro de la boquilla de impresión, y otros que serán específicos del material que estemos imprimiendo, como pueden ser la temperatura de cámara y de la cama, la velocidad de impresión o la velocidad de ventilación. Los demás parámetros se irán escogiendo dependiendo de las propiedades que se quiera que tenga la pieza, pero eso ya queda en manos de la elección de quién esté diseñando la propia impresión.

Cabe destacar que, en un primer lugar, se iban a utilizar los mismos parámetros de impresión que utilizó Pedro Herranz Colomina en su Trabajo Fin de Grado [3], pero se tuvieron que ajustar al cambio de impresora y a los materiales que se están usando en el presente proyecto. En primer lugar, y aún habiendo ajustado algunos parámetros dado el cambio de impresora y de los nuevos

materiales, hubo bastantes problemas por parte de *Smart Materials 3D* a la hora de imprimir dada la complejidad de los materiales que estamos utilizando. Después de numerosos intentos de imprimir con una altura de capa de 0.2 mm y una boquilla de impresión de 0.4 mm, parámetros que estaban dando demasiados problemas porque se atascaba la boquilla e hizo que el proceso fuera demasiado lento debido al contenido en fibras del material y haciendo que muchas de las impresiones que lanzaban se acababan obturando y perdiendo todo el trabajo realizado, se decidió optar por un cambio de boquilla y de altura de capa. Se perdió mucho tiempo antes de realizar este cambio, algo así como un mes y medio, porque la empresa no disponía de una boquilla de mayor diámetro y, por tanto, continuaba con intentos fallidos usando la boquilla anterior. Una vez que se compró una boquilla más grande, de 0.6 mm, me propusieron volver a empezar a imprimir desde cero con esa boquilla y con una altura de capa de 0.3 mm para tener un trabajo más fluido, opción que se eligió finalmente para tardar menos tiempo y evitar que siguieran sucediendo los continuos errores anteriores con los que se había perdido demasiado tiempo y trabajo en vano.

Los parámetros de impresión elegidos finalmente se muestran a continuación, en la tabla 4:

		MATERIALES	
		PA FC	PET FC
Calidad	Altura de capa	0,3 mm	0,3 mm
	Altura de capa inicial	0,3	0,3
	Ancho de capa inicial	100%	100%
Perímetro	Grosor de la pared	0,8	0,8
	Grosor superior/inferior	0,8	0,8
	Grosor superior	0,8	0,8
	Grosor inferior	0,8	0,8
Relleno	Densidad de relleno	100%	100%
	Patrón de relleno	Grid	Grid
Material	Temperatura de impresión	200°	200°
	Temperatura de la placa de impresión	0°	270°
	Diámetro boquilla	0.6 mm	0.6 mm
	Flujo		
	Habilitar retracción	✓	✓

Velocidad	Distancia de retracción	0.50 mm	0.50 mm
	Velocidad de retracción	20 mm/s	25 mm/s
	Velocidad de impresión	50 mm/s	40 mm/s
	Velocidad de movimiento eje X/Y	80 mm/s	80 mm/s
	Velocidad de movimiento eje Z	15 mm/s	15 mm/s
Refrigeración	Usar falda/borde	✓	✓
	Refrigeración	✓	✓

Tabla 4. Parámetros de impresión probetas tipo hueso.

El relleno del material se decidió hacer en dirección horizontal como puede verse en la siguiente Figura 53. Normalmente se le suele poner un ángulo, generalmente de 45°, para la rejilla pero al ser nuestro caso en que las probetas se fabrican con una densidad de relleno del 100% no es necesario definir ese ángulo, puede hacerse de esta forma.

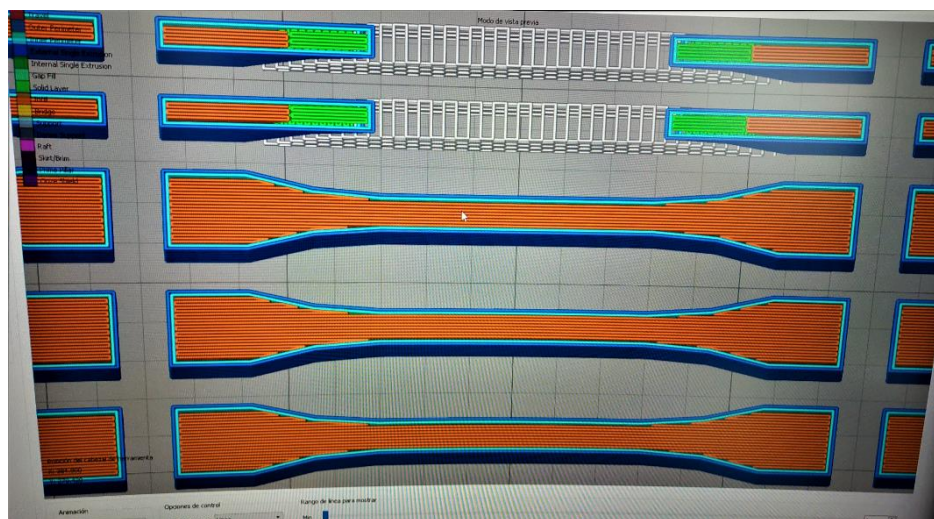


Figura 53. Vista previa del relleno de las probetas 1BA.

En la anterior ilustración podemos observar también cómo para las probetas que se fabrican de canto es necesario crear un pequeño soporte en la parte inferior, soporte que será retirado una vez terminada la impresión.

4.3.7. Desarrollo de la fase de impresión en *Smart Materials 3D*.

Smart Materials 3D Printing es una empresa situada en Alcalá la Real (Jaén) que se dedica a la fabricación de filamentos para la impresión 3D. Gracias a la total disposición de la empresa, la fabricación de todas las probetas corría por su cuenta. Cabe destacar que, como ya se ha comentado anteriormente, los materiales utilizados fueron creados por esta empresa, ya que su objetivo principal es sacar al mercado nuevos hilos para fabricación aditiva.

La empresa se sitúa en un polígono industrial, teniendo entre sus instalaciones una zona de oficina, donde tienen los distintos puestos de trabajo y las impresoras 3D, además de una zona de almacén.



Figura 54. Sede de Smart Materials 3D, en Alcalá la Real (Jaén)

Junto con los trabajadores de la empresa, con los que se tuvo una constante comunicación durante todo el proceso de fabricación, se tomaron decisiones en cuanto al cambio de impresora como a los cambios necesarios de las propiedades de impresión. Según su criterio, los cambios eran necesarios ya que lo requerían los materiales que estamos estudiando y los problemas que fueron surgiendo.

El desarrollo de la impresión tuvo más problemas de los que inicialmente estaban previstos, ya que principalmente por el tamaño de la boquilla de impresión

que estaban utilizando inicialmente, el material se atascaba, impidiendo imprimir con rapidez. Dado a este inconveniente, el plazo de fabricación de las probetas se alargó bastante más.

El hecho de poder disponer de una boquilla de mayor diámetro permitió que la impresión de las piezas comenzara con normalidad. En la siguiente Figura 55 se puede observar el proceso de fabricación de las probetas tipo hueso para las tres direcciones principales de impresión:

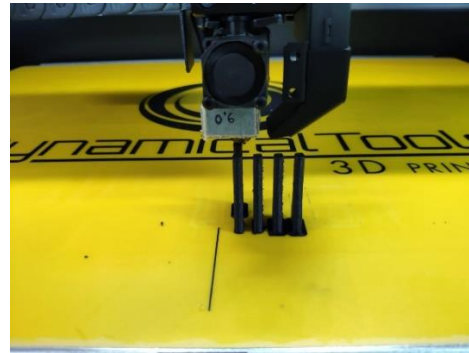
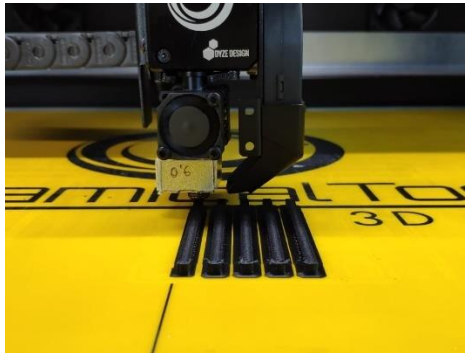
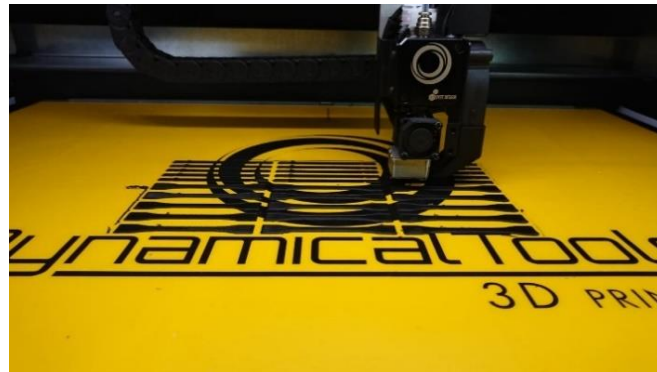


Figura 55. Impresora DT LITE durante la impresión de las probetas de la fase I en todas las direcciones.

Finalmente se terminó el proceso de fabricación y, a pesar de los inconvenientes surgidos, los acabados fueron muy buenos y se procedió a continuar con la impresión de las probetas Tstub para nuestra segunda fase del programa experimental.

4.3.8. Resultados de caracterización del material.

A continuación, se mostrarán los resultados obtenidos tras los ensayos experimentales de las probetas tipo hueso, con el objetivo de la caracterización del material.

Una vez ensayadas las probetas, se obtuvieron los resultados casando por un lado la toma de datos de carga procedentes de la máquina de tracción (a una velocidad de ensayo de 1 mm/s) con los resultados de DIC, dándonos datos de deformación.

Para calcular la deformación longitudinal en la probeta se utilizó un extensómetro en Vic 2D (Figura 56), y posteriormente se procesaron todas las imágenes hasta obtener las deformaciones sufridas durante su ensayo para cada una de las probetas. El proceso completo se puede consultar en el Anexo I: Vic 2D.

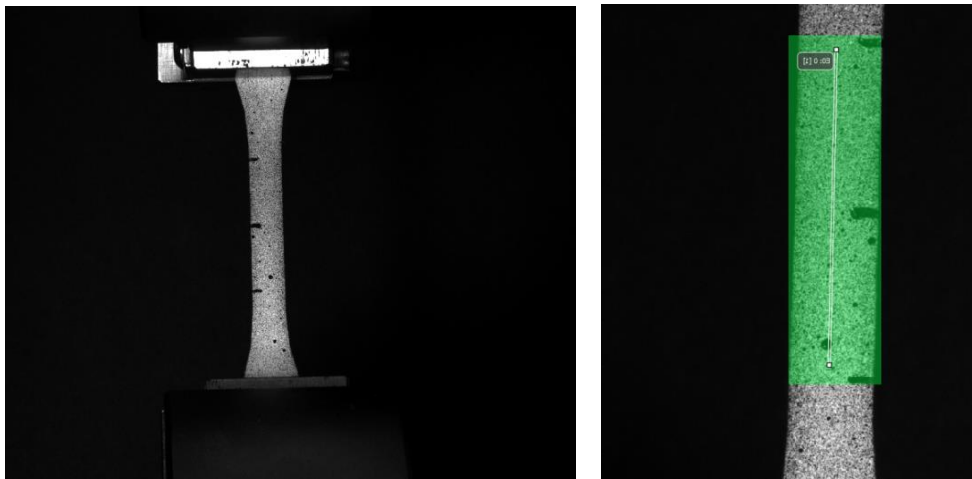


Figura 56. Probeta tipo hueso y extensómetro en Vic 2D.



Figura 57. Probetas tipo hueso una vez ensayadas.

Para completar la caracterización del material, y también utilizando Vic 2D, se procedió al cálculo del coeficiente de Poisson, representando las deformaciones en los ejes longitudinal y transversal de la probeta. Dicho proceso se detalla en el apartado 6.2.4.

Las curvas Tensión-Deformación obtenidas, y que se muestran a continuación, son el producto de realizar una curva media de los resultados de cada grupo de 8 probetas por cada dirección. Tanto en PA CF como en PET CF se puede apreciar la diferencia entre curvas dependiendo de la dirección de impresión dado a que no existe isotropía en los materiales estudiados.

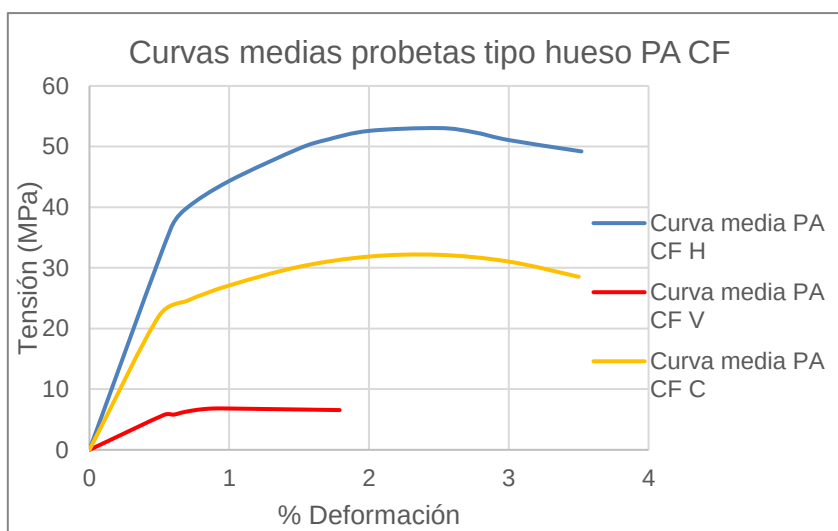


Figura 58. Curvas medias de caracterización de PA CF.

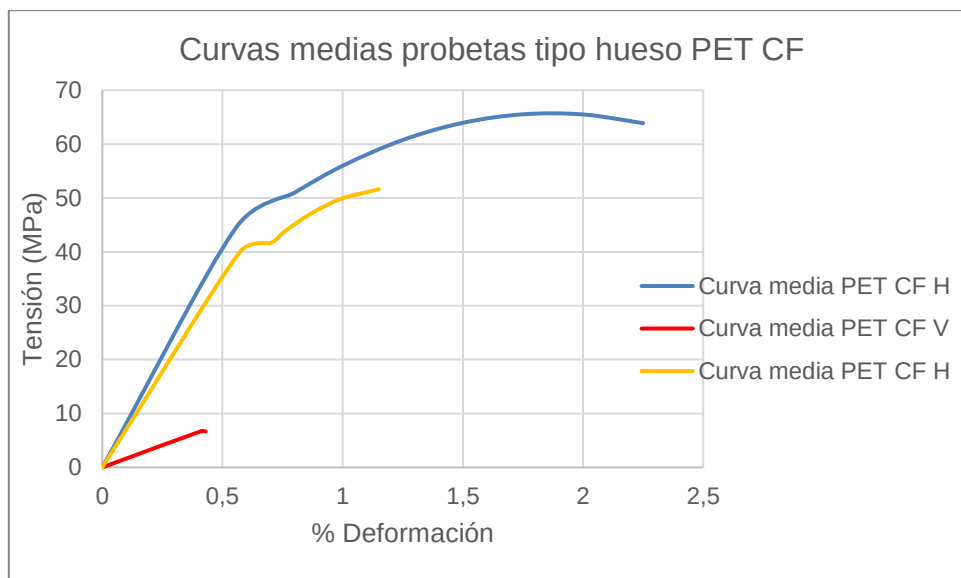


Figura 59. Curvas medias de caracterización de PET CF.

4.4. Fase II experimental. Tstub.

En esta segunda fase del programa experimental nos centraremos en el diseño y fabricación de las probetas Tstub una vez caracterizados los materiales en la anterior fase.

4.4.1. Normativa fase II.

La norma consultada para esta segunda fase del programa experimental será el Eurocódigo 3 [1], donde encontraremos todo lo relacionado al diseño de las Tstub.

4.4.2. Diseño de las Tstub. Dimensiones, ensayo de tracción y útiles.

Para la elección de las dimensiones de las probetas Tstub haremos uso del Eurocódigo 3 [1] para uniones de aceros estructurales. Esta parte del programa experimental consistirá en el diseño y fabricación de dieciocho T equivalentes, siendo nueve fabricadas de PA CF y otras nueve de PET CF. Las dimensiones de todas las Tstub serán las que definamos para todos los casos, con la única variación del espesor de las mismas. Ensayaremos anchos con una dimensiones de 15, 25 y 35 mm, tres de cada uno por cada material.

Las dimensiones de las Tstub quedarán definidas tomando como referencia un perfil IPE 200, el cual se ha partido por la mitad, con lo cual la altura de la T-stub será igual a la mitad del perfil IPE 200.

El objetivo será la comparación en un primer lugar del comportamiento de las Tstub con los tres espesores distintos que hemos seleccionado, y en un segundo lugar de los resultados entre el ensayo de las Tstub fabricadas en 3D con el Eurocódigo 3 [1] y con un modelado en elementos finitos mediante el software *Abaqus Cae*.

El perfil de la T equivalente se muestra en la Figura 22 que se muestra a continuación:

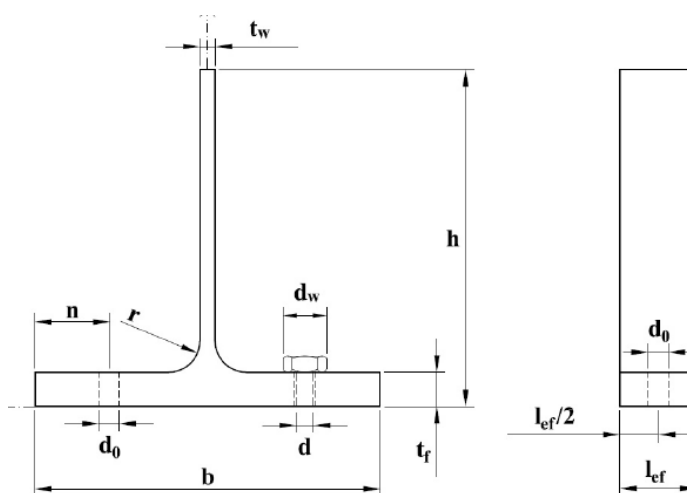


Figura 22. Perfil Tstub. Dimensiones. [2]

Las dimensiones quedan definidas, como se puede ver la ilustración, por una serie de parámetros. En primer lugar, para definir las dimensiones del alma y del ala de la T-stub tenemos b como el ancho, h como la altura, t_w como el ancho del alma, t_f como el ancho del ala y r como el radio de la curvatura entre el alma y el ala. Por otro lado, para definir los agujeros para el tornillo como el tornillo en sí tendremos otra serie de parámetros donde encontramos d_0 como el diámetro del agujero, n como la distancia que hay desde el extremo del ala hasta el punto medio del agujero,

d como el diámetro del tornillo y d_w como el diámetro de la cabeza del tornillo. Por último se define l_{ef} como el ancho de la Tstub.

Las dimensiones serán las mostradas en la Tabla 5:

Dimensiones Tstub
$b = 100 \text{ mm}$
$h = 100 \text{ mm}$
$t_w = 5,6 \text{ mm}$
$t_f = 8,5 \text{ mm}$
$r = 12 \text{ mm}$
$t_f = 15; 25; 35 \text{ mm}$

Tabla 5. Dimensiones T equivalente.

En cuanto a los tornillos a utilizar, se comprarán 50 tornillos de acero de métrica 5 con grado 8.8. La dimensión del agujero, d_0 , se calcula, según la norma EN 1090-2:2008, en función de d , reflejadas en la Tabla 6 que se muestra a continuación.

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

Tabla 6. Norma EN 1090-2:2008 para diámetro d .

Dimensiones Tornillos
$d = 5 \text{ mm}$
$d_0 = 6 \text{ mm}$
$n = 5 \text{ mm}$
$d_w = 12 \text{ mm}$

Tabla 7. Dimensiones Tornillos.

El ensayo se realizará en la máquina de ensayo a tracción, al igual que para las probetas de la primera fase experimental. Las piezas se sujetarán por el alma a la mordaza de acero superior de la máquina y, por otro lado, irán atornilladas a una

base de acero o soporte rígido, la cual sí va unida a la mordaza de la parte de abajo de la máquina.



Figura 48. Mordaza (izquierda) y base o soporte (derecha) de acero para ensayos.

El soporte rígido de acero es una pieza que ya estaba fabricada anteriormente del comienzo del desarrollo de este proyecto. Como lo que fabricamos mediante impresión 3D es solamente una de las dos partes que componen la unión Tstub, la función de este soporte rígido es simular la otra parte que falta para completar la unión atornillada.



Figura 60. Base o soporte de acero para ensayos de la fase II.

Para la sujeción de la Tstub a la mordaza de acero se necesitarán también 50 arandelas de 5 mm de diámetro interior y 50 tuercas del mismo material. La importancia de utilizar este tipo de tornillos es esencial para que resistan lo suficiente durante el ensayo de tracción.



Figura 61. Tornillo, tuerca y arandela utilizados para el ensayo.

Las piezas tuvieron que ser tratadas con pintura anteriormente al ensayo para el procesado con DIC. Para ello, se aplicó una primera capa de pintura blanca y, una vez seca, se aplicó un moteado de pintura negra por toda la superficie.



Figura 62. Proceso de pintar las probetas para la realización del ensayo.

Una vez colocada la pieza correctamente en la mordaza y atornillada al soporte inferior, la pieza a ensayar se encuentra como se puede ver en la Figura 63, preparada para comenzar el ensayo.



Figura 63. Colocación de la probeta T-stub en la máquina para realizar el ensayo.

4.4.3. Fabricación de las Tstub.

La fabricación de los casquillos en T será encargada, al igual que las probetas tipo hueso de las que hablamos en la fase I del programa experimental, a la empresa *Smart Materials 3D*. De igual forma que ocurrió con las probetas, los parámetros de impresión serán elegidos por un profesional de la empresa contando con mi colaboración. No obstante, el diseño CAD de las mismas sí corría por mi cuenta, tanto como la obtención del posterior formato .stl para enviar a la empresa.

En la Figura 64 se puede observar el diseño CAD de las Tstub, realizadas mediante el software Catia V.5 para los tres diferentes longitudes efectivas l_{ef} (espesor de la pieza) que definimos anteriormente como 15, 25 y 30 mm.

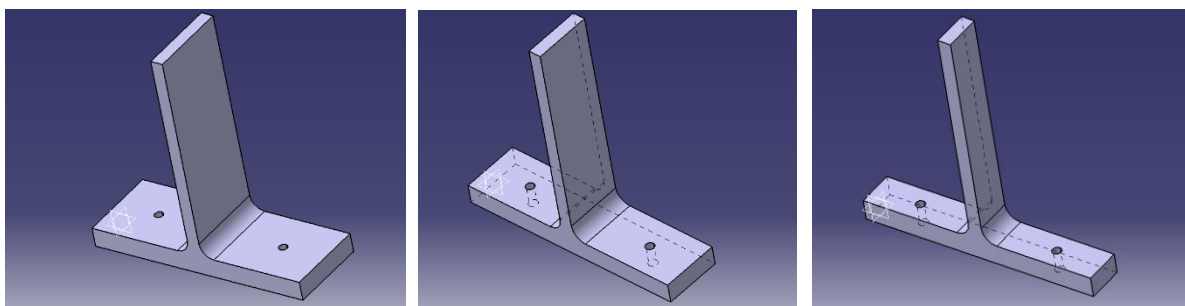


Figura 64. Diseño CAD de las probetas Tstub de 35, 25 y 15 mm de ancho.

Al ser fabricadas con los mismos materiales que las probetas de la fase I experimental, los parámetros de impresión no han cambiado en esta nueva fase II. Estas Tstub se imprimirán con una densidad de relleno del 100%, ya que lo que nos interesa es comprobar la resistencia de la unión, y con un patrón de rejilla de 45°. Cabe preguntarse, no obstante, en qué posición es más favorable colocar la T.

Se imprimirán todas las Tstub en dirección horizontal, como se puede ver en la Figura 65. Al hacer una pequeña simulación de impresión en Cura, se deduce que el tiempo empleado en imprimirlas en dirección vertical sería prácticamente el mismo, incluso más, luego se decidió imprimirlas en esta dirección. Por otro lado, el hecho de imprimir con 100% de densidad de relleno, el tiempo se incrementa bastante. También se decidió imprimirlas en esta posición porque el acabado y la resistencia de dichas piezas es mucho mejor si se imprimen en horizontal que en cualquier otra, visto lo ocurrido con las probetas tipo hueso.

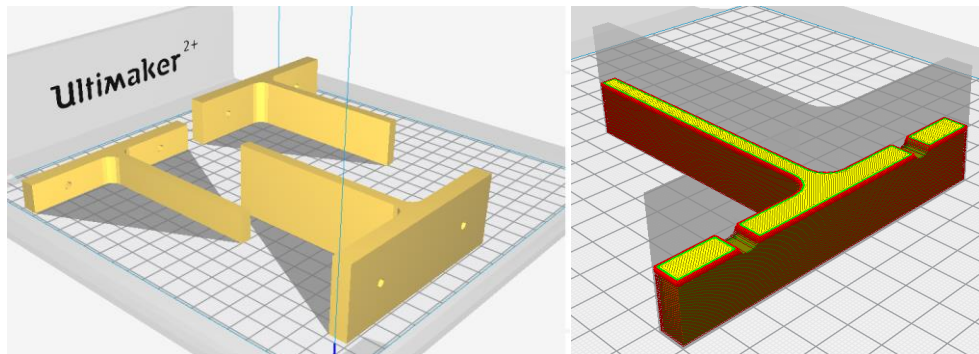


Figura 65. Simulación Software Cura Tstub.



Figura 66. Probetas Tstub para Fase II experimental en el laboratorio.

4.4.4. Obtención de resultados experimentales. Tstub.

De la misma forma que con las probetas tipo hueso de la primera fase experimental, para obtener las curvas Fuerza-Desplazamiento de las T equivalentes se usarán datos de fuerza medidos por la máquina de tracción (a una velocidad de ensayo de 2 mm/s) y datos de desplazamiento con DIC mediante Vic 2D en el mismo intervalo de tiempo.

En primer lugar, para el procesado con DIC, será necesario mallar la probeta tal y como observamos en la Figura 67.

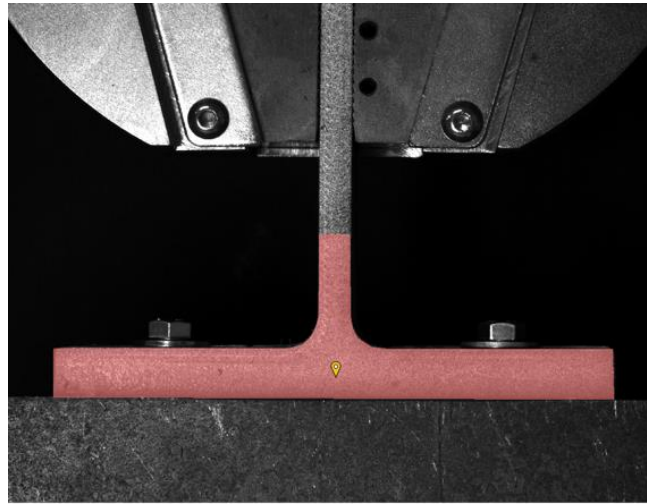


Figura 67. Mallado de una Tstub en Vic 2D.

Lo que necesitamos obtener en esta ocasión será el desplazamiento de un punto en concreto, situado en el centro de la probeta en su parte inferior, a lo largo del ensayo. Por tanto, se coloca dicho punto en el lugar deseado y se procesan resultados, graficando el desplazamiento producido respecto al tiempo.

Como se mostrará en el apartado 6.3.7, se buscará representar gráficamente la localización de las rótulas plásticas en cada una de las probetas. Para ello, con Vic 2D, se tuvo que obtener la deformación de Von Misses a lo largo de una línea durante el ensayo, proceso que se detalla en dicho apartado.

5. ANÁLISIS NUMÉRICO. SIMULACIONES EN ELEMENTOS FINITOS.

5.1. Descripción del modelo.

El objetivo de esta parte del proyecto será el desarrollo de simulaciones numéricas mediante el software *Abaqus Cae*. Este programa simula mediante elementos finitos, obteniendo así un análisis completo del comportamiento de nuestro modelo. Para poder hacer una comparación con los datos experimentales, lo que buscamos con estas simulaciones es obtener un campo de desplazamiento del modelo y observar sus similitudes con el que obtenemos mediante la técnica de correlación digital de imágenes durante los ensayos. Por último, se extrae la curva Fuerza-Desplazamiento del modelo Tstub y se compara con la curva experimental y el modelo simplificado del EC3 [1]. El modelo numérico utilizado para la realización de las simulaciones fue construido y parametrizado en Phyton por otro investigador del Departamento [4].

En este apartado describiremos al detalle el modelo utilizado en el programa y los pasos seguidos para conseguir con éxito el objetivo propuesto. Por último, encontraremos los resultados obtenidos una vez realizadas las simulaciones.

5.2. Descripción del modelo.

5.2.1. Elementos.

El modelo que vamos a estudiar se compone de tres partes, como podemos observar en la Figura 68. En primer lugar tenemos el perfil, que se corresponde con la Tstub una vez aplicada la doble simetría existente (horizontal y vertical), en segundo lugar el tornillo y, por último, una base rígida necesaria para considerar la simetría según el eje horizontal.

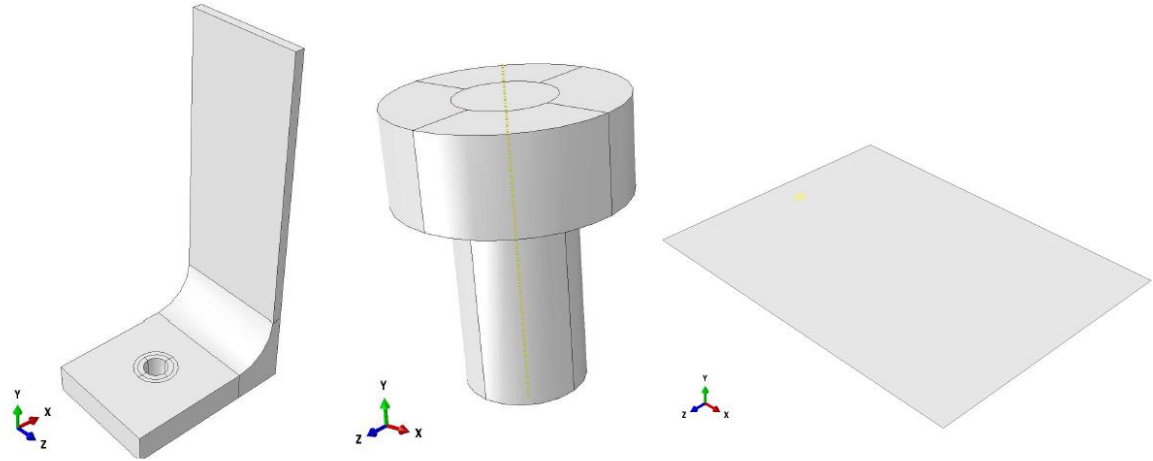


Figura 68. Partes del modelo Tstub para Abaqus. Perfil, tornillo y placa (de izquierda a derecha).

La unión de estas tres partes simulará nuestro modelo Tstub, siendo la composición del perfil más el tornillo la simplificación de la T de manera simétrica al modelo real, y la placa base simulará la forma en la que la T se atornilla a la mordaza fija por su parte inferior.

5.2.2. Mallado.

El mallado del modelo se realizó como vemos en la Figura 69, mostrada a continuación. Lo que se pretende conseguir con este tipo de malla es afinar más por la parte de unión del tornillo, con un mallado más fino, porque es una zona sensible a la rotura. Esto se consigue aumentando el número de nodos al definir la malla, con lo que obtenemos un resultado más preciso.

El mallado utilizado para nuestras simulaciones será de elementos hexaédricos de 8 nudos (C3D8R) para un análisis transitorio. El mallado será uno de los elementos que no se modificará de una simulación a otra, dado que, aunque se cambie el material o las dimensiones del modelo, no va a ser necesario cambiar el tipo de malla del mismo.

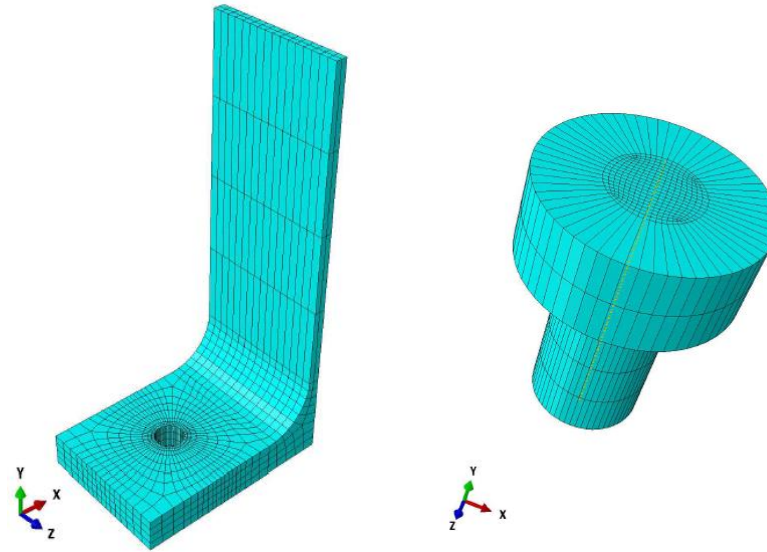


Figura 69. Mallado modelo Tstub para simulación.

5.2.3. Geometría.

El modelo Python parametrizado de Juan José Jiménez de Cisneros Fonfría [4] nos permite introducir en el código las dimensiones de nuestro modelo. Dichas dimensiones ya fueron elegidas detenidamente durante el desarrollo de la segunda fase del programa experimental, como se puede ver en el apartado 4.4.2. en las tablas 5 y 7.

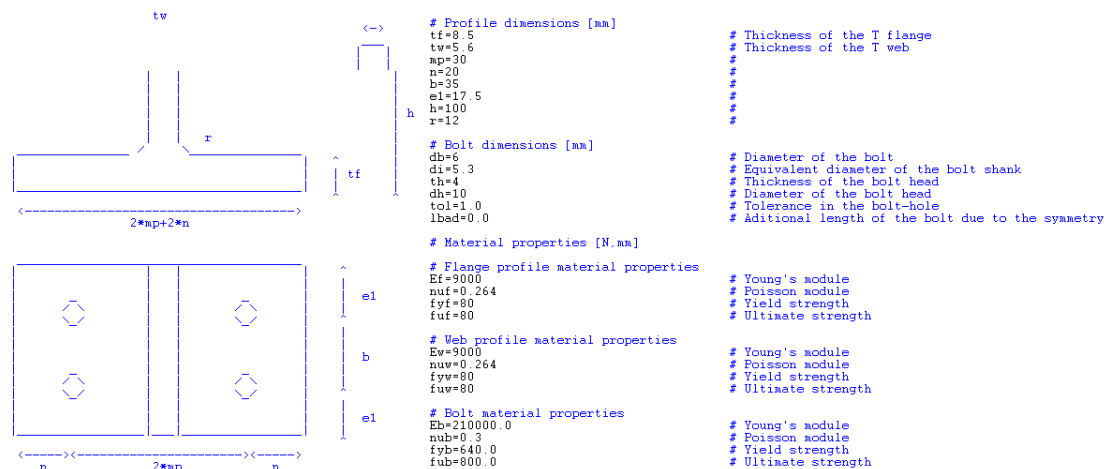


Figura 70. Definición de las variables el modelo en el código Python.

Al ejecutar el modelo, el ensamblaje del conjunto lo podemos observar en la siguiente Figura 71:

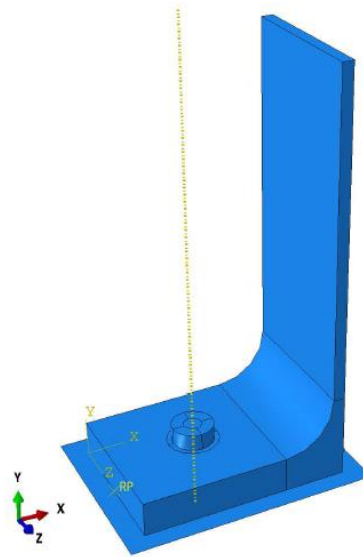


Figura 71. Assembly del modelo Tstub en Abaqus.

5.2.4. Boundary conditions.

El modelo que analizamos en la simulación es una simplificación del original, concretamente de un cuarto del real, gracias a la simetría que presenta respecto a los planos XY e YZ, como se puede observar en la Figura 72 [16]:

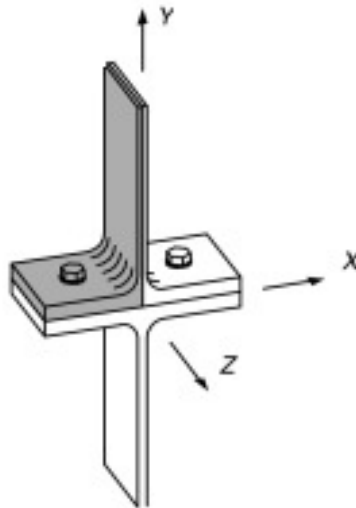


Figura 72. Modelo simplificado de la Tstub. [16]

Por tanto, para simular la simetría de la pieza en Abaqus es necesario crear una condiciones de contorno adecuadas, como se explican a continuación:

- Simetría respecto al plano medio del ala: Esta simetría se consigue creando una condición de contorno del tipo *Symmetry* / *Antisymmetry* / *Encastre* donde se restringe el desplazamiento y el giro en el eje Z, de tal forma que mantenga empotrada toda la cara del perfil del modelo (Plano XY). ($U_3=UR_1=UR_2=0$).

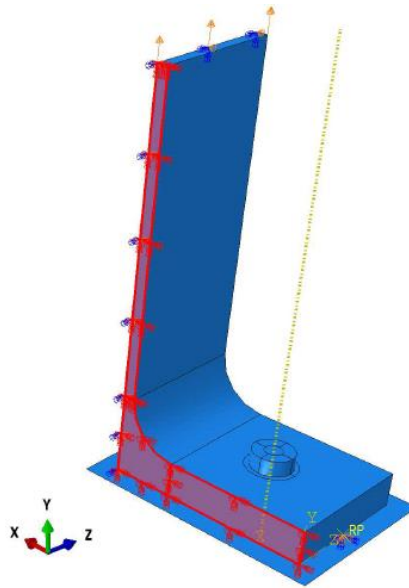


Figura 73. Profile symmetry L boundary condition.

- Simetría respecto al plano medio del alma: De la misma forma que en la condición anterior, someteremos a empotramiento toda el área que se corresponde al plano de simetría en XZ con la misma condición de contorno *Symmetry* / *Antisymmetry* / *Encastre* , pero esta vez lo que restringimos es el giro en el eje X y los desplazamientos en los ejes X y Z. ($U_1=UR_2=UR_3=0$)

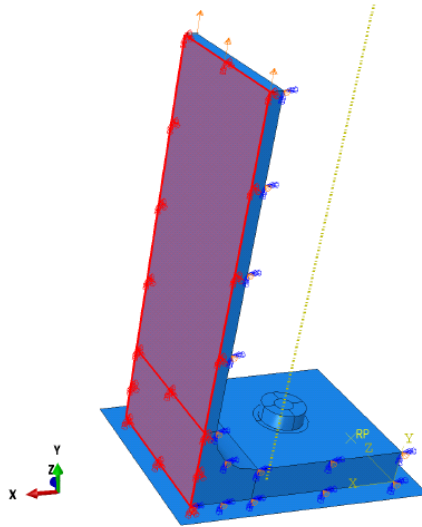


Figura 74. Profile symmetry web boundary condition.

- Aplicación de la carga: La aplicación de carga se hará en forma de desplazamiento. El área elegida será la que se puede ver en la Figura 75, que será por donde someteremos el modelo a tracción. Para hacer la simulación, crearemos una condición de contorno de tipo *Displacement / Rotation* y, en la dirección vertical, aplicar el desplazamiento en milímetros.

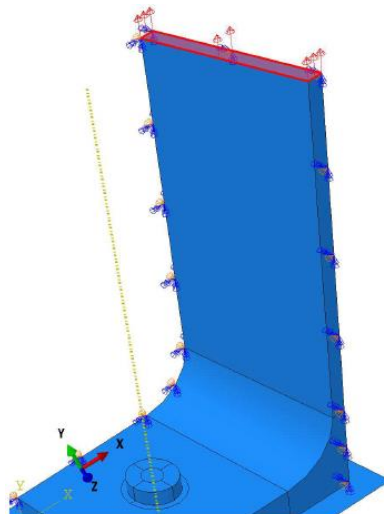


Figura 75. Load application boundary condition.

- Simetría en el tornillo: En este caso aplicaremos una condición de contorno de *Symmetry* / *Antisymmetry* / *Encastre* en el tornillo, restringiendo en este caso $U2=UR1=UR3=0$).

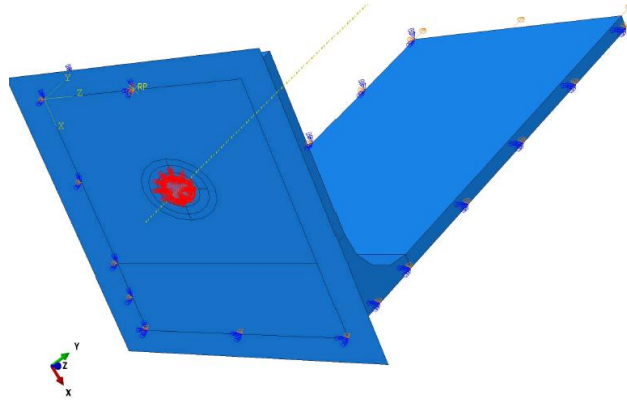


Figura 76. Bolt symmetry shank boundary condition.

La única condición de contorno que no se crea en el *step Initial* y que, por tanto, será la única que iremos modificando paso a paso, es la de aplicación de carga. Las demás se mantienen tal cual se han definido en el primer paso.

5.3. Simulaciones realizadas.

El análisis mediante elementos finitos será realizado con el objetivo de su posterior comparación con los resultados obtenidos experimentalmente. En los siguientes apartados se mostrarán resultados de los campos de desplazamiento vertical obtenidos con las simulaciones de una de cada grupo de tres probetas de igual espesor que componían la segunda fase del programa experimental. No obstante, la realización de las simulaciones se ha llevado a cabo para todos los especímenes, consiguiendo así un mayor número de resultados para una posterior comparación más detallada.

El estudio no se limita únicamente a las piezas fabricadas con PA CF y PET CF, sino que se ha ampliado también a la simulación de piezas de ABS y PLA, con

las mismas dimensiones y condiciones de contorno, únicamente con la variación en lo relativo al material.

La definición del *Step* con el que simularemos el ensayo será de gran importancia, dado que es necesario que cada segundo simulado coincida con cada segundo de toma de datos tomado tanto con DIC como con la máquina de tracción. Por tanto, será importante tener en cuenta que los ensayos de las Tstub se realizaron a 2 mm/s , con una toma de datos por cada segundo. Se establecerá como *Time period* de cada una de las simulaciones el tiempo correspondiente en el que haya tardado dicho espécimen en romper. Por último, ya que aplicaremos una carga de desplazamiento para simular la carga, el desplazamiento máximo en la dirección vertical será el obtenido de multiplicar nuestra velocidad de ensayo por el tiempo hasta romper.

5.3.1. Tstub ABS.

- Simulaciones *T-stub* ABS 15 mm de ancho.

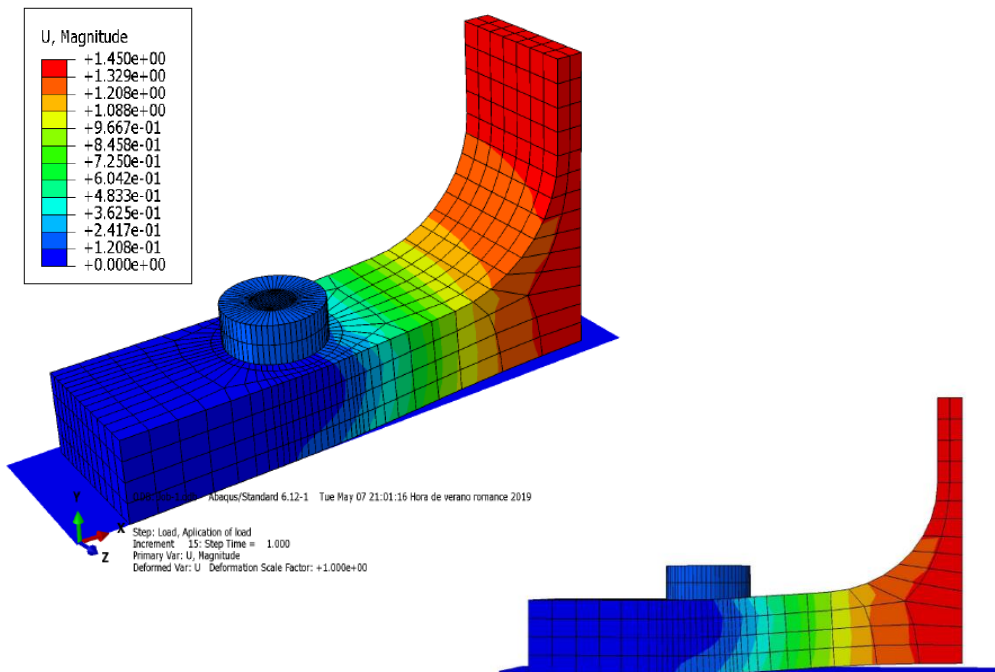


Figura 77. Simulación Abaqus ABS 15 mm.

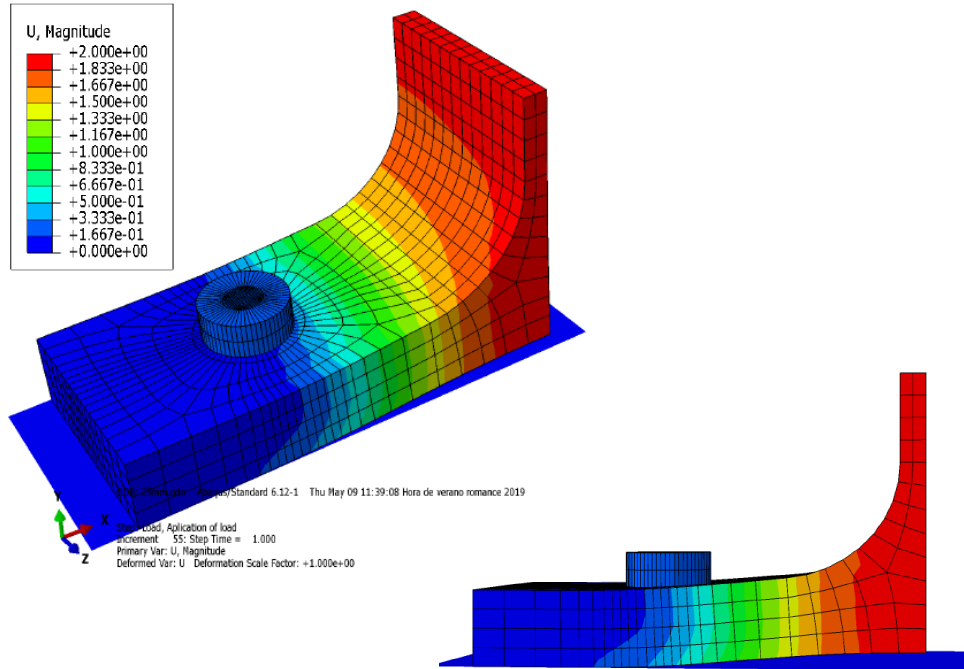
- Simulaciones *T-stub* ABS 25 mm de ancho.

Figura 78. Simulación Abaqus ABS 25 mm.

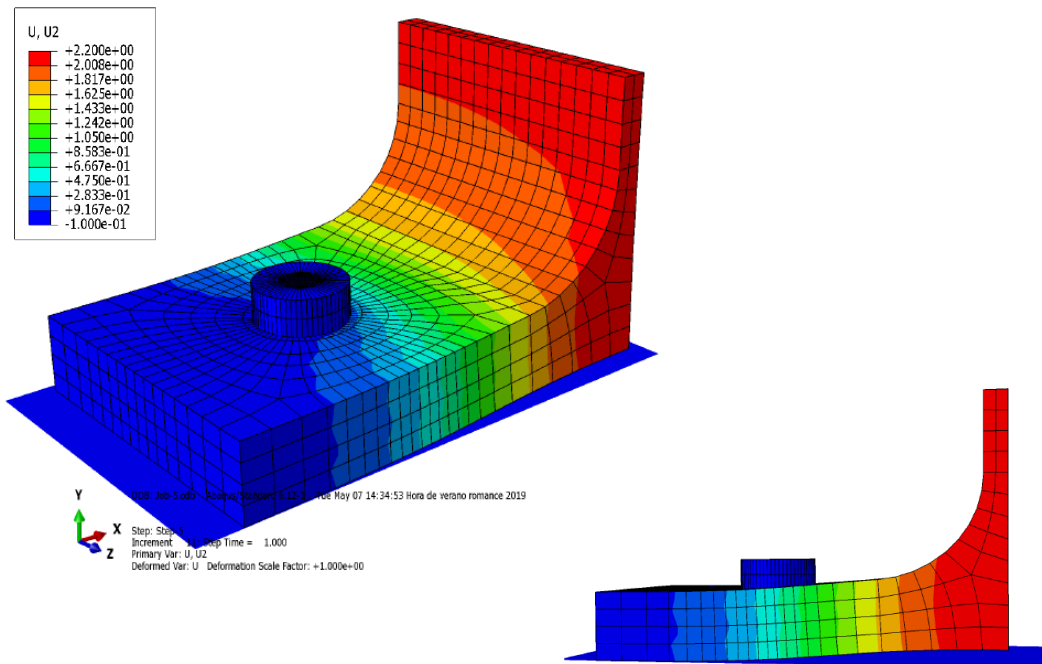
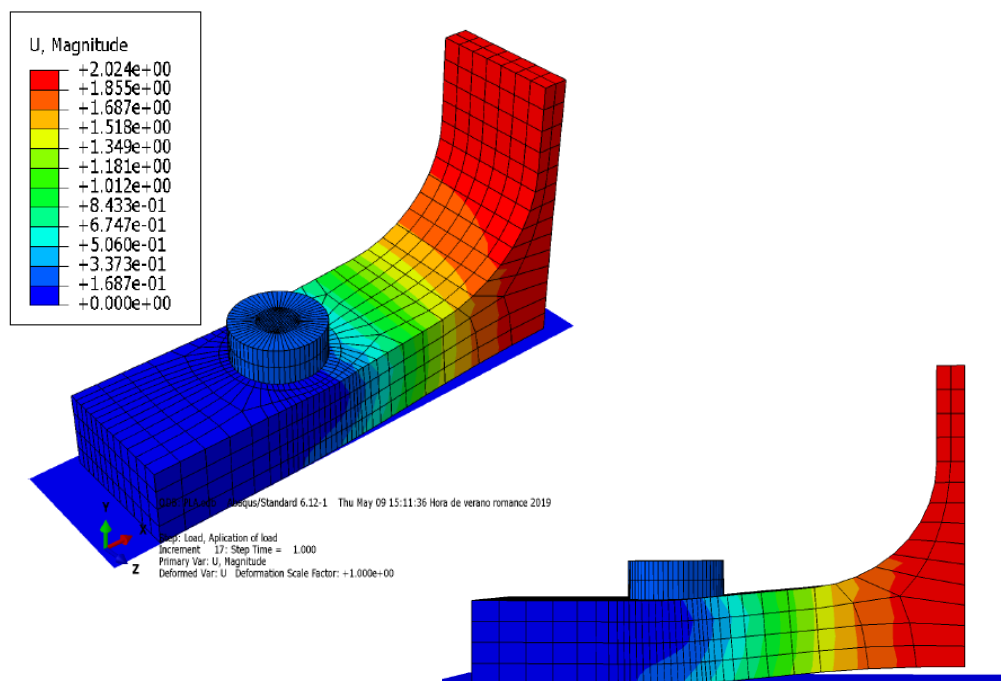
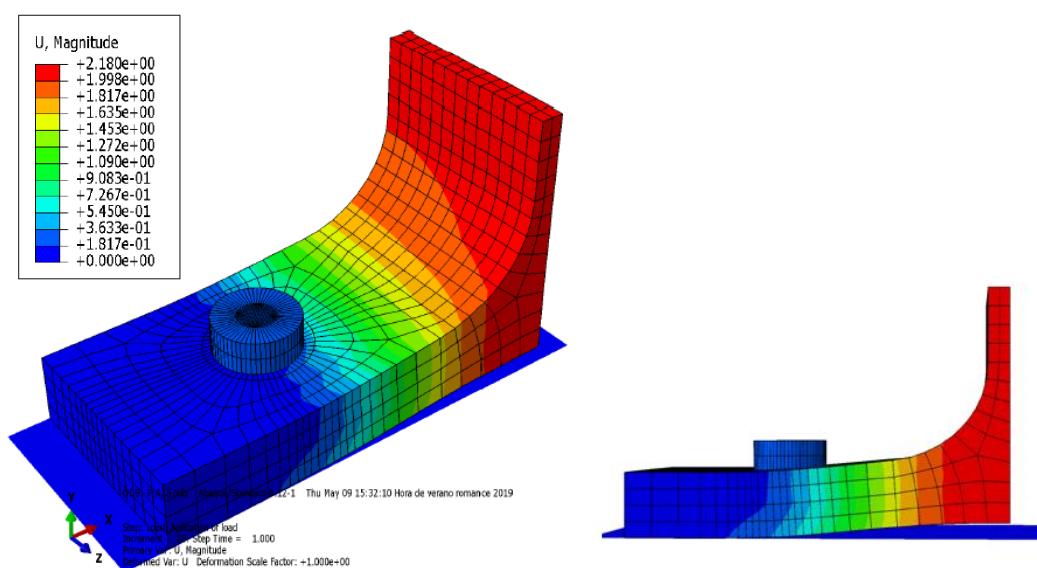
- Simulaciones *T-stub* ABS 35 mm de ancho.

Figura 79. Simulación Abaqus ABS 35 mm.

5.3.2. Tstub PLA.**- Simulaciones Tstub PLA 15 mm de ancho.****Figura 80. Simulación Abaqus PLA 15 mm.****- Simulaciones Tstub PLA 25 mm de ancho.****Figura 81. Simulación Abaqus PLA 25 mm.**

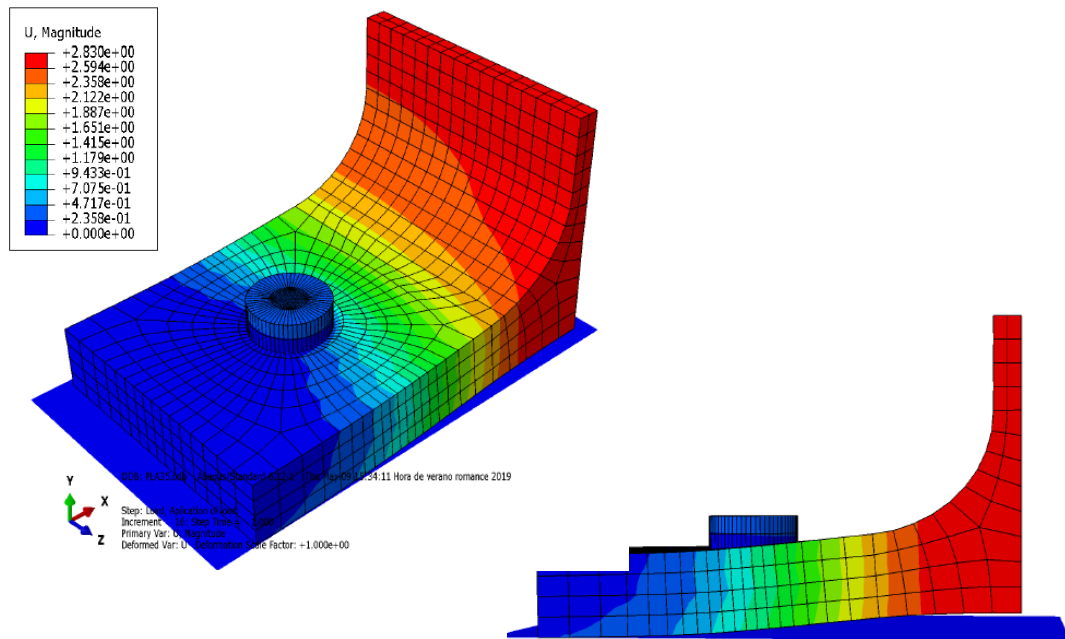
- Simulaciones Tstub PLA 35 mm de ancho.

Figura 82. Simulación Abaqus PLA 35 mm.

5.3.3. Simulaciones realizadas con PA CF y PET CF.

- Simulación Tstub PA CF 15.3

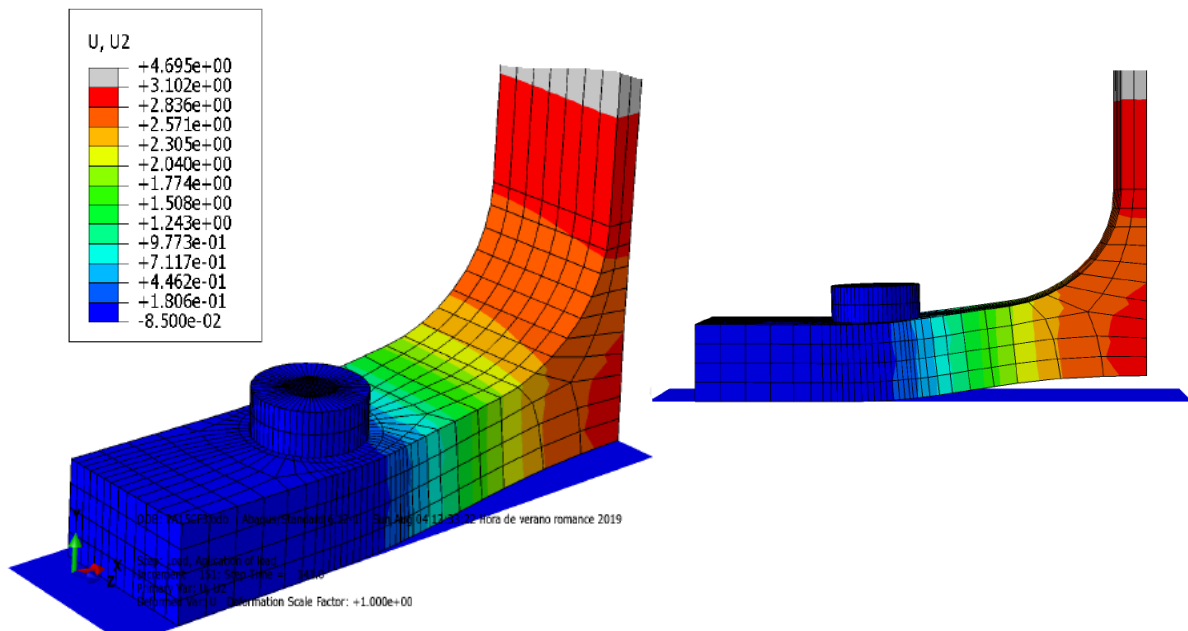


Figura 83. Simulación Abaqus PA CF 15.3.

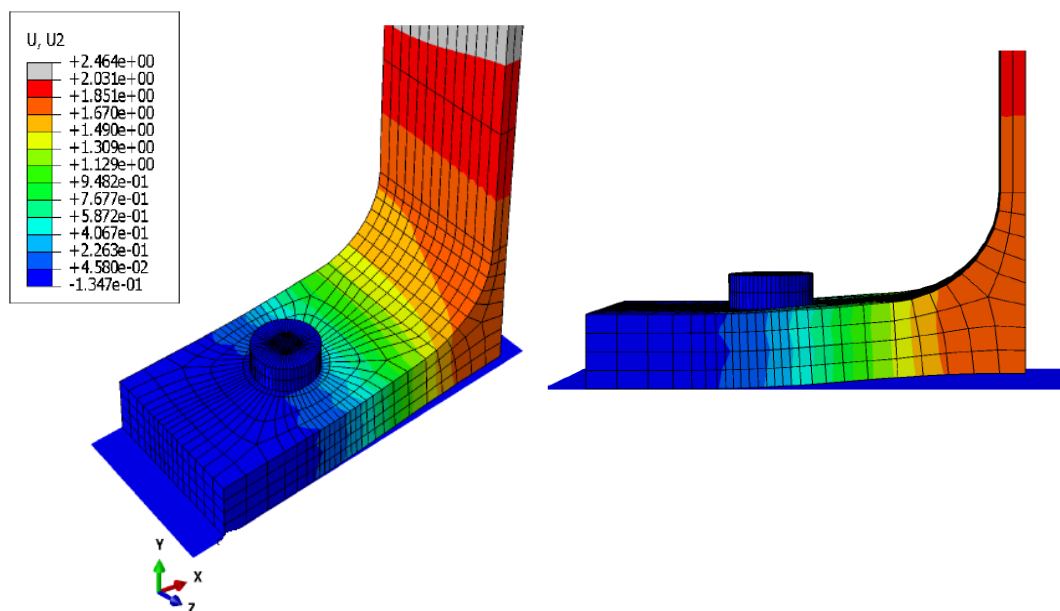
- Simulación Tstub PA CF 25.2

Figura 84. Simulación Abaqus PA CF 25.2.

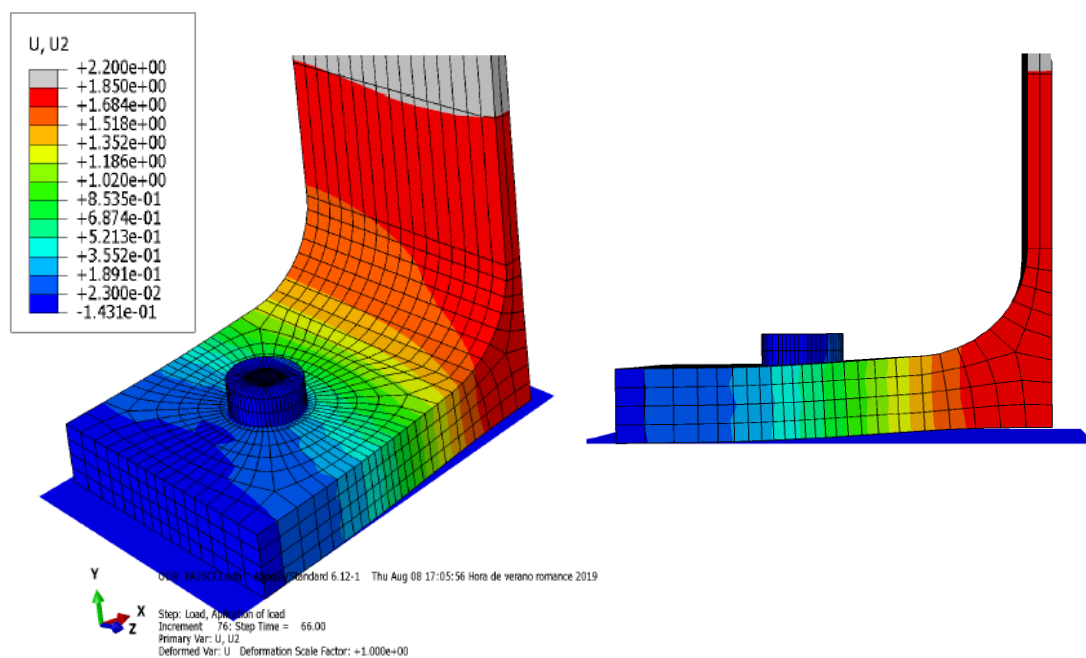
- Simulación Tstub PA CF 35.2

Figura 85. Simulación Abaqus PA CF 35.2.

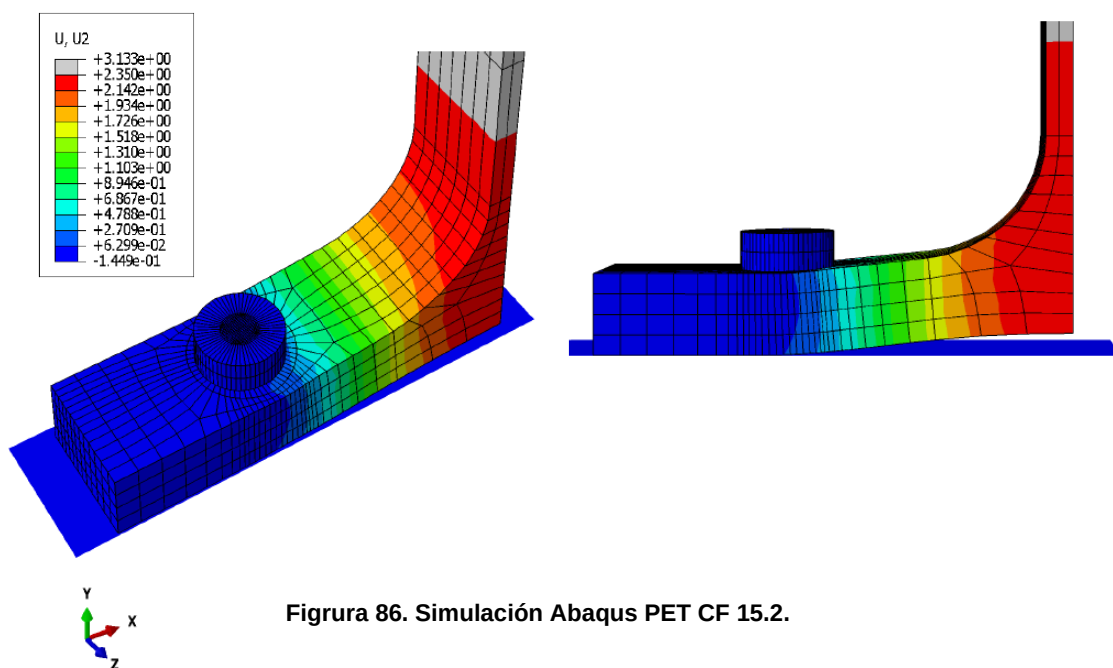
- Simulación Tstub PET CF 15.2

Figura 86. Simulación Abaqus PET CF 15.2.

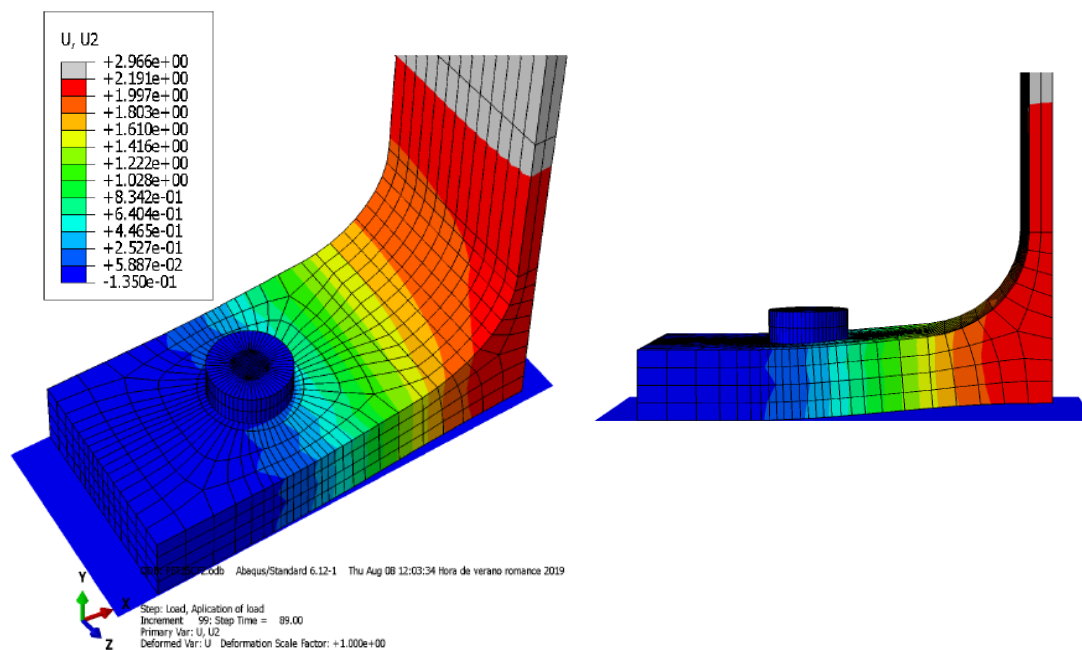
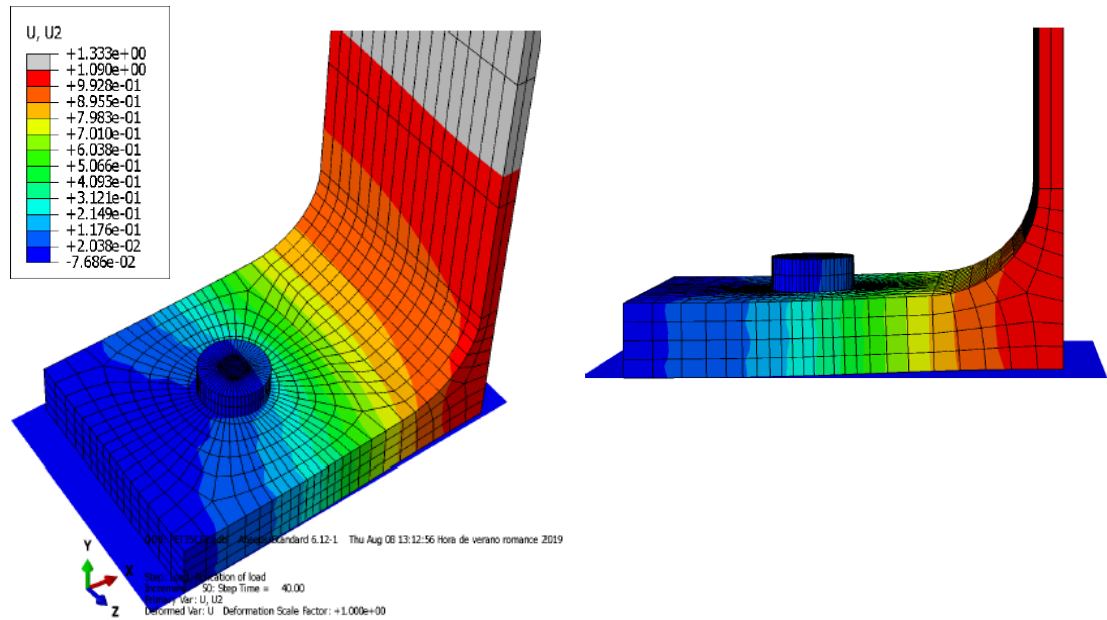
- Simulación Tstub PET CF 25.2

Figura 87. Simulación Abaqus PET CF 25.2.

- Simulación Tstub PET CF 35.2**Figura 88. Simulación Abaqus PET CF 35.2.**

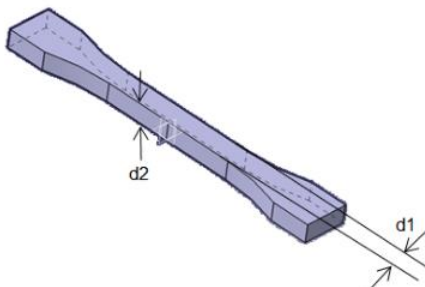
Para la obtención de unos resultados más precisos en el caso trabajos futuros, una modificación sería mejorar la forma de mallar el modelo, ya que en la zona de unión del alma con el ala del perfil en T tenemos otra rótula plástica, con lo cual es una de las zonas sensibles a la rotura. En las simulaciones realizadas, nos encontramos con que, aunque es un mallado fino, no es igual que en la zona del tornillo.

Por otro lado, como se puede observar, la zona del alma del perfil la tenemos con un mallado menos preciso porque no es necesario, lo que es un gran acierto por parte del modelo utilizado.

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

6.1. Tolerancias geométricas.

En primer lugar se ha comprobado que las dimensiones reales de las probetas una vez impresas verifican las tolerancias dimensionales establecidas por la norma.



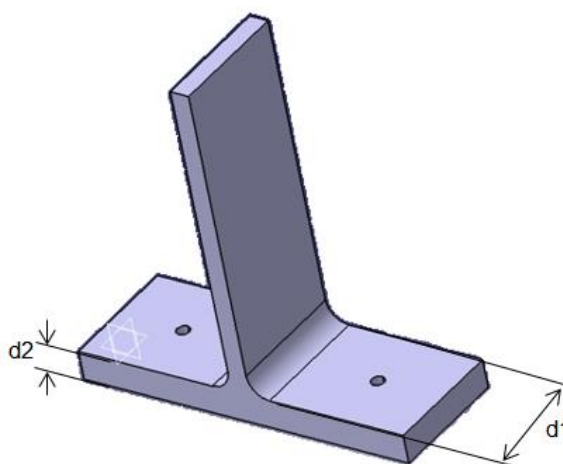
PACF		d1(mm)				d2 (mm)				ÁREA mm ²
Código	Material	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Media	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Media	
1BApa-H.1	PA-FC	6,08	6	6,1	6,06	4,1	4,12	3,98	4,07	24,64
1BApa-H.2	PA-FC	6,46	6,52	6,48	6,49	4,22	4,2	4,22	4,21	27,33
1BApa-H.3	PA-FC	6	6	5,98	5,99	4,06	4,1	4,1	4,09	24,49
1BApa-H.4	PA-FC	6,1	6,18	6,1	6,13	4,08	4,12	4,1	4,10	25,12
1BApa-H.5	PA-FC	5,96	5,98	6	5,98	4,04	4,02	4,06	4,04	24,16
1BApa-H.6	PA-FC	6,02	6,08	6,06	6,05	4,12	4,04	4,08	4,08	24,70
1BApa-H.7	PA-FC	6,36	6,4	6,4	6,39	4	4,1	4,02	4,04	25,80
1BApa-H.8	PA-FC	6,46	6,4	6,36	6,41	4,14	4,18	4,18	4,17	26,69
1BApa-C.1	PA-FC	5,56	5,74	5,8	5,70	5,1	5,14	5,08	5,11	29,11
1BApa-C.2	PA-FC	5,78	5,9	5,82	5,83	5,16	5,2	5,18	5,18	30,22
1BApa-C.3	PA-FC	5,78	5,76	5,84	5,79	5,1	5,22	5,1	5,14	29,78
1BApa-C.4	PA-FC	5,62	5,86	5,72	5,73	5,14	5,12	5,16	5,14	29,47
1BApa-C.5	PA-FC	5,8	5,68	5,7	5,73	5,02	5,1	5,1	5,07	29,05
1BApa-C.6	PA-FC	5,62	5,78	5,7	5,70	5,08	5,12	5,14	5,11	29,15
1BApa-C.7	PA-FC	5,78	5,82	5,82	5,81	5,1	5,16	5,1	5,12	29,73
1BApa-C.8	PA-FC	5,82	5,88	5,84	5,85	5,06	5,08	5,06	5,07	29,62
1BApa-V.1	PA-FC	5,46	5,48	5,5	5,48	4,42	4,5	4,44	4,45	24,40
1BApa-V.2	PA-FC	5,58	5,52	5,5	5,53	4,94	4,82	4,88	4,88	27,00
1BApa-V.3	PA-FC	5,42	5,56	5,42	5,47	5,62	5,64	5,6	5,62	30,72
1BApa-V.4	PA-FC	5,52	5,6	5,62	5,58	4,58	4,7	4,74	4,67	26,08
1BApa-V.5	PA-FC	5,42	5,5	5,56	5,49	4,82	4,84	4,92	4,86	26,70
1BApa-V.6	PA-FC	5,5	5,42	5,52	5,48	4,38	4,52	4,54	4,48	24,55
1BApa-V.7	PA-FC	5,42	5,4	5,42	5,41	4,62	4,52	4,54	4,56	24,68
1BApa-V.8	PA-FC	5,44	5,48	5,5	5,47	4,62	4,52	4,6	4,58	25,07

Tabla 8. Tolerancias dimensionales Probetas Fase I de PA con fibra de carbono.

PET CF		d1(mm)				d2 (mm)				ÁREA mm ²
Código	Material	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Media	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Media	
1BApet-H.1	PET-FC	5,1	5,14	5,12	5,12	3,68	3,62	3,6	3,63	18,60
1BApet-H.2	PET-FC	5,22	5,26	5,14	5,21	3,64	3,7	3,7	3,68	19,16
1BApet-H.3	PET-FC	5,16	5,1	5,08	5,11	3,6	3,6	3,6	3,60	18,41
1BApet-H.4	PET-FC	5,16	5,02	5,1	5,09	3,64	3,66	3,64	3,65	18,57
1BApet-H.5	PET-FC	5,1	5,06	5,08	5,08	3,68	3,7	3,66	3,68	18,69
1BApet-H.6	PET-FC	5,12	5,11	5,14	5,12	3,6	3,62	3,62	3,61	18,51
1BApet-H.7	PET-FC	5,12	5,1	5,14	5,12	3,7	3,74	3,68	3,71	18,98
1BApet-H.8	PET-FC	5,04	5,1	5,04	5,06	3,66	3,7	3,7	3,69	18,65
1BApet-C.1	PET-FC	5,64	5,68	5,62	5,65	4	4,06	4,04	4,03	22,77
1BApet-C.2	PET-FC	5,38	5,68	5,5	5,52	4,04	4,02	4,04	4,03	22,26
1BApet-C.3	PET-FC	5,48	5,5	5,5	5,49	4,06	4,06	4,04	4,05	22,27
1BApet-C.4	PET-FC	5,66	5,5	5,54	5,57	4,06	4,02	4,04	4,04	22,49
1BApet-C.5	PET-FC	5,48	5,64	5,64	5,59	4	4,02	4	4,01	22,38
1BApet-C.6	PET-FC	5,7	5,72	5,66	5,69	4,08	3,98	4,04	4,03	22,96
1BApet-C.7	PET-FC	5,5	5,6	5,46	5,52	4,02	4,04	4,04	4,03	22,26
1BApet-C.8	PET-FC	5,6	5,6	5,56	5,59	4,02	4,08	4	4,03	22,53
1BApet-V.1	PET-FC	5,04	5	5	5,01	4,1	4,22	4,18	4,17	20,89
1BApet-V.2	PET-FC	5,08	5,16	5,16	5,13	4,32	4,36	4,34	4,34	22,28
1BApet-V.3	PET-FC	5,12	5,2	5,14	5,15	4,22	4,22	4,2	4,21	21,71
1BApet-V.4	PET-FC	5,14	5,14	5,18	5,15	4,18	4,16	4,2	4,18	21,54
1BApet-V.5	PET-FC	5,2	5,24	5,2	5,21	4,22	4,24	4,3	4,25	22,17
1BApet-V.6	PET-FC	5,14	5,16	5,1	5,13	4,16	4,26	4,22	4,21	21,63
1BApet-V.7	PET-FC	5,1	5,12	5,1	5,11	4,26	4,2	4,3	4,25	21,72
1BApet-V.8	PET-FC	5,18	5,1	5,14	5,14	4,26	4,2	4,24	4,23	21,76

Tabla 9. Tolerancias dimensionales Probetas Fase I de PET con fibra de carbono.

En cuanto a las probetas de T equivalente, se ha verificado la tolerancia dimensional del ancho efectivo (d_1 en la figura) y del espesor del ala (d_2), comprobándose que las desviaciones son pequeñas y por tanto asumibles.



Probetas Fase II		d1(mm)				d2 (mm)			
Código	Material	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Media	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Media
TPA15.1	PA-FC	15,08	15,02	14,94	15,01	9,7	9,68	9,62	9,67
TPA15.2	PA-FC	14,86	14,84	14,9	14,87	8,6	8,64	8,64	8,63
TPA15.3	PA-FC	14,98	14,86	14,82	14,89	8,58	8,6	8,56	8,58
TPA25.1	PA-FC	24,52	24,3	24,42	24,41	8,52	8,5	8,46	8,49
TPA25.2	PA-FC	23,8	23,78	23,88	23,82	8,56	8,58	8,54	8,56
TPA25.3	PA-FC	24,22	24,18	24,42	24,27	8,56	8,48	8,5	8,51
TPA35.1	PA-FC	34,2	34,54	34,6	34,45	8,66	8,64	8,78	8,69
TPA35.2	PA-FC	34,64	34,52	34,72	34,63	8,62	8,64	8,86	8,71
TPA35.3	PA-FC	34,68	34,44	34,46	34,53	8,84	8,8	8,6	8,75
TPET15.1	PET-FC	14,92	14,9	14,8	14,87	8,7	8,74	8,72	8,72
TPET15.2	PET-FC	14,92	14,9	14,74	14,85	8,74	8,72	8,7	8,72
TPET15.3	PET-FC	14,7	14,74	14,98	14,81	8,78	8,88	8,74	8,80
TPET25.1	PET-FC	25	24,98	24,72	24,90	8,8	8,86	8,76	8,81
TPET25.2	PET-FC	24,6	24,76	24,72	24,69	8,7	8,68	8,7	8,69
TPET25.3	PET-FC	24,64	24,7	24,92	24,75	8,76	8,78	8,78	8,77
TPET35.1	PET-FC	34	34,02	33,9	33,97	8,7	8,68	8,74	8,71
TPET35.2	PET-FC	34,1	34,14	34,12	34,12	8,84	9	9	8,95
TPET35.3	PET-FC	33,7	33,78	33,68	33,72	8,82	8,78	8,76	8,79

Tabla 10. Tolerancias dimensionales Probetas Fase II T-stub.

6.2. Curvas Tensión-Deformación probetas fase I experimental. Caracterización del material.

6.2.1. Curvas de las probetas 1BA-PA CF.

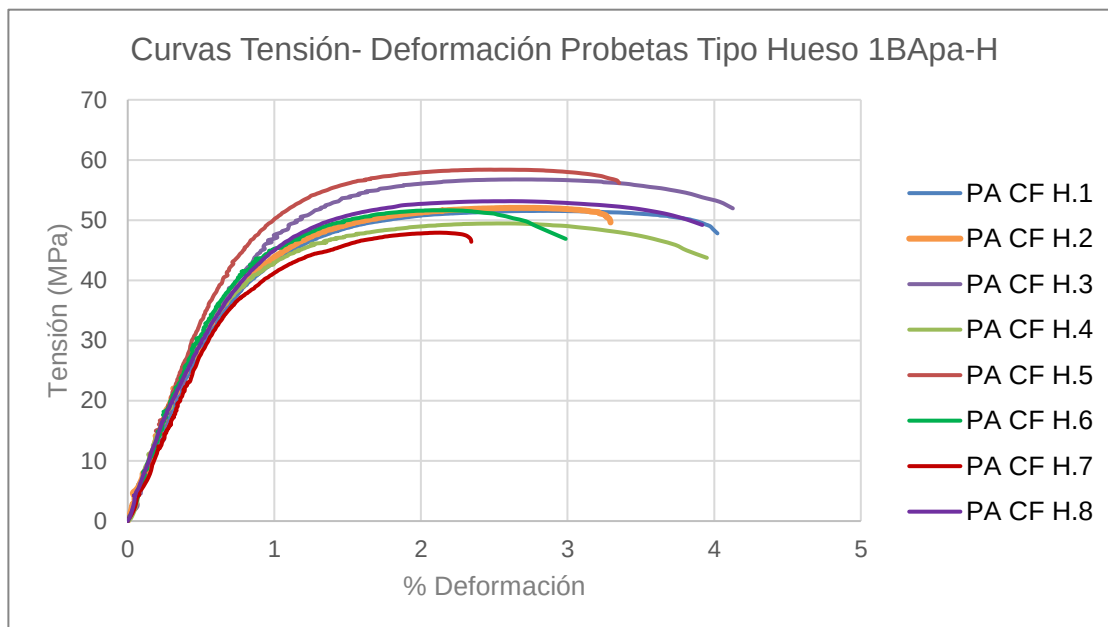


Figura 89. Curva tensión-deformación probetas tipo hueso PA CF-H.

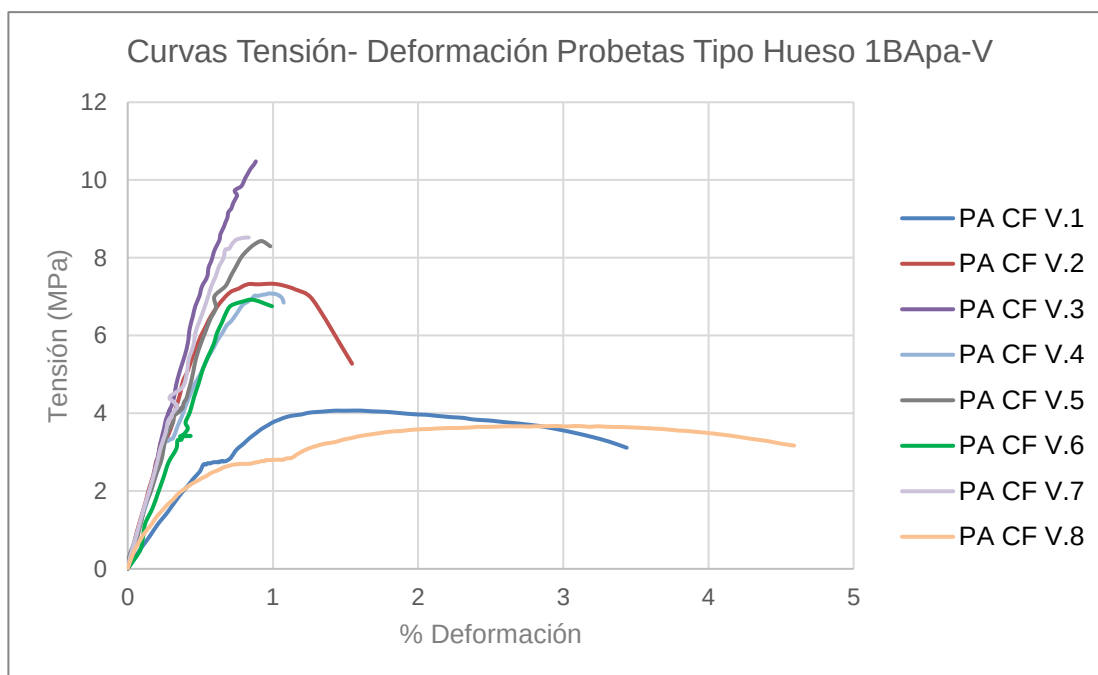


Figura 90. Curva tensión-deformación probetas tipo hueso PA CF-V.

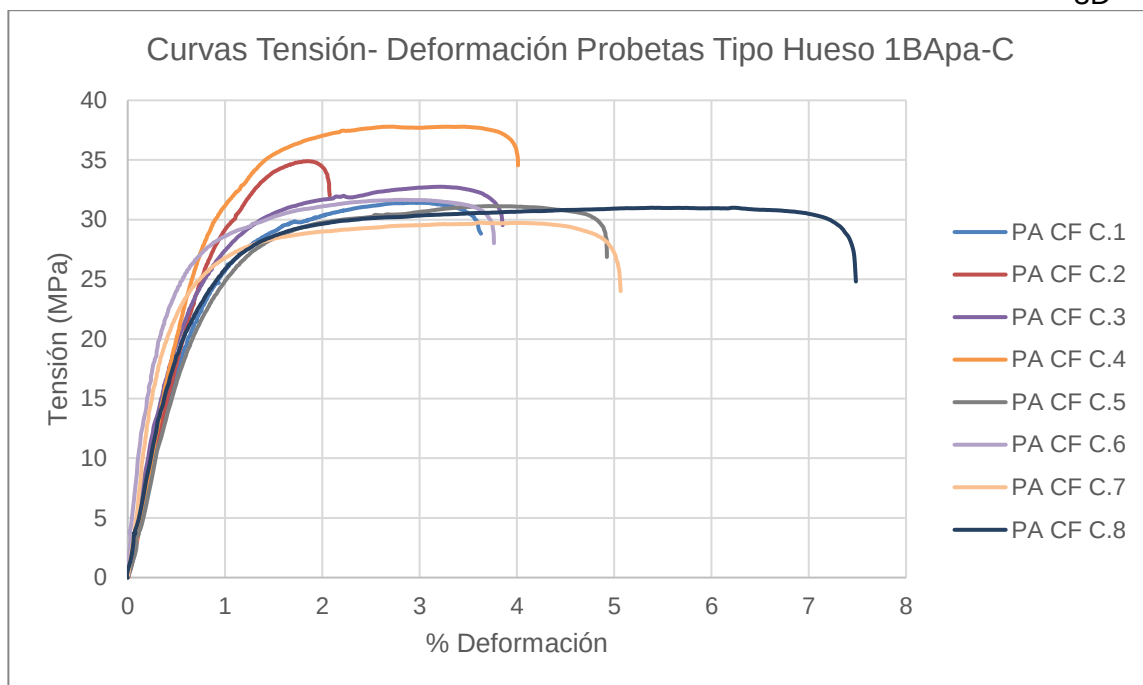


Figura 91. Curva tensión-deformación probetas tipo hueso PA CF-C.

6.2.2. Curvas de las probetas 1BA-PET CF.

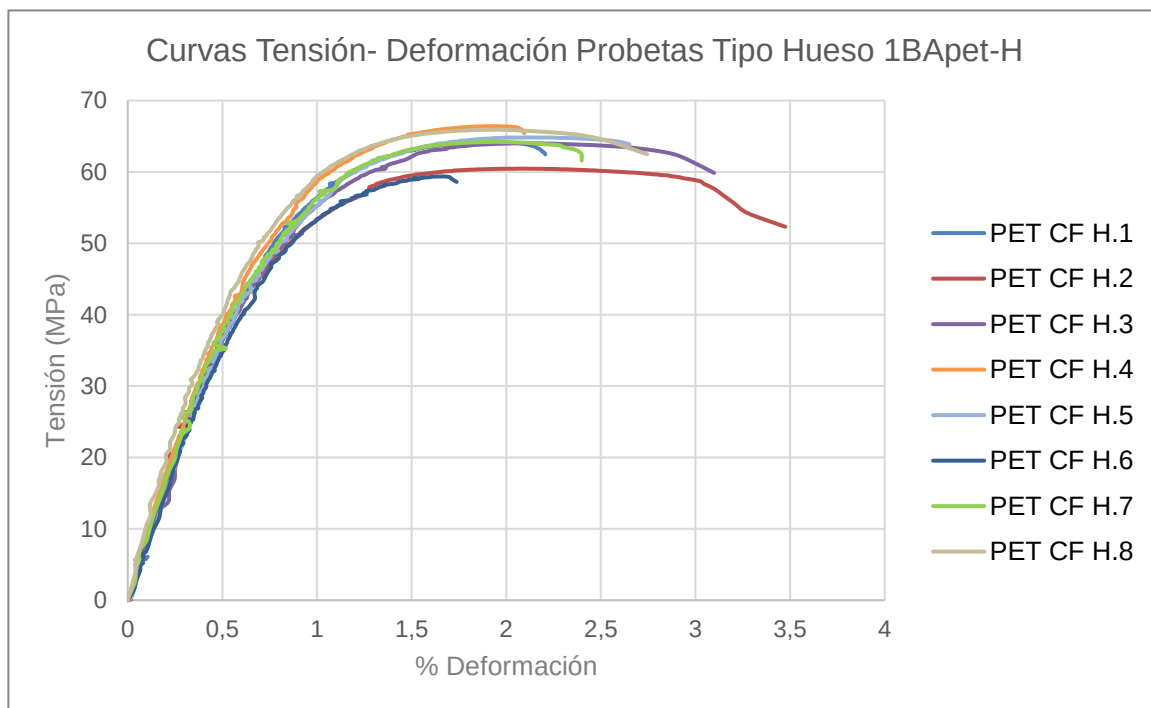


Figura 92. Curva tensión-deformación probetas tipo hueso PET CF-H.

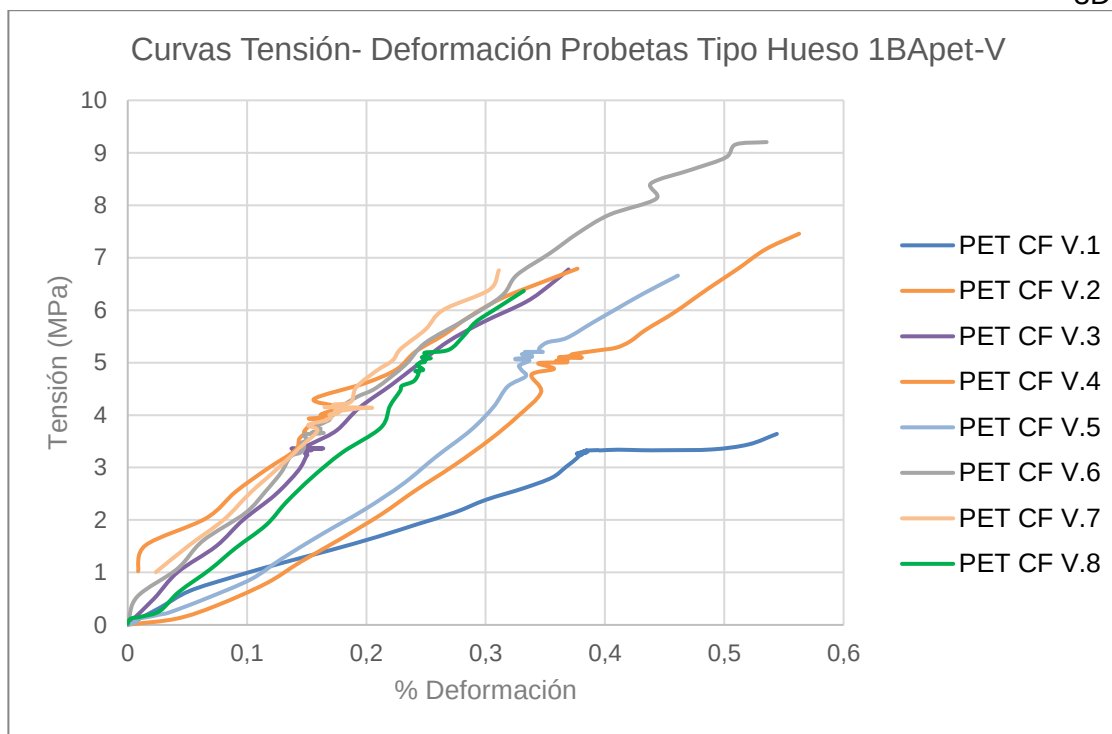


Figura 93. Curva tensión-deformación probetas tipo hueso PET CF-V.

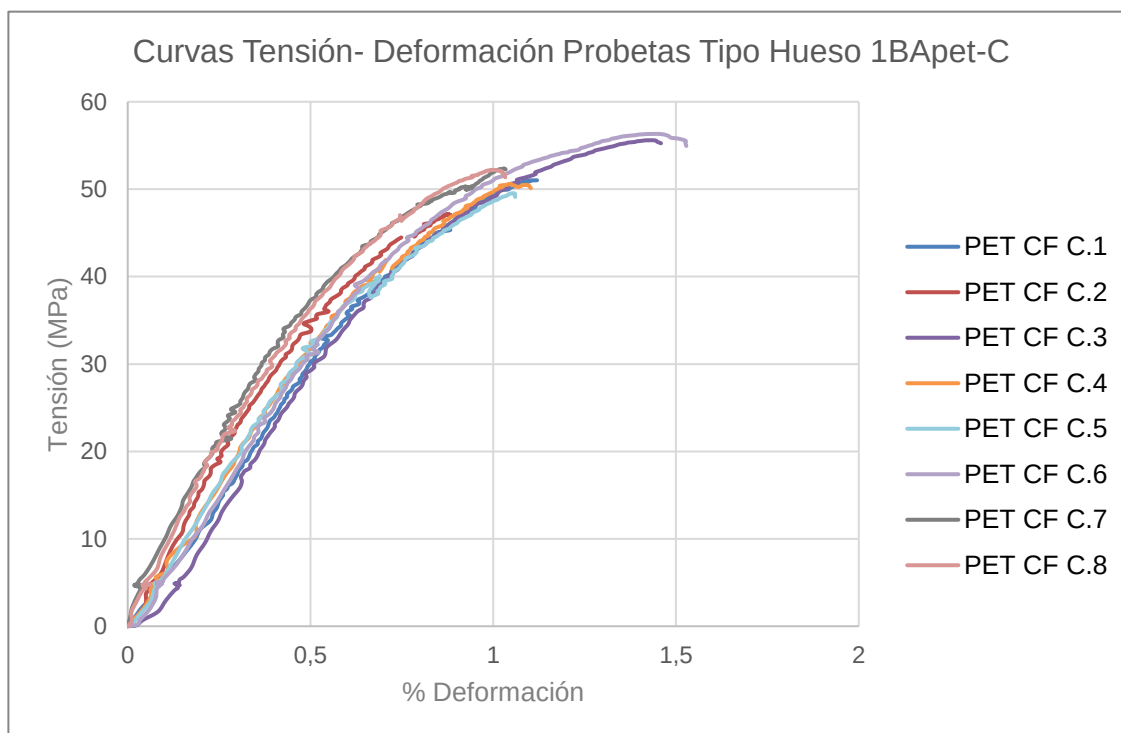


Figura 94. Curva tensión-deformación probetas tipo hueso PET CF-C.

6.2.3. Curvas medias Tensión- Deformación probetas tipo hueso.

A continuación, tomando los valores de todas y cada una de las probetas ensayadas, se procede a calcular los valores medios con los que se pueda construir una curva media de caracterización para cada uno de los materiales y en las tres direcciones de impresión.

PA CF				
	E (GPa)	Límite elástico (MPa)	σ_u (MPa)	Def. última (ϵ)
H.1	5,78	36,5	47,8	0,0402
H.2	6,82	33,4	49,6	0,0329
H.3	6,24	37,9	52,0	0,0413
H.4	6,44	34,6	43,7	0,0395
H.5	6,86	45,2	56,2	0,0351
H.6	6,49	37,1	46,9	0,0299
H.7	5,56	35,2	46,4	0,0234
H.8	5,98	37,2	49,2	0,0392
Media	6,27	36,6	49,0	0,0349
Des.Típica	0,471	2,21	3,80	0,00626
			% ϵ	
Deformación límite elástico			0,583	

	E (MPa)	Límite elástico (MPa)	σ_u (MPa)	Def. última (ϵ)
V.1	503	2,74	3,11	0,0344
V.2	1359	5,78	5,28	0,01545
V.3	1465	8,61	10,48	0,00882
V.4	1199	4,97	6,85	0,01074
V.5	1203	7,15	8,30	0,00982
V.6	991	6,77	6,76	0,00994
V.7	1327	7,45	8,52	0,00834
V.8	596	2,74	3,17	0,046
Media	1080,3	5,78	6,56	0,01790
Des.Típica	357	2,16	2,60	0,01422
			% ϵ	
Deformación límite elástico			0,552	

	E (GPa)	Límite elástico (MPa)	σ_u (MPa)	Def. última (ϵ)
C.1	3,43	21,5	28,8	0,0363
C.2	3,85	23,5	32,0	0,0208
C.3	4,48	20,5	29,5	0,0385
C.4	4,07	26,6	34,5	0,0401
C.5	3,31	20,8	26,9	0,0492
C.6	6,58	22,1	28,0	0,0376
C.7	5,78	20,9	24,0	0,0507
C.8	3,98	20,7	28,8	0,0748
Media	4,44	22,1	29,1	0,0435
Des.Típica	1,157	2,08	3,20	0,01561
			% ϵ	
Deformación límite elástico			0,498	

Tabla 11. Valores de módulo de elasticidad, límite elástico, tensión última de rotura y deformación última de rotura de las probetas tipo hueso PA CF.

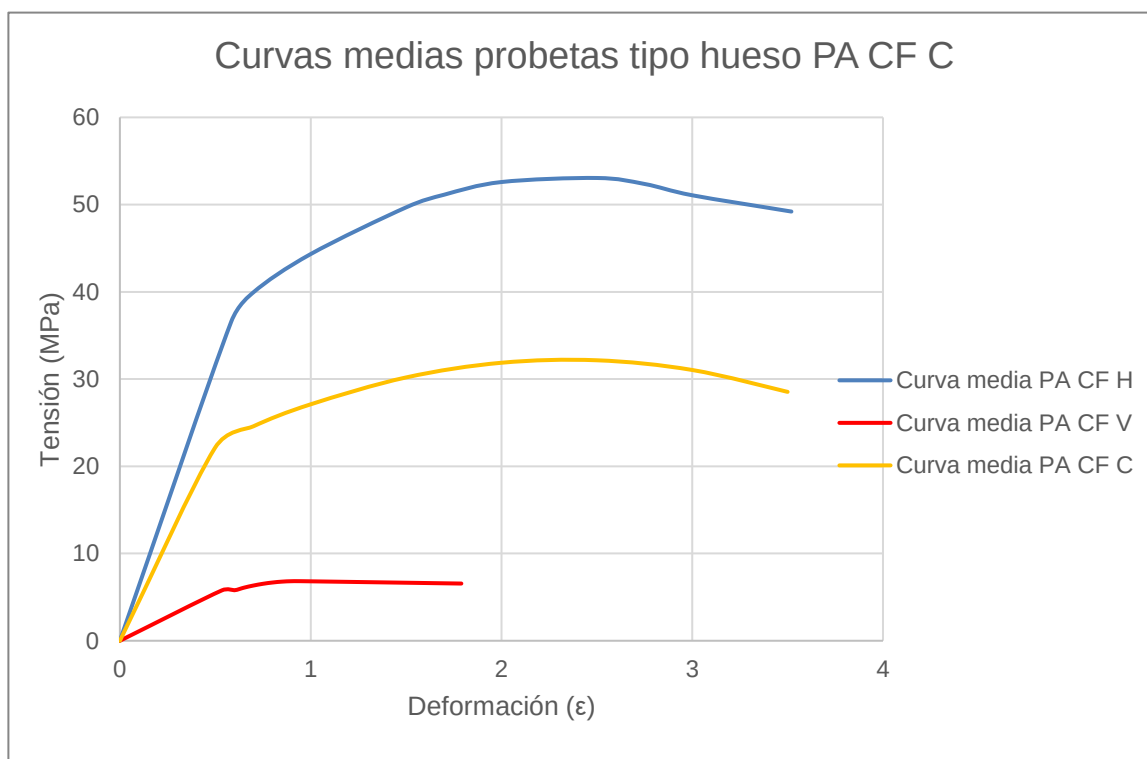


Figura 95. Curvas tensión-deformación medias de las probetas tipo hueso PA CF.

PET CF				
	E (GPa)	Límite elástico (MPa)	σ_u (MPa)	Def. última (ϵ)
H.1	7,88	43,7	62,5	0,0221
H.2	8,13	40,2	52,3	0,0347
H.3	8,59	43,6	59,9	0,0310
H.4	8,09	45,9	65,4	0,0210
H.5	7,49	44,6	65,9	0,0265
H.6	7,34	41,6	58,6	0,01738
H.7	7,71	45,0	61,6	0,0240
H.8	8,85	50,14	62,5	0,0275
Media	8,01	44,3	61,1	0,0255
Des.Típica	0,518	2,98	4,31	0,00562
			% ϵ	
Deformación límite elástico			0,554	

	E (GPa)	Límite elástico (MPa)	σ_u (MPa)	Def. última (ϵ)
V.1	0,740	3,64	3,35	0,00490
V.2	1,485	7,46	7,46	0,00563
V.3	1,788	6,78	6,78	0,00354
V.4	1,669	6,79	6,79	0,00377
V.5	1,576	6,66	6,66	0,00461
V.6	1,686	9,20	9,20	0,00535
V.7	2,07	6,76	6,76	0,00311
V.8	2,06	6,37	6,37	0,00332
Media	1,635	6,71	6,67	0,0043
Des.Típica	0,419	1,528	1,614	0,000968
			% ϵ	
Deformación límite elástico			0,410	

	E (GPa)	Límite elástico (MPa)	σ_u (MPa)	Def. última (ϵ)
C.1	6,02	41,7	51,0	0,01120
C.2	7,67	36,0	46,9	0,00881
C.3	6,60	35,7	55,3	0,01459
C.4	6,53	41,2	50,1	0,01103
C.5	6,64	38,9	49,1	0,0106
C.6	6,56	45,8	54,9	0,01528
C.7	7,64	41,8	52,3	0,01034
C.8	8,29	37,86	53,4	0,01033
Media	7,00	39,87	51,6	0,0115
Des.Típica	0,774	3,41	2,91	0,00223
			% ϵ	
Deformación límite elástico			0,570	

Tabla 12. Valores de módulo de elasticidad, límite elástico, tensión última de rotura y deformación última de rotura de las probetas tipo hueso PET CF.

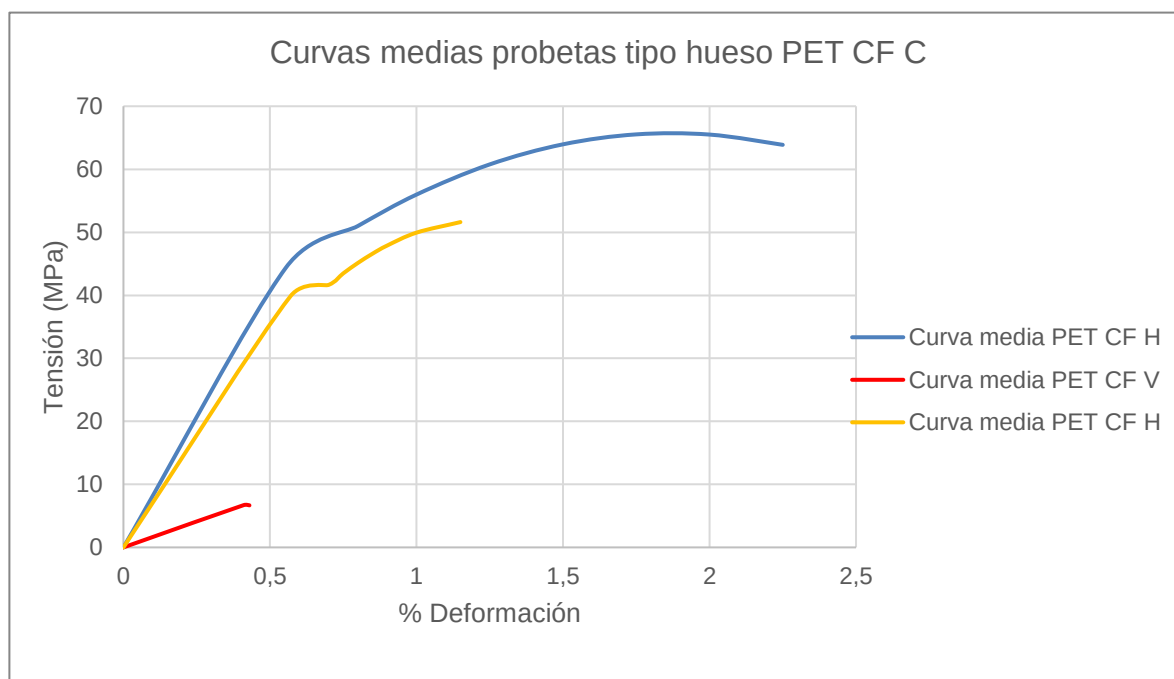


Figura 96. Curvas tensión-deformación medias de las probetas tipo hueso PET CF.

6.2.4. Análisis de resultados de la caracterización del material.

En esta primera fase del programa experimental, como nuestros materiales presentan anisotropía, sus propiedades en las distintas direcciones de impresión cabía esperar que fueran muy diferentes. Una vez realizados los ensayos podemos concluir que sin duda la dirección en la que las probetas han sido más resistentes ha sido con la horizontal. La curva de las probetas impresas en dirección vertical nada tiene que ver con las anteriores, rompiendo mucho antes y sin apenas mostrar resistencia. En la Figura 96, donde se muestran los resultados de PET CF, se ve claramente como la curva de las probetas en vertical rompe antes de llegar a la zona plástica incluso. Esto es debido a que las piezas son más resistentes en la dirección donde están reforzadas con fibras, con lo que en dirección vertical prácticamente no ofrecen resistencia a la rotura. Tanto el módulo de elasticidad como el coeficiente de Poisson serán mayores también en la dirección donde las piezas están reforzadas con fibras, por eso se incrementa de menor a mayor de las probetas en dirección vertical a las de horizontal.

	E (GPa)	Límite elástico (MPa)	Def. límite elástico (ϵ)	σ_u (MPa)	Def. última (ϵ)
PA CF H	6,27	36,6	0,00583	49,0	0,0352
PET CF H	8,01	44,3	0,00554	61,1	0,0255
PA CF V	1,080	5,78	0,00535	6,56	0,0179
PET CF V	1,635	6,71	0,00410	6,67	0,0043
PA CF C	4,44	22,1	0,00498	29,8	0,0435
PET CF C	6,991	39,9	0,00570	51,6	0,0115

Tabla 13. Valores medios de PA CF y PET CF para todas las direcciones de impresión.

Como podemos observar en la Figura 97 siguiente, las probetas de PET CF tienen unos valores de tensión de rotura mayores, en su mayoría, para todas las direcciones de impresión, sin embargo, la PA CF aguanta unas deformaciones mayores:

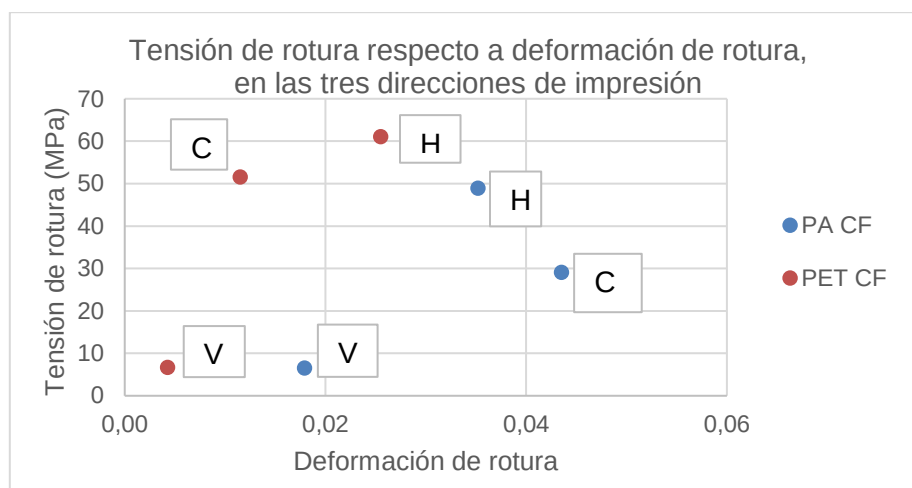


Figura 97. Comparativa de tensión de rotura entre PA CF y PET CF, en las tres direcciones de impresión.

Por otro lado, si comparamos la zona lineal correspondiente a la parte elástica de la curva Tensión-Deformación, obtenemos que la pendiente de la misma es mayor con PET CF que con PA CF, obteniendo un límite elástico superior también para todos los casos.

Para poder comparar los resultados con los obtenidos de ABS y PLA experimentalmente en trabajos anteriores solamente tendremos en cuenta la dirección horizontal, ya que dichos materiales no fueron ensayados en las otras direcciones. Por tanto, nuestro análisis se centrará en las probetas impresas en esta dirección. Como podemos observar en la Tabla 14, los materiales ensayados en el presente trabajo han resultado tener una resistencia a la tracción mayor que ABS y PLA pese a ser la deformación última o de rotura muy parecidas en todos los casos.

	E (MPa)	Límite elástico (MPa)	Def. límite elástico (ϵ)	σ_u (MPa)	Def. última (ϵ)
ABS-H	2850	31,4	0,011	40,7	0,032
PLA-H	1855	22,4	0,012	26	0,037
PA CF-H	6270	36,7	0,00583	49,0	0,0352
PET CF-H	8008	44,3	0,00553	61,1	0,0255

Tabla 14. Comparativa de propiedades en dirección de impresión horizontal para todos los materiales.

6.2.4. Gráficas para obtener el coeficiente de Poisson.

El coeficiente de Poisson será calculado haciendo uso del programa Vic 2D, al igual que para los desplazamientos. Para ello usaremos el extensómetro, midiendo las deformaciones tanto a lo largo del eje horizontal (transversal) como del vertical (longitudinal) de la probeta, como se puede ver en la Figura 98, y graficando E1 frente a E0, cuya pendiente es lo que vamos buscando:

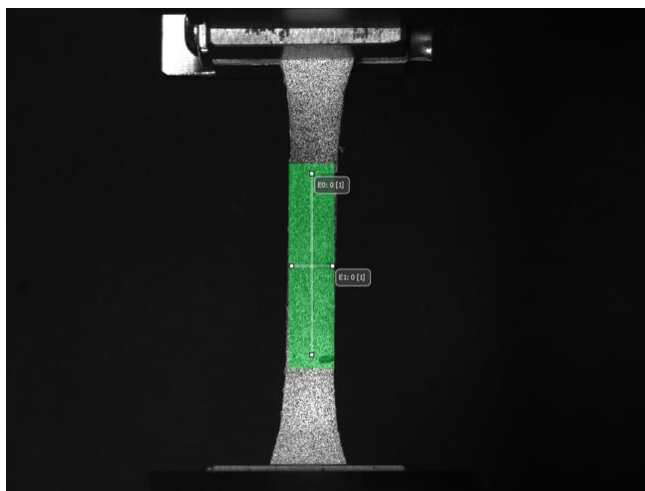


Figura 98. Curva para determinar el coeficiente de Poisson PA CF H.

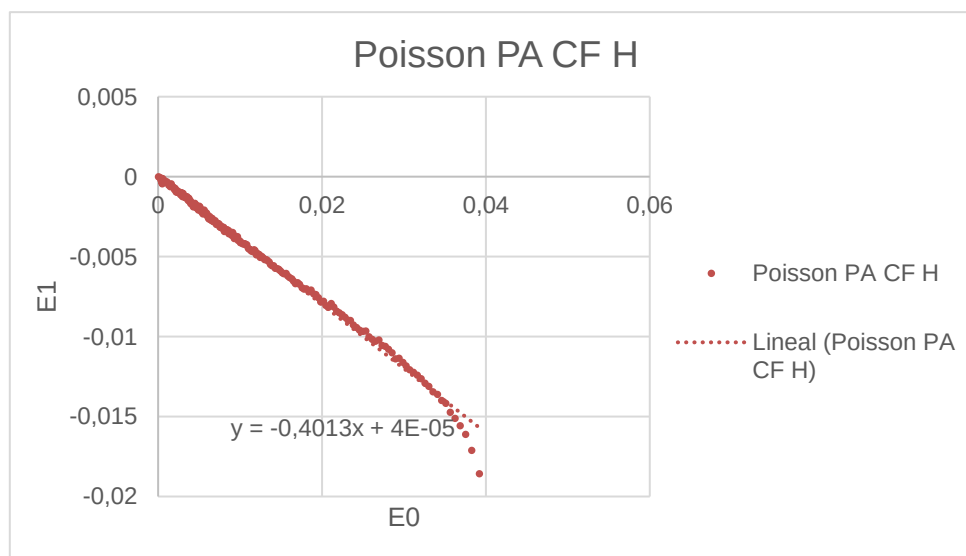


Figura 99. Curva para determinar el coeficiente de Poisson PA CF H.

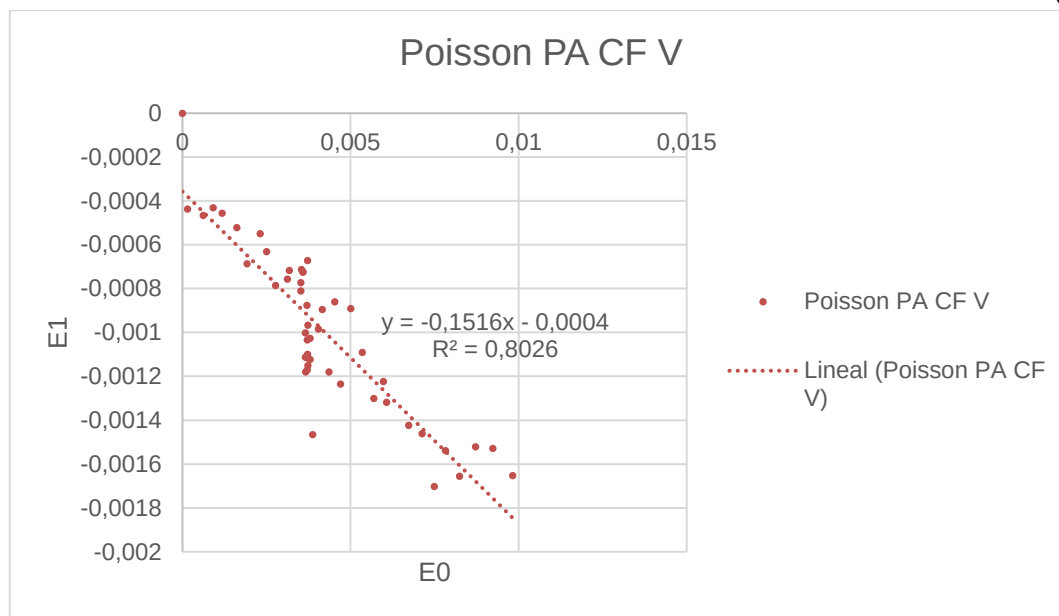


Figura 100. Curva para determinar el coeficiente de Poisson PA CF V.

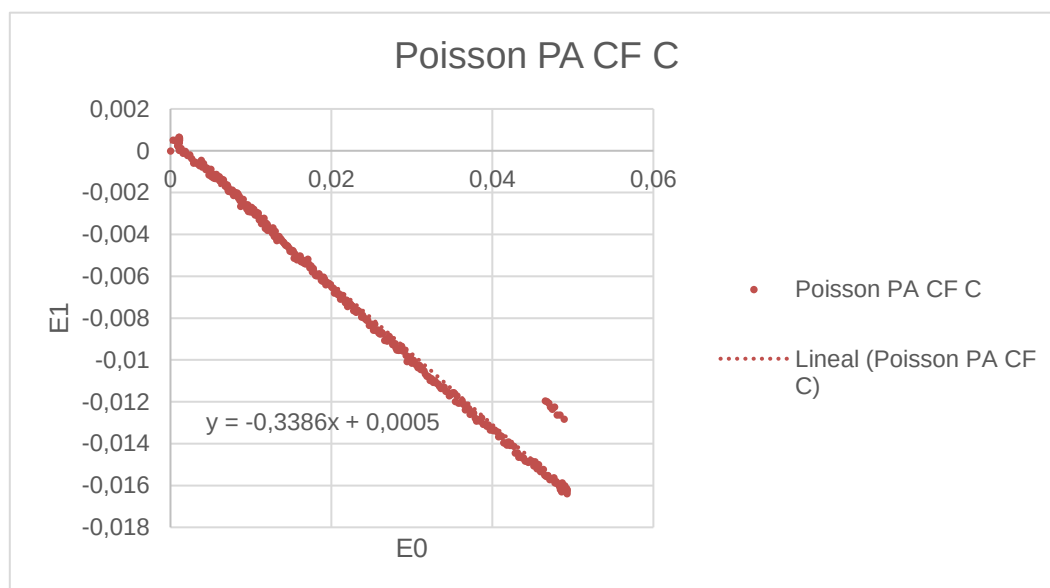


Figura 101. Curva para determinar el coeficiente de Poisson PA CF C.

Los resultados de coeficiente de Poisson para cada una de las direcciones de impresión de PA CF se pueden ver en la Tabla 15 siguiente. Se puede decir que para las direcciones horizontal y de canto los valores son más precisos, ya que se puede hacer una regresión lineal muy buena. En cuanto a la dirección vertical, hay mucha dispersión en los datos obtenidos, como se ve en la Figura 100, con lo que

el resultado no es tan preciso. Por otro lado, el hecho de tener un material anisótropo se vuelve a reflejar en los resultados obtenidos, siguiendo de nuevo una tendencia ascendente pasando por la dirección vertical, que nos da el valor más bajo, a la dirección horizontal, con el valor más alto. De nuevo queda en evidencia la dirección vertical, que no está reforzada con la dirección de las fibras del material.

Coeficiente de Poisson PA CF

H	0,401
V	0,1516
C	0,339

Tabla 15. Valor del coeficiente de Poisson en las distintas direcciones de impresión de PA CF.

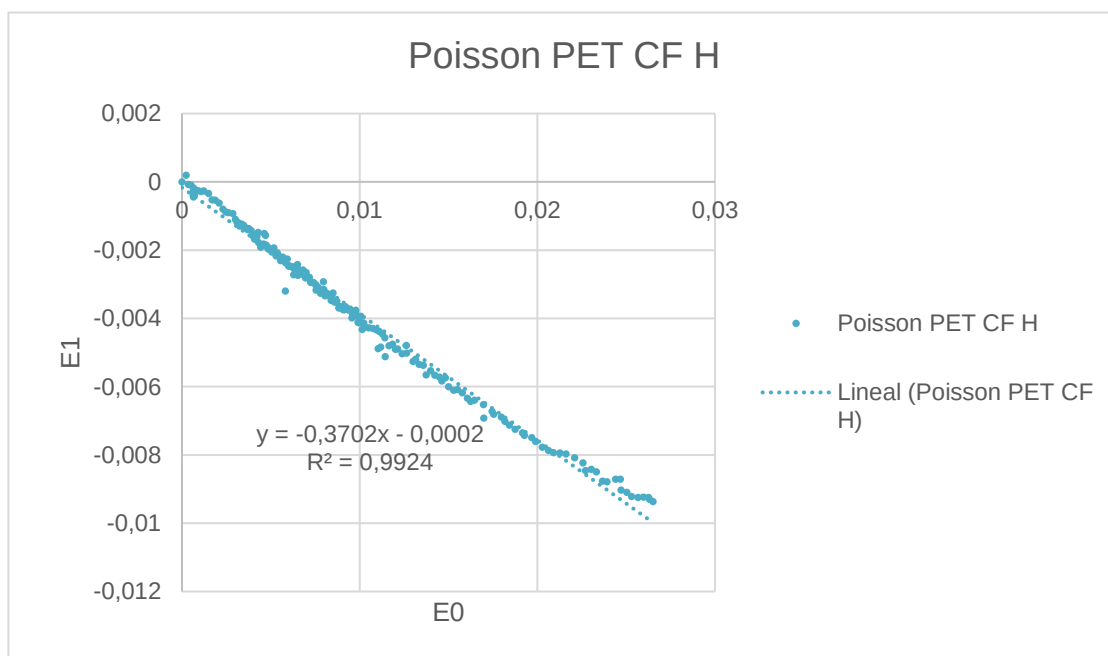


Figura 102. Curva para determinar el coeficiente de Poisson PET CF H.

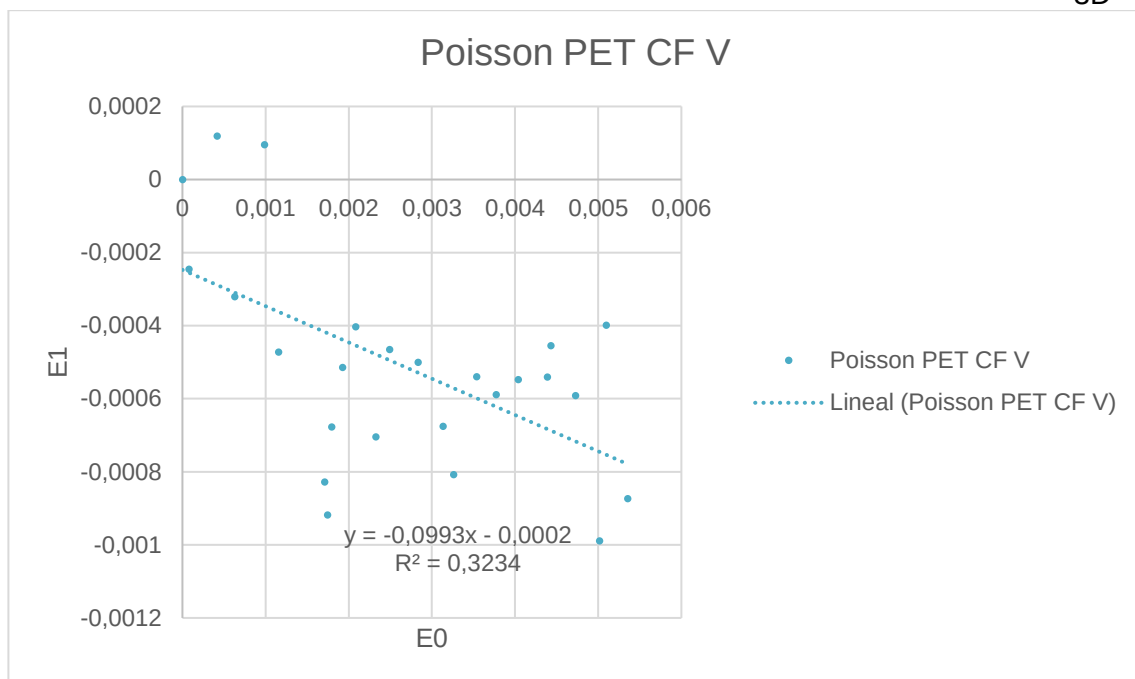


Figura 103. Curva para determinar el coeficiente de Poisson PET CF V.

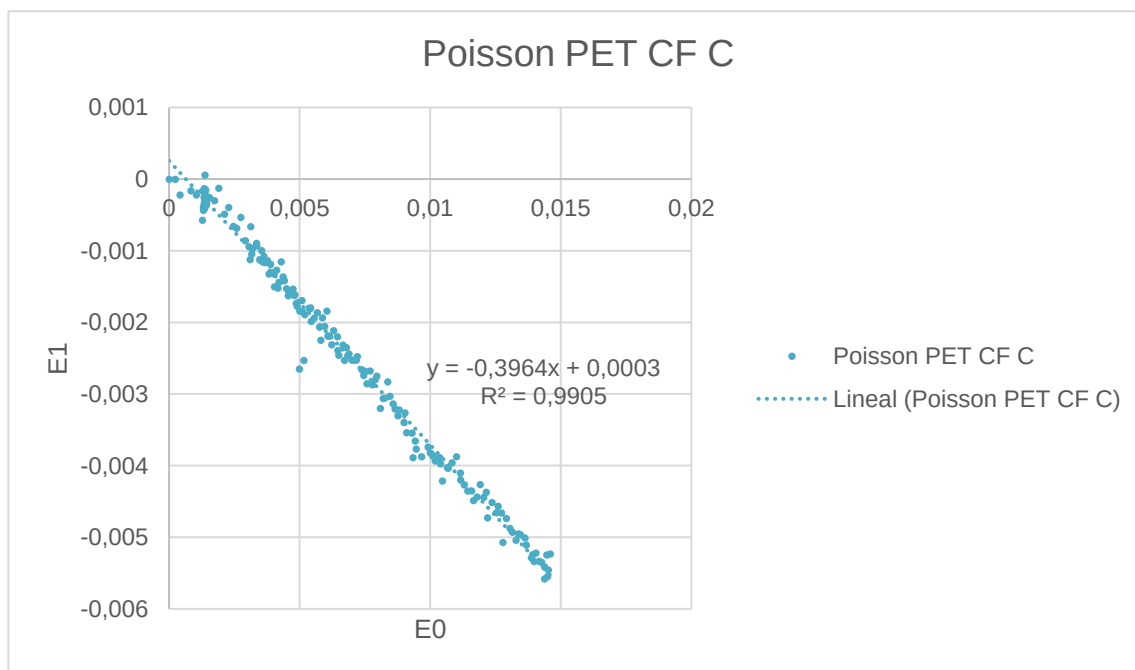


Figura 104. Curva para determinar el coeficiente de Poisson PET CF C.

En el caso de PET CF ocurre algo muy similar a la PA CF. De nuevo las diferencias entre la dirección vertical de impresión con las restantes es muy grande, incluso más visible en este material que en el anterior. Si observamos la Figura 103, se ve una gran dispersión, lo que hace que el resultado además sea muy poco preciso. En el caso de las probetas PA CF-V la regresión tenía una precisión de $R^2 = 0,8$, lo cual puede llegar a ser aceptable, pero con los resultados de PET CF-V solamente tenemos una precisión de $R^2 = 0,3$, lo que hace prácticamente inasumible este resultado.

Coeficiente de Poisson PET CF	
H	0,3702
V	0,0993
C	0,3964

Tabla 16. Valor del coeficiente de Poisson en las distintas direcciones de impresión de PET CF.

6.3. Resultados Fase II experimental. Probetas Tstub.

6.3.1. Curvas Fuerza-Desplazamiento probetas Tstub PA CF.

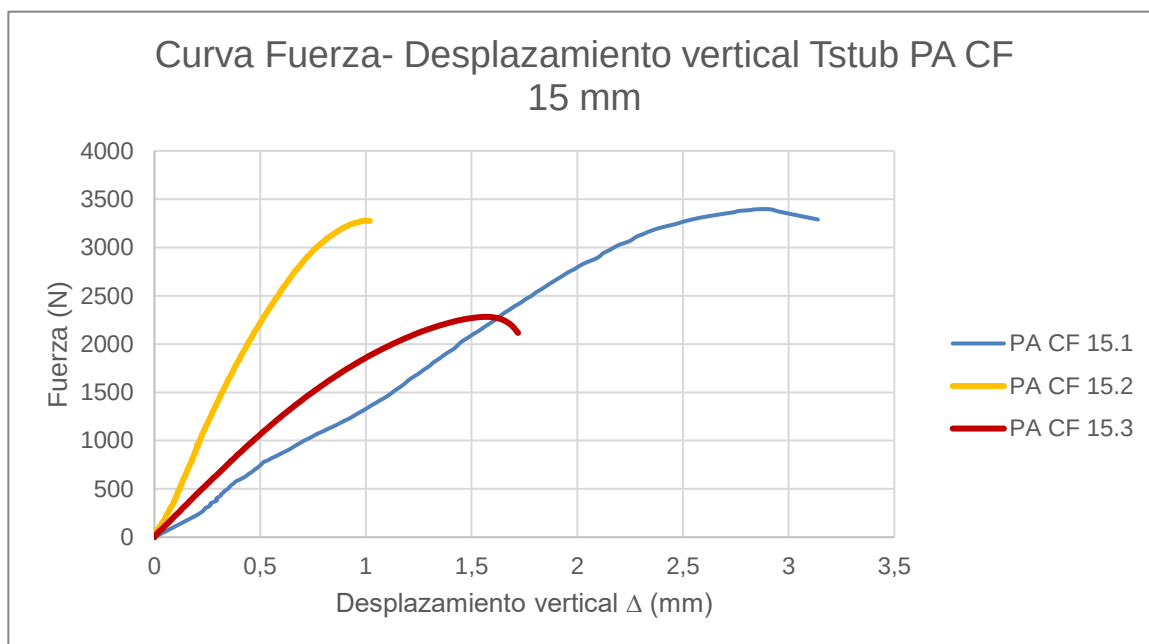


Figura 105. Curva Fuerza- Desplazamiento de las probetas Tstub PA CF de 15 mm de ancho.

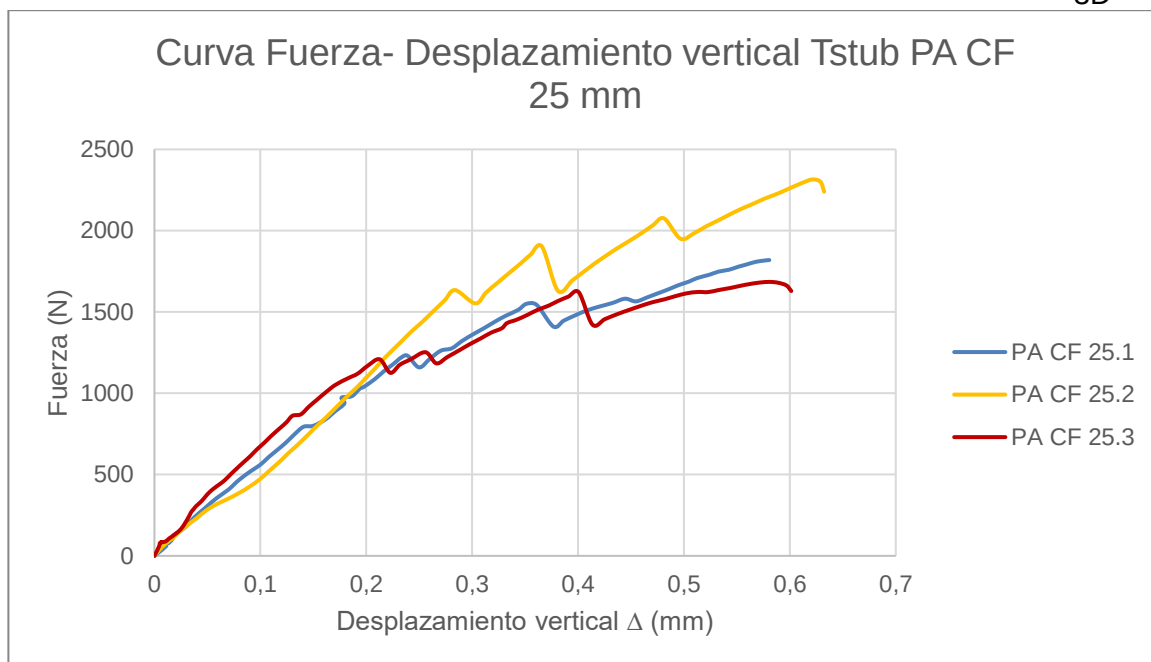


Figura 106. Curva Fuerza- Desplazamiento de las probetas Tstub PA CF de 25 mm de ancho.

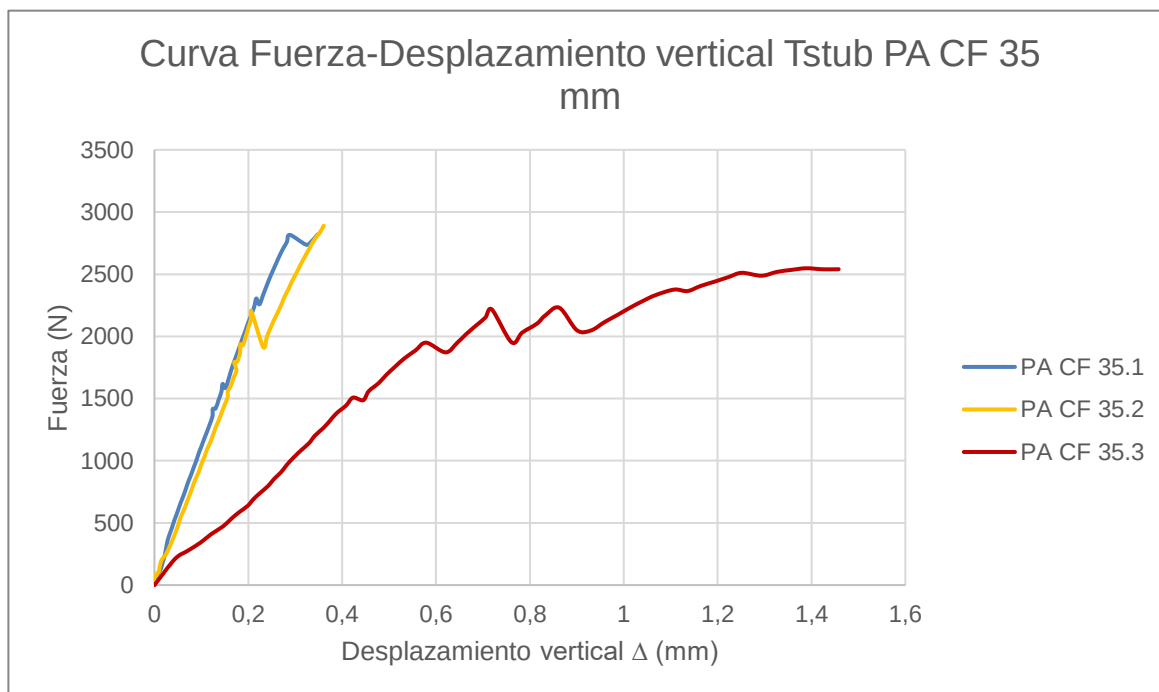
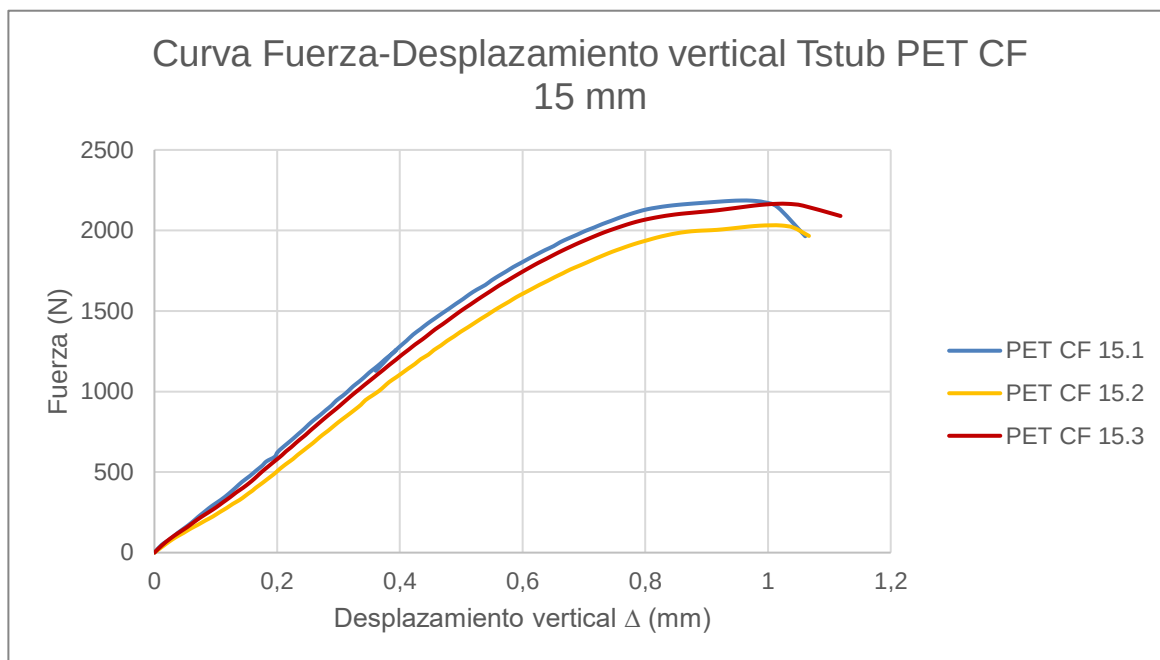
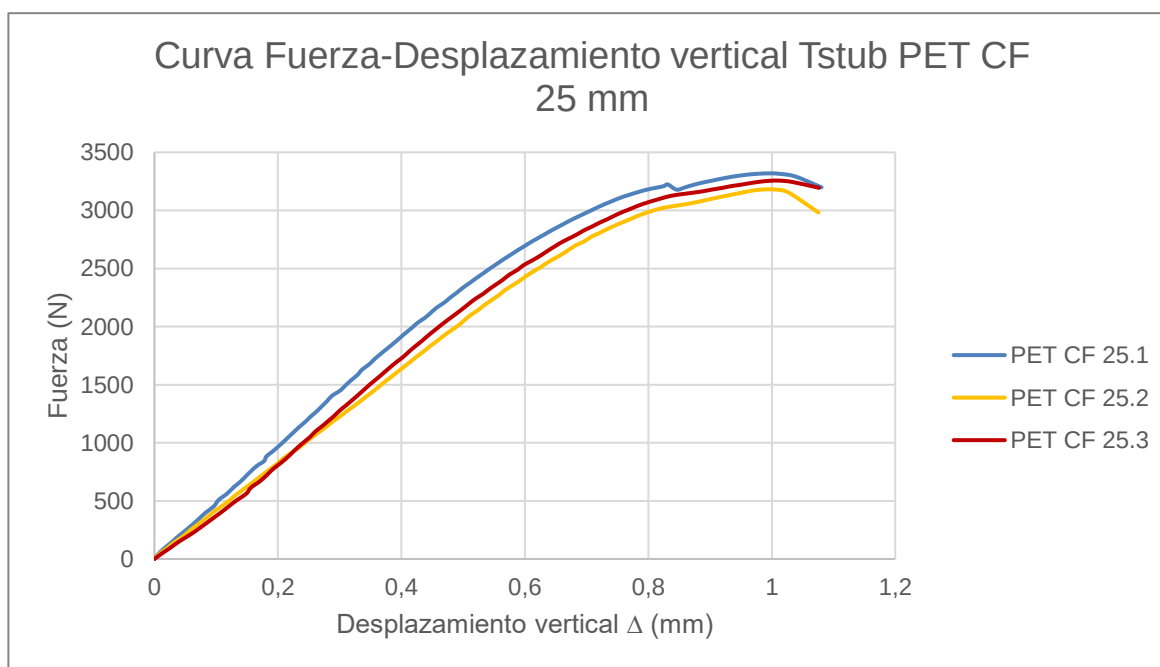


Figura 107. Curva Fuerza- Desplazamiento de las probetas Tstub PA CF de 35 mm de ancho.

6.3.2. Curvas Fuerza-Desplazamiento probetas Tstub PET CF.**Figura 108. Curva Fuerza- Desplazamiento de las probetas T-stub PET CF de 15 mm de ancho.****Figura 109. Curva Fuerza- Desplazamiento de las probetas T-stub PET CF de 25 mm de ancho.**

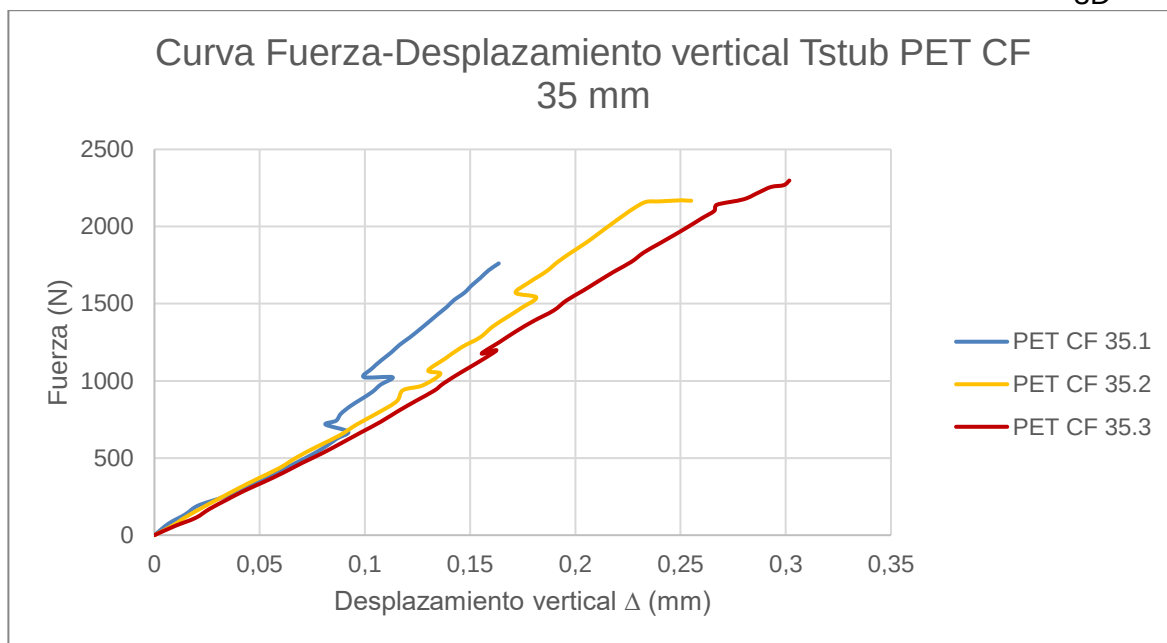


Figura 110. Curva Fuerza- Desplazamiento de las probetas Tstub PET CF de 35 mm de ancho.

6.3.3. Análisis de resultados de las curvas experimentales F- Δ .

En un primer lugar, la fabricación de las Tstub fue diseñada para que la dirección de impresión fuera en horizontal. Esto fue por dos razones: la primera, íbamos buscando la máxima resistencia en nuestras piezas, luego, como experimentalmente ha quedado demostrado, la dirección horizontal era la que ofrecía mayor resistencia gracias al refuerzo de fibras en ella. En segundo lugar, las piezas fabricadas con ABS y PLA realizadas el año pasado por Pedro Herranz Colomina estaban fabricadas en esta dirección en su totalidad, por tanto para una mejor comparación de resultados se decidió hacer estas de igual forma todas, que se tomarán sus datos para dicha comparación.

Las piezas ensayadas de PA CF con 15 mm de ancho ofrecen unas curvas muy diferentes entre sí, con una rigidez que varía bastante y con una de ellas, la 15.1 concretamente, que aguanta mucho más desplazamiento vertical que las otras dos. No se puede decir por tanto que los resultados hayan sido buenos, ya que las curvas de las probetas ensayadas no ofrecen parecido entre ellas. Las probetas de 25 mm de ancho nos ofrecen unas curvas más parecidas pero muy inestables, con

muchos bajones de carga a lo largo del ensayo. Había momentos en los que se podría pensar que el ensayo no iba bien ya que se producían estos bajones de carga para posteriormente volver a subir, haciendo esto varias veces hasta romper. Si analizamos las mismas piezas pero en este caso de PET CF los resultados fueron muy diferentes. Tanto las de 15 mm como las de 25 mm nos ofrecen unas curvas muy buenas, prácticamente iguales entre ellas y todas rompiendo en modo de fallo II, apreciándose muy bien además la rotura.

Durante la realización de los ensayos de las Tstub de 35 mm de longitud efectiva no han obtenido los resultados que en un principio se esperaba. Estas piezas rompían por delaminación o bien por la zona donde la garra dejaba de sujetar a la pieza o bien por la zona del tornillo. Esto es debido a que la carga es excéntrica, cuyo descentramiento produce un momento y por tanto una flexión en nuestras piezas, con lo que rompen de forma prematura.

Es por tanto que se cree que dichas piezas no dieron todo de sí en los ensayos, dejando resultados que distan de lo que en realidad podría haber sucedido, ya que al notar una clara diferencia entre las piezas de 25 mm con las de 15, donde aguantaban mucha más carga, era de preveer que las piezas de 35 mm continuaran por ese camino, aguantando incluso más que las de menor ancho.

Las piezas de PA CF de 35 mm mostraron mejores resultados que las de PET CF, obteniendo cargas máximas mayores que las fabricadas de 25 mm y, por tanto, confirmando la teoría de que a mayor espesor, más resistente se vuelve nuestra pieza. Aún así, la curva presenta bajadas de carga en algunos tramos, igual que ocurría con las de 25 mm de este mismo material. No obstante, una de ellas, en concreto la PA CF 35.3, dista mucho de las otras dos probetas ensayadas. Al ser éstas últimas muy parecidas cabe pensar que este último espécimen no muestra un resultado válido, bien por error a la hora del procesado de dicha pieza y durante el ensayo.

6.3.4. Rigidez, resistencia y modos de fallo de las probetas Tstub de PA CF y PET CF.

	$F_{m\acute{a}x}(N)$	$\Delta l_{Fm\acute{a}x}(mm)$	$F_{rotura}(N)$	$\Delta l_{rotura}(mm)$	$K(\frac{N}{mm})$
PA CF 15.1	3397	2,86	3289	3,14	1387
PA CF 15.2	3277	1,002	3275	1,019	4646
PA CF 15.3	2281	1,561	2115	1,720	2017
PA CF 25.1	1819	0,581	1819	0,581	5191
PA CF 25.2	2315	0,621	2240	0,632	5583
PA CF 25.3	1685	0,581	1629	0,601	6183
PA CF 35.1	2820	0,348	2820	0,348	10184
PA CF 35.2	2890	0,361	2890	0,361	9968
PA CF 35.3	2540	1,458	2540	1,458	3427

Tabla 17. Valores de resistencia y rigidez de las probetas T-stub de PA CF.

	$F_{m\acute{a}x}(N)$	$\Delta l_{Fm\acute{a}x}(mm)$	$F_{rotura}(N)$	$\Delta l_{rotura}(mm)$	$K(\frac{N}{mm})$
PET CF 15.1	2186	0,956	1964	1,061	3210
PET CF 15.2	2032	1,004	1966	1,067	2821
PET CF 15.3	2165	1,015	2090	1,118	3067
PET CF 25.1	3319	0,995	3199	1,081	4793
PET CF 25.2	3181	0,989	2982	1,076	4051
PET CF 25.3	3256	1,014	3195	1,077	4397
PET CF 35.1	1761	0,1636	1761	0,1636	6741
PET CF 35.2	2170	0,253	2167	0,255	7429
PET CF 35.3	2298	0,302	2298	0,302	7181

Tabla 18. Valores de resistencia y rigidez de las probetas T-stub de PET CF.

A continuación, en las siguientes imágenes se muestran los modos de fallo de todas las probetas Tstub después de ser ensayadas. Hay que decir que, aunque en su mayoría rompen con el modo de fallo II, es decir, en la zona de unión entre el ala y el alma de la probeta, con las de mayor espesor no se obtuvieron buenos ensayos, o al menos no tan buenos como se esperaba en un principio, ya que al ser las más anchas se suponía que soportaría una fuerza mayor y que no fallarían de manera prematura, tal y como han fallado como se explica en el apartado 6.3.3. anterior. En esos casos nos encontramos con el fenómeno de delaminación, donde la rotura se produce por capas.

En estas primeras imágenes observamos las probetas de PA CF tanto de 15 como de 25 mm de longitud efectiva, donde o bien han roto en la curvatura de unión entre el alma y el ala, en un ángulo que podría ser parecido a 45° , o directamente por el alma del perfil. Cabe destacar que el último modo de fallo nombrado no es muy común.



Figura 111. Modos de rotura de las T-stub de PA CF de 15 mm de ancho.



Figura 112. Modos de rotura de las T-stub de PA CF de 25 mm de ancho.

No ocurre lo mismo con las probetas de 35 mm de ancho, donde nos encontramos los primeros ensayos con resultados de rotura por delaminación. En

todos ellos, la zonas por las que se rompen las capas son las contiguas al agujero donde se ubica el tornillo para la unión, como podemos observar en la figura 113:



Figura 113. Modos de rotura de las T-stub de PA CF de 35 mm de ancho.

En las probetas de PET CF, la rotura por modo de fallo II se aprecia mejor que en las anteriores. Todas las Tstub de 15 y 25 mm de ancho rompen de esta forma, dando además unos resultados bastante buenos como se ha podido comprobar en las Figuras 108 y 109 con los resultados de sus curvas Fuerza-Desplazamiento.



Figura 114. Modos de rotura de las T-stub de PET CF de 15 mm de ancho.

En la siguiente imagen, correspondiente a la probeta PET CF 15.1, podemos observar como hay rotura también en la zona del tornillo. Al dejar más tiempo de ensayo en esta probeta en concreto, el modo de fallo pasó modo I, donde hay rótula plástica en el tornillo y también en la zona de unión entre el ala y el alma del perfil:

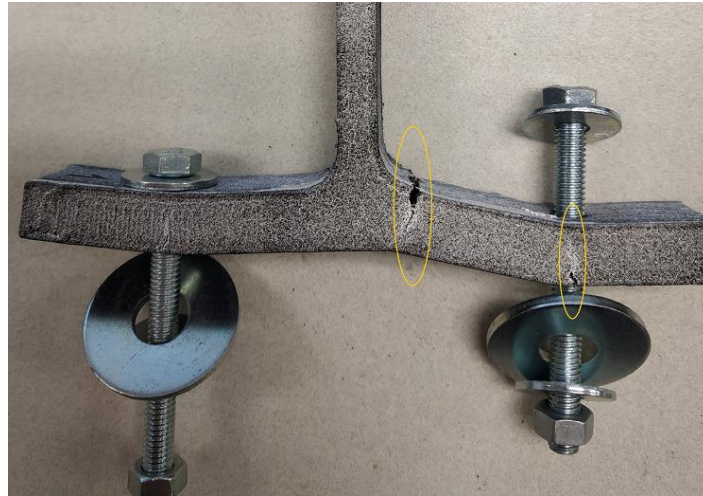


Figura 115. Probeta T-stub 15.1 donde se aprecia el modo de fallo I.

En las probetas de 25 mm observamos también la rotura por modo de fallo II, con una grieta a unos 45°:



Figura 116. Modos de rotura de las T-stub de PET CF de 25 mm de ancho.

Por último, las probetas de 35 mm de longitud efectiva, al igual que pasaba con las anteriores de PA CF, rompen por delaminación. En el caso de la PET CF 35.1 la rotura es bastante apreciable, ya que la probeta se partió literalmente en dos

partes debido a la rotura por una de sus capas. En las otras dos restantes, la rotura se encuentra en las capas que delimita la arandela del tornillo, pero no llegaron a romperse completamente como la primera.



Figura 117. Modos de rotura de las T-stub de PET CF de 35 mm de ancho.

El hecho de el por qué de la rotura prematura en las probetas de 35 mm se debe básicamente a que la probeta tiene un mayor espesor que las garras, lo que hace que una vez sujetas la carga es excéntrica, con lo que la fuerza queda descentrada. Esto produce una momento en la probeta, con lo que debido a esa flexión rompe prematuramente, dejando un ensayo con expectativas muy bajas respecto a lo esperado.

	$F_{m\acute{a}x} (N)$	$\Delta l_{Fm\acute{a}x} (mm)$	$F_{rotura} (N)$	$\Delta l_{rotura} (mm)$	$K \left(\frac{N}{mm} \right)$
PA CF 15	2990	1,807	2890	1,959	2680
PA CF 25	1940	0,594	1890	0,605	5650
PA CF 35	2750	0,722	2750	0,722	7860
PET CF 15	2130	0,992	2010	1,082	3030
PET CF 25	3250	0,1000	3130	1,078	4410
PET CF 35	2080	0,240	2080	0,240	7120

Tabla 19. Valores medios experimentales de PA CF y PET CF.

$F_{T,Rd}(N)$ [teórica]	PA CF	PET CF
15	1490	1386
25	1920	1743
35	2340	2100

Tabla 20. Valores de Fuerza máxima teórica de PA CF y PET CF.

	$F_{m\acute{a}x}(N)$	$\Delta l_{Fm\acute{a}x}(mm)$	$F_{rotura}(N)$	$\Delta l_{rotura}(mm)$	$K(\frac{N}{mm})$
PLA 15	1574	1,840	1558	2,03	817
PLA 25	2390	2,15	2390	2,18	1300
PLA 35	2890	2,77	2890	2,79	1330
ABS 15	1316	1,42	1309	1,440	809
ABS 25	1872	1,81	1860	1,900	1070
ABS 35	2160	2,17	2160	2,22	1100

Tabla 21. Valores medios experimentales de PLA y ABS.

Si observamos las tablas 19 y 21 anteriores, podemos comparar resultados experimentales entre los materiales ensayados para este proyecto y los materiales plásticos comunes ensayados en otro trabajo con las mismas piezas. En ABS y PLA se observa un crecimiento de todas las variables conforme aumenta su ancho, cosa que no ocurre con los ensayos de PET CF y PA CF.

Experimentalmente, la fuerza máxima tanto de PA CF como de PET CF no se incrementa conforme la pieza es más ancha como debería suceder, tal como vemos en la Figura 118 siguiente, donde teóricamente sí que se incrementa linealmente a mayor longitud efectiva, como efectivamente se demuestra en la Figura 143. Los resultados obtenidos, por tanto, distan de lo que debería haberse producido. En el caso de PA CF, soporta más fuerza una pieza de 15 mm de ancho que las de 25 o 35 mm, lo que hace pensar que los ensayos no hayan ido del todo correctos, rompiéndose las piezas por delaminación o de forma inesperada y prematura. En el caso de las probetas de PET CF, son las piezas de 35 mm las que no cumplen las expectativas y decrece el valor respecto a los demás, por el contrario que teóricamente.

Al resto de parámetros les ocurre lo mismo, no cumplen un orden lógico de crecimiento respecto a la longitud efectiva como ocurre con el ABS y el PLA, con excepción de la rigidez, que sí aumenta aunque con resultados más bajos de lo esperado para el caso de las piezas de 35 mm.

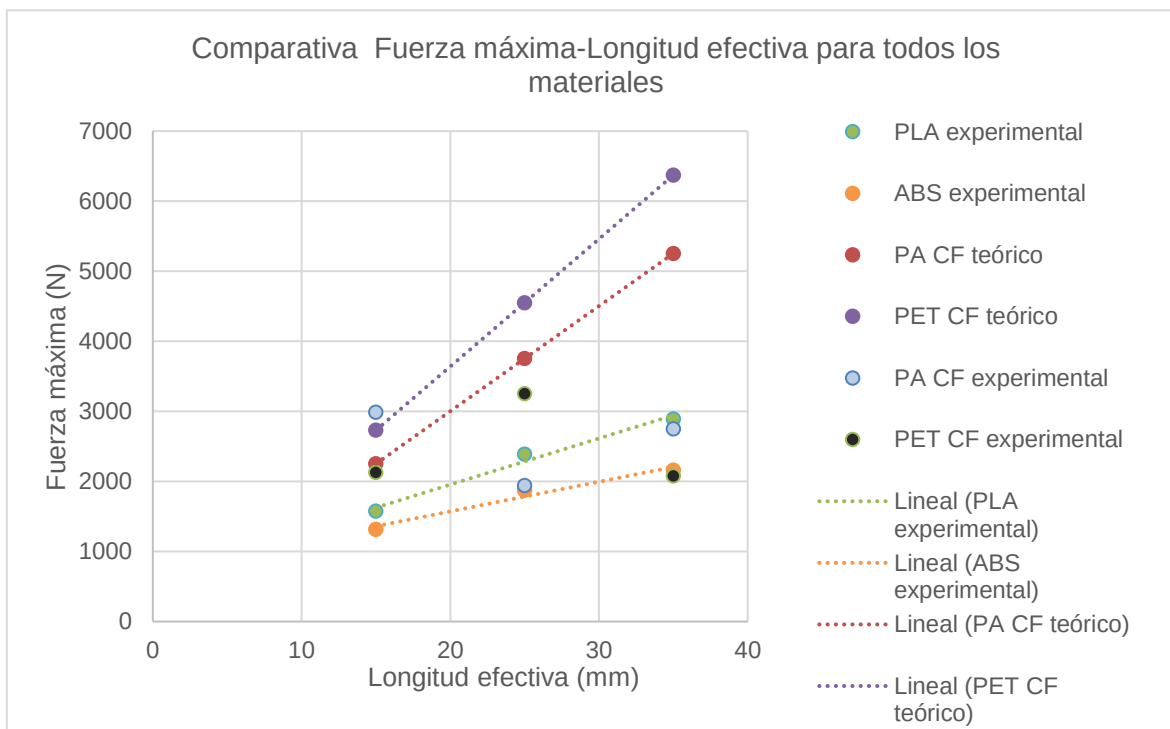


Figura 118. Comparativa de Fuerza máxima en función de la longitud efectiva para todos los materiales.

Se podría decir que, a pesar de que algunos resultados por parte de los ensayos experimentales no son concluyentes, PA CF y PET CF soportan más carga hasta su rotura aunque lo hacen con menor desplazamiento vertical producido que en las piezas de ABS y PLA.

6.3.5. Comparativas de la curva Fuerza-Desplazamiento entre el estudio experimental, la norma (EC3) y la simulación numérica.

En este apartado buscamos realizar una comparación de forma gráfica entre todos los métodos estudiados con las Tstub. Para ello, en primer lugar es necesario obtener la curva simplificada que predice el comportamiento de la unión, como podemos observar en la Figura 119:

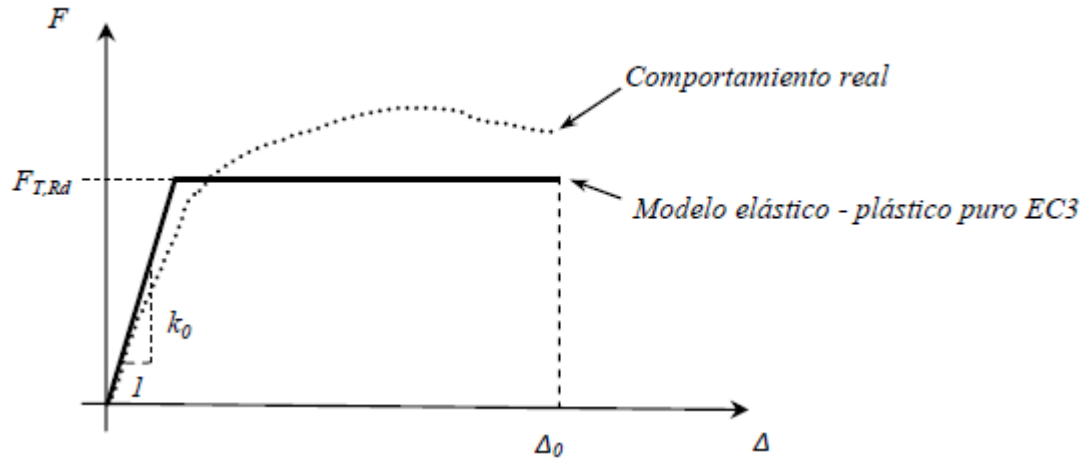


Figura 119. Comportamiento Fuerza-Desplazamiento de un Tstub y modelo adoptado según EC3. [2]

Según la norma, para poder obtener la curva del modelo elástico- plástico puro será necesario calcular la fuerza resistente $F_{T,Rd}$, que será la máxima que soporte el elemento, y la rigidez del modelo Tstub completo, K_0 . La fuerza resistente ha de calcularse para cada uno de los tres modos de fallo según el EC3 [1] y escoger el mínimo de los resultados. Por otro lado, la rigidez inicial del modelo completo vendrá dada a partir de la rigidez de la T y de la rigidez del tornillo.

$$k_{0,b} = 1.6 \frac{E A_s}{L_b}$$

$$k_{0,T} = \frac{1}{2} \frac{E l'_{ef} t_f^3}{m^3}$$

$$K_0 = \frac{1}{\frac{1}{k_{0,T}} + \frac{1}{k_{0,b}}}$$

$$F_{T,Rd_I} = \frac{f_y l_{ef,1} t_f^2}{m}$$

$$F_{T,Rd_{II}} = \frac{\frac{1}{2} f_y l_{ef} t_f^2 + 2 n F_{t,Rd}}{m + n}$$

$$F_{T,Rd_{III}} = \Sigma F_{T,Rd}$$

Los resultados calculados mediante el Eurocódigo 3 [1] se muestran en las siguientes tablas:

b	tw	n	r	m
100	5,6	20	12	17,6

$\lambda = n/m$	1,136
-----------------	-------

PET FC			
Modo I	Modo II	Modo III	Ancho
2730	17350	31408	15
4550	17770	31408	25
6370	18200	31408	35

Tabla 22. Valores de $F_{T,Rd}$, en Newtons, calculados según EC3 para el PET FC.

PA FC			
Modo I	Modo II	Modo III	Ancho
2250	17240	31408	15
3750	17600	31408	25
5250	17960	31408	35

Tabla 23. Valores de $F_{T,Rd}$, en Newtons, calculados según EC3 para la PA FC.

	PET FC			PA FC		
	Tstub	Tornillo	K_0	Tstub	Tornillo	K_0
15	6089,266	211008,00	5918,47	4771,83	211008,00	4666,30
25	10148,78	211008,00	9683,05	7953,05	211008,00	7664,18
35	14208,29	211008,00	13311,92	11134,26	211008,00	10576,19

Tabla 24. Valores de $k_{0,b}$, $k_{0,T}$ y K_0 , en $\frac{N}{mm}$, calculados según EC3 para PET FC y PA FC.

La capacidad de rotación se denomina a la deformación máxima que soporta el modelo Tstub. Dependiendo de la propuesta elegida con la que se calcule saldrán unos valores u otros, ya que existen varios trabajos que han investigado sobre ello. En este caso vamos a calcularla según el EC3.

Podemos decir que el tornillo es el que delimita el fallo, con lo que la capacidad de rotación queda definida según la deformación máxima que soporta. Según el EC3, donde nos dice que cuando la pieza falla por el tornillo se deberá calcular

multiplicando su deformación última por la longitud de sujección, nos queda lo siguiente:

$$\Delta_0 = 2 \cdot \varepsilon_{u,b} \cdot L_b$$

La expresión anterior nos permite calcular el valor teórico de la capacidad de rotación, donde el 2 en la ecuación se debe a la simetría que tenemos en la pieza.

Al haber sido utilizados tornillos de rosca completa, la deformación última se considera como 0,1. En cuanto a la longitud de ejecución del tornillo será, en nuestro caso, la suma del ancho de la pieza de acero para la sujección inferior con el ancho de las Tstub y el ancho de tres arandelas colocadas. Al no saber con exactitud el ancho de la pieza de sujección vamos a suponer que es del orden del triple del ancho de la Tstub, y, por otro lado, los anchos de las arandelas de mayor y menor diámetro son 2 y 1 mm respectivamente.

$$\varepsilon_{u,b} = 0.1$$

$$L_b = 25,5 + 8,5 + 1 + 1 + 2 = 38 \text{ mm}$$

Luego, podemos decir que según el EC3 la capacidad de rotación es:

$$\Delta_0 = 2 \cdot 0,1 \cdot 38 = 7,6 \text{ mm}$$

Para una mejor visualización de los datos, se graficará la curva que predice el comportamiento de la unión según el EC3 hasta un desplazamiento máximo que se considere adecuado, sin llegar a los 7,6 mm calculados anteriormente.

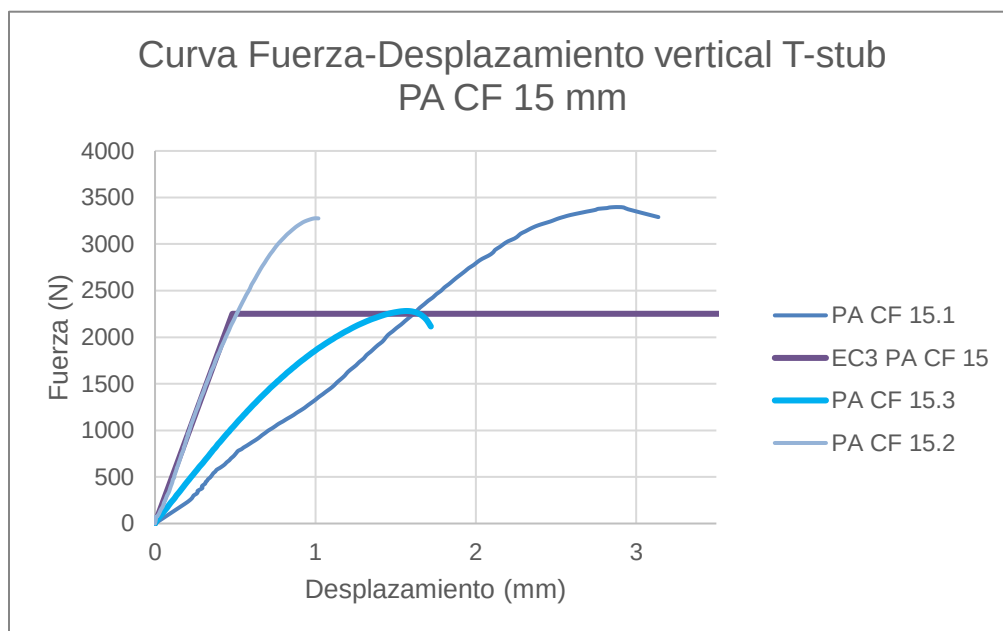


Figura 120. Curva Fuerza-Desplazamiento PA CF 15 mm.

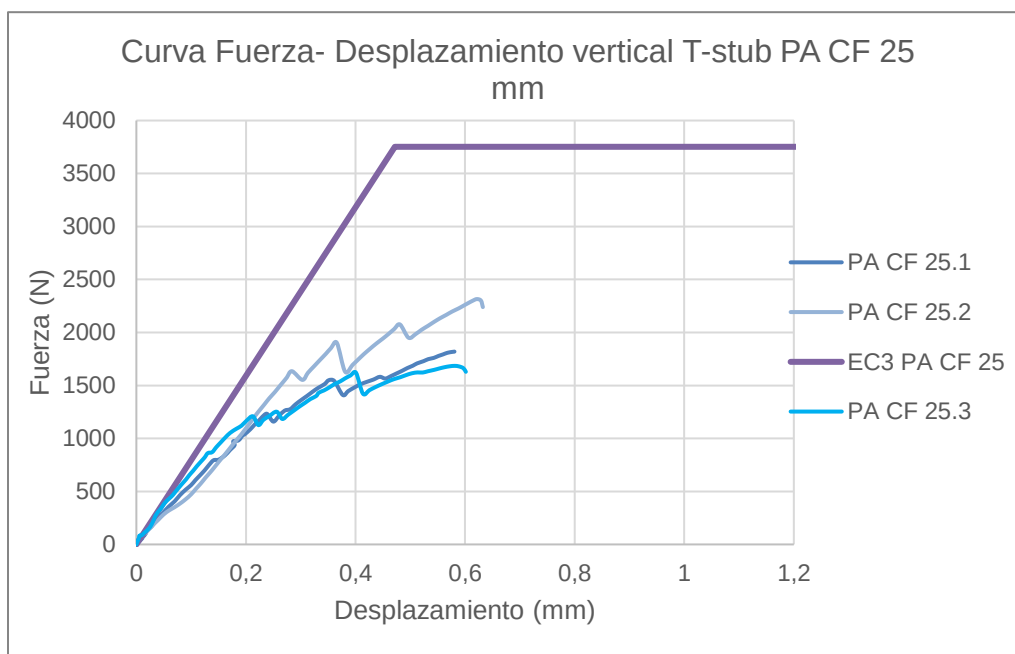


Figura 121. Curva Fuerza-Desplazamiento PA CF 25 mm.

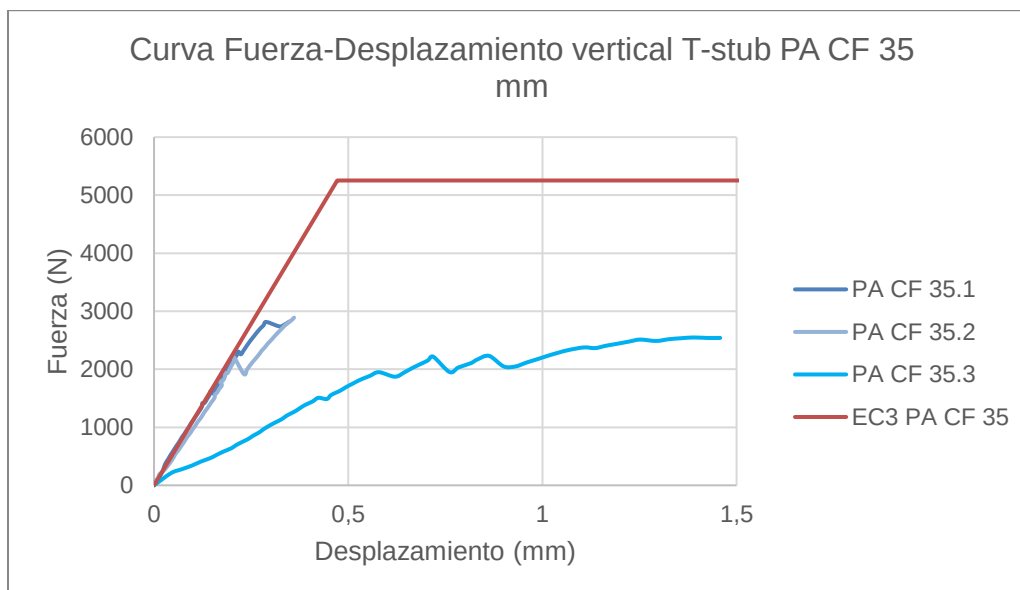


Figura 122. Curva Fuerza-Desplazamiento PA CF 35 mm.

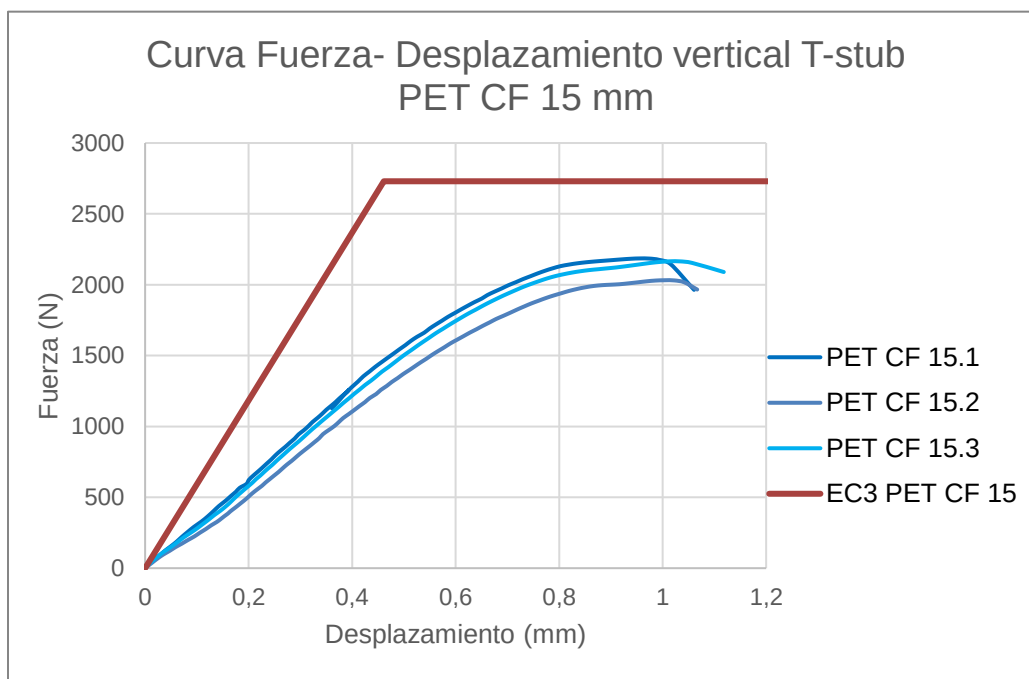


Figura 123. Curva Fuerza-Desplazamiento PET CF 15 mm

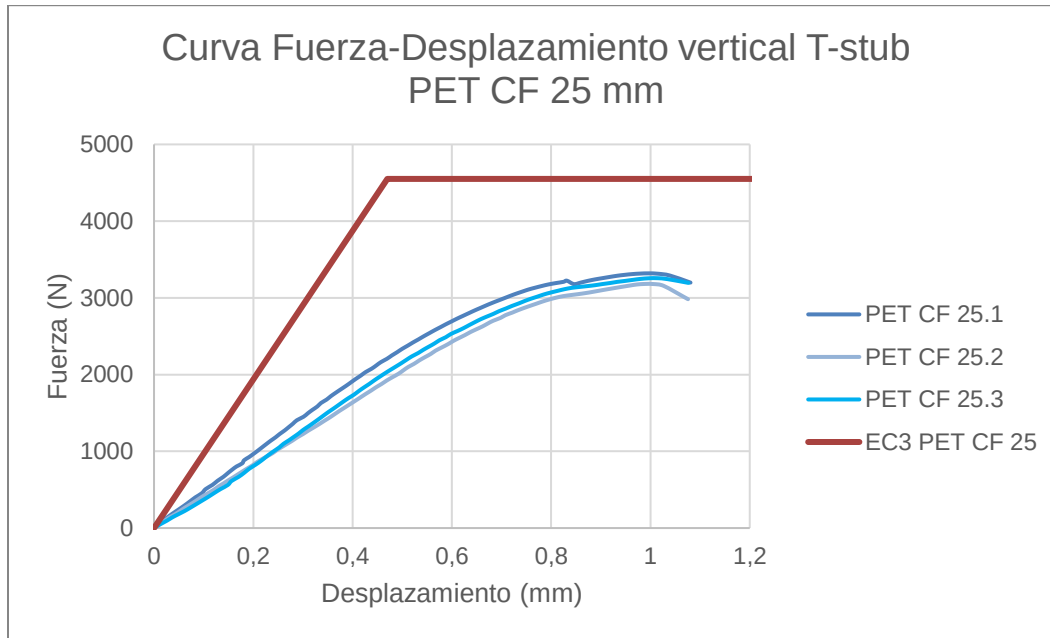


Figura 124. Curva Fuerza-Desplazamiento PET CF 15 mm.

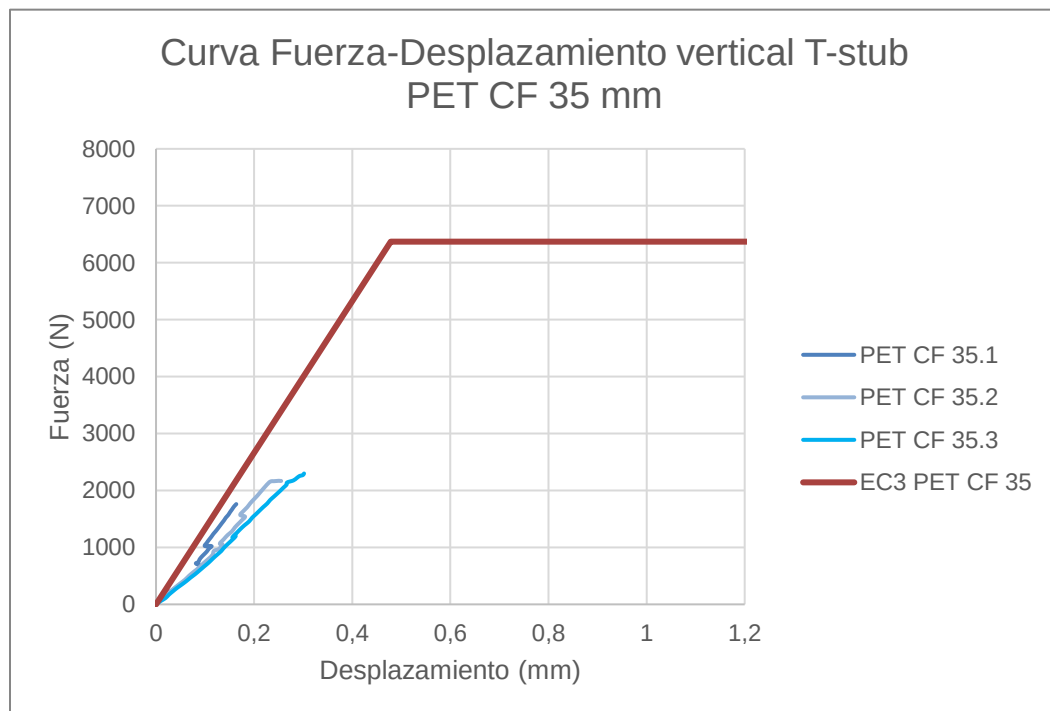


Figura 125. Curva Fuerza-Desplazamiento PET CF 35 mm.

Antes de mostrar los resultados obtenidos al hacer la comparativa con Abaqus es necesario ver en primer lugar las diferencias entre los desplazamientos obtenidos con DIC y con las simulaciones mediante elementos finitos con Abaqus. Con esto se pretende explicar el por qué de la poca similitud entre las curvas Fuerza-Desplazamiento de uno y otro.

En los ensayos experimentales, el desplazamiento vertical se ha medido mediante DIC. Los resultados se obtuvieron procesando cada una de las piezas en Vic 2D, midiendo cómo se desplazaba un punto de la parte inferior de nuestra probeta. Los datos que exportaba el programa serían los que posteriormente se usaron para graficar. En cuanto a las simulaciones numéricas, el proceso a seguir fue el siguiente: la carga se le aplicaría al modelo como una carga de desplazamiento, es decir, que al programa lo que se le daba era el desplazamiento en el momento de tiempo donde experimentalmente la probeta había roto. Por tanto, teniendo en cuenta de que los ensayos se hicieron a $2 \frac{mm}{s}$, si multiplicabamos esa velocidad por el tiempo nos daba el desplazamiento vertical que habría sufrido la pieza en ese instante, el cual es el que se introduce como carga de desplazamiento en la simulación, como hemos dicho anteriormente. Como habíamos hecho en Vic 2D, en Abaqus graficamos el desplazamiento que sufre el mismo punto inferior y central de la probeta frente al tiempo, para así tener los datos.

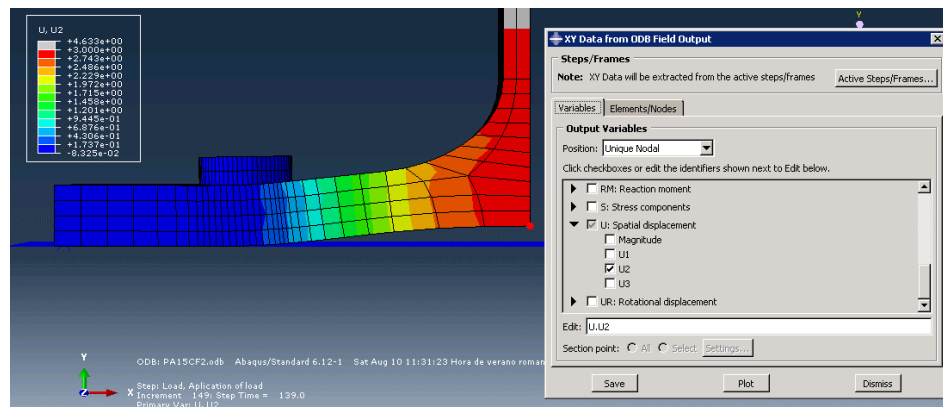


Figura 126. Procedimiento para graficar el desplazamiento de la simulación en Abaqus.

La más importante de esto era poder casar los datos de la simulación con los datos de la Instron durante el ensayo, que nos daba un dato por cada segundo. Esto mismo se tuvo que definir también en Abaqus, para así poder comparar resultados en el instante de tiempo que se quisiera, sabiendo que los datos estaban sincronizados.

El problema en cuestión es la poca similitud entre los desplazamientos entre el DIC y la simulación, siendo éstos últimos considerablemente mayores, como podemos ver en las siguientes comparativas:

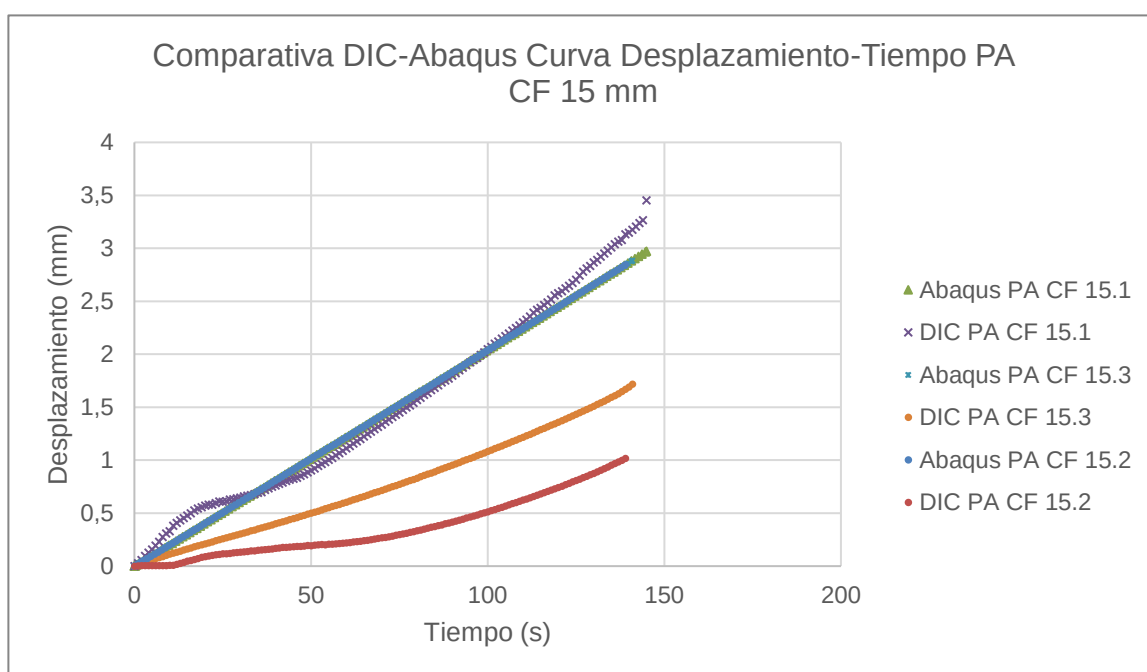


Figura 127. Comparativa curva Desplazamiento-Tiempo entre DIC y simulación numérica PA CF 15 mm.

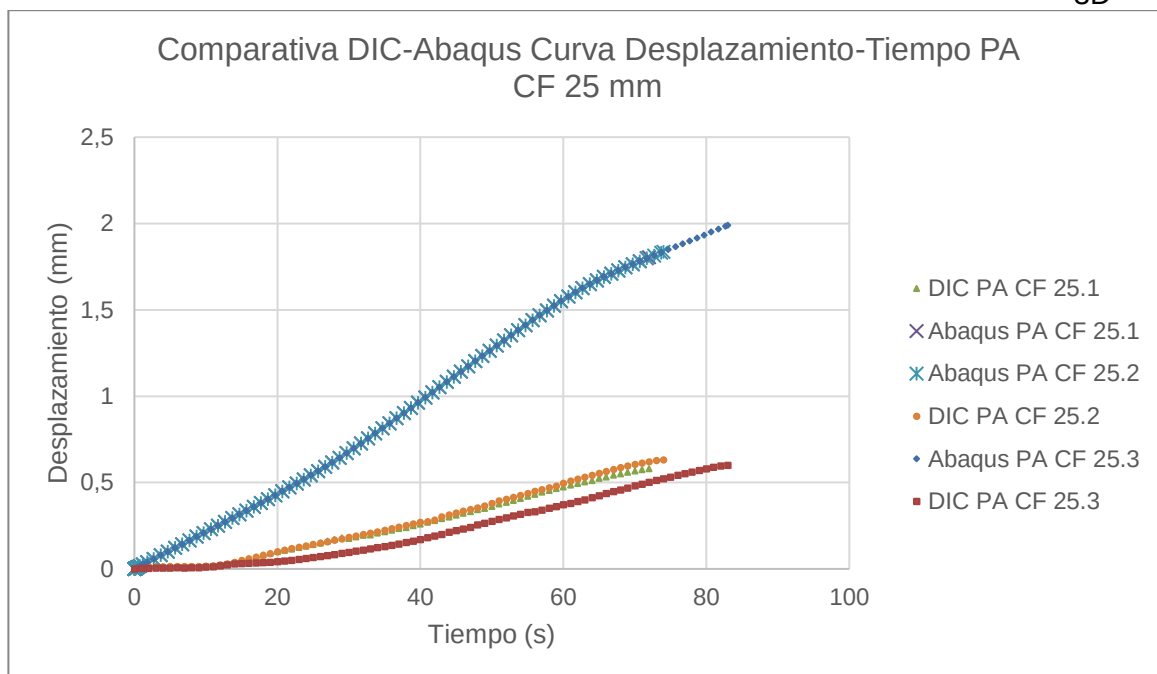


Figura 128. Comparativa curva Desplazamiento-Tiempo entre DIC y simulación numérica PA CF 25 mm.

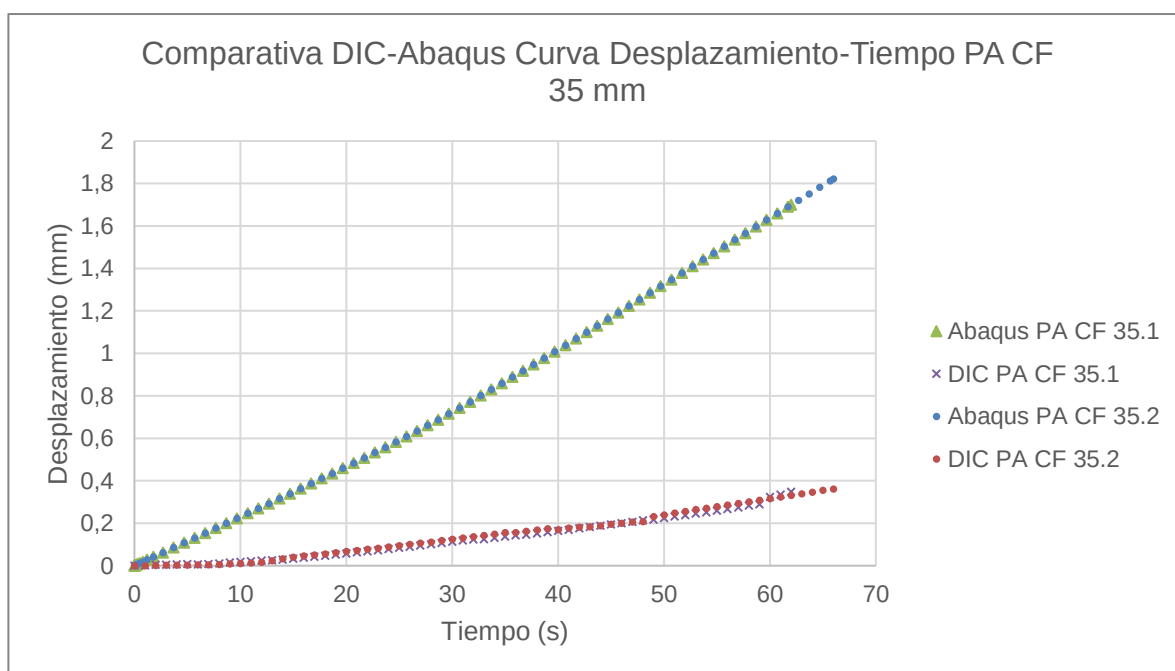
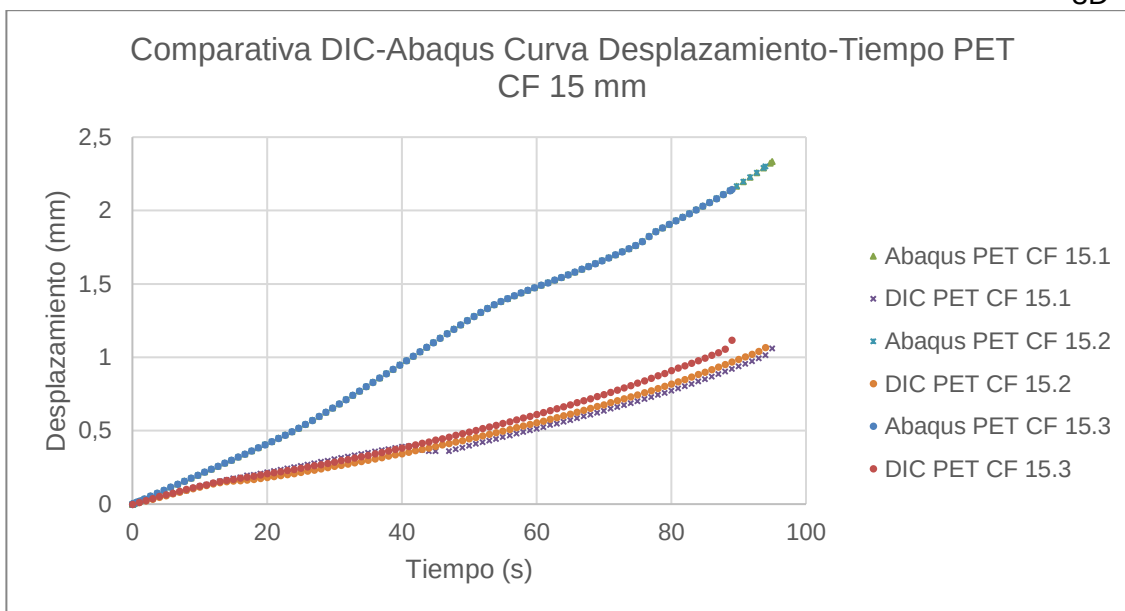
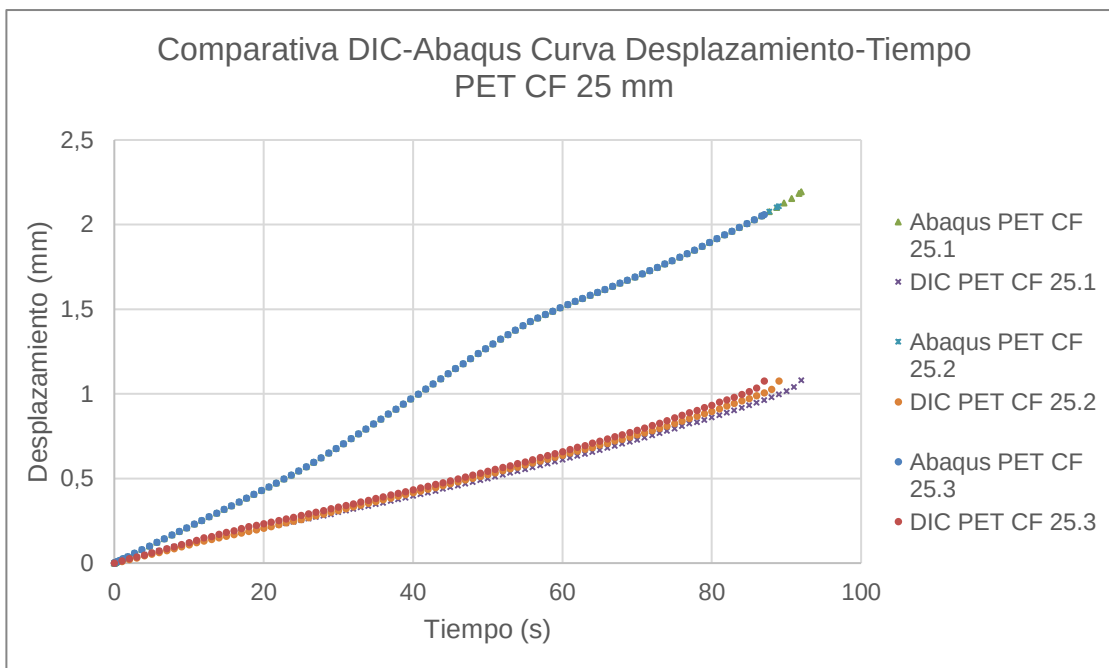


Figura 129. Comparativa curva Desplazamiento-Tiempo entre DIC y simulación numérica PA CF 35 mm.



**Figura 130. Comparativa curva Desplazamiento-Tiempo entre DIC y simulación numérica PET
CF 15 mm.**



**Figura 131. Comparativa curva Desplazamiento-Tiempo entre DIC y simulación numérica PET
CF 25 mm.**

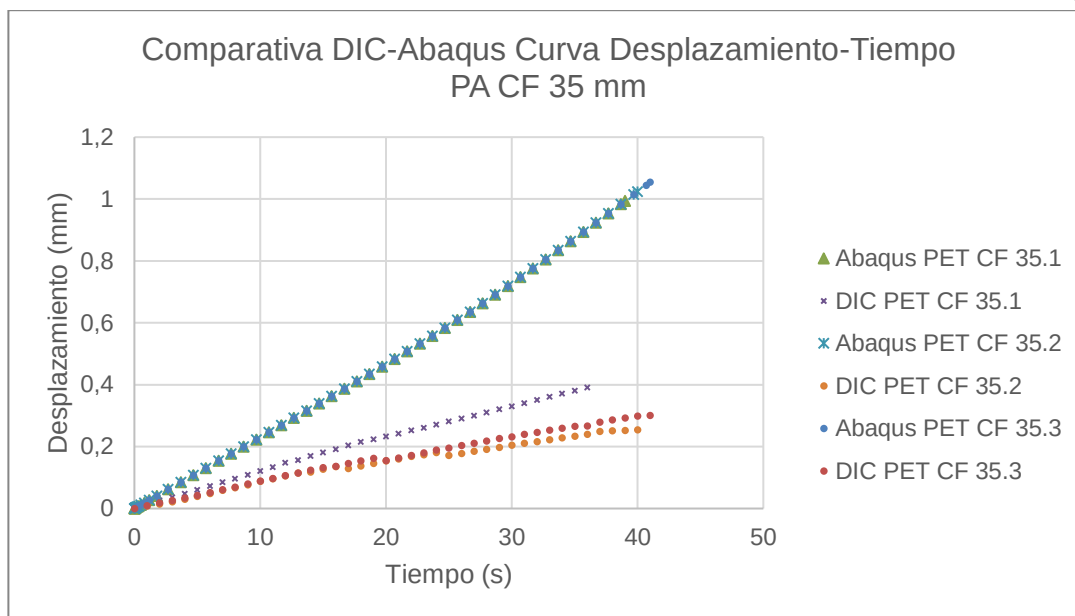


Figura 132. Comparativa curva Desplazamiento-Tiempo entre DIC y simulación numérica PET CF 35 mm.

Una vez realizada esta comparación donde efectivamente se demuestran las diferencias existentes entre los desplazamientos, a continuación se muestra la comparativa completa entre todos los métodos de estudio realizados:

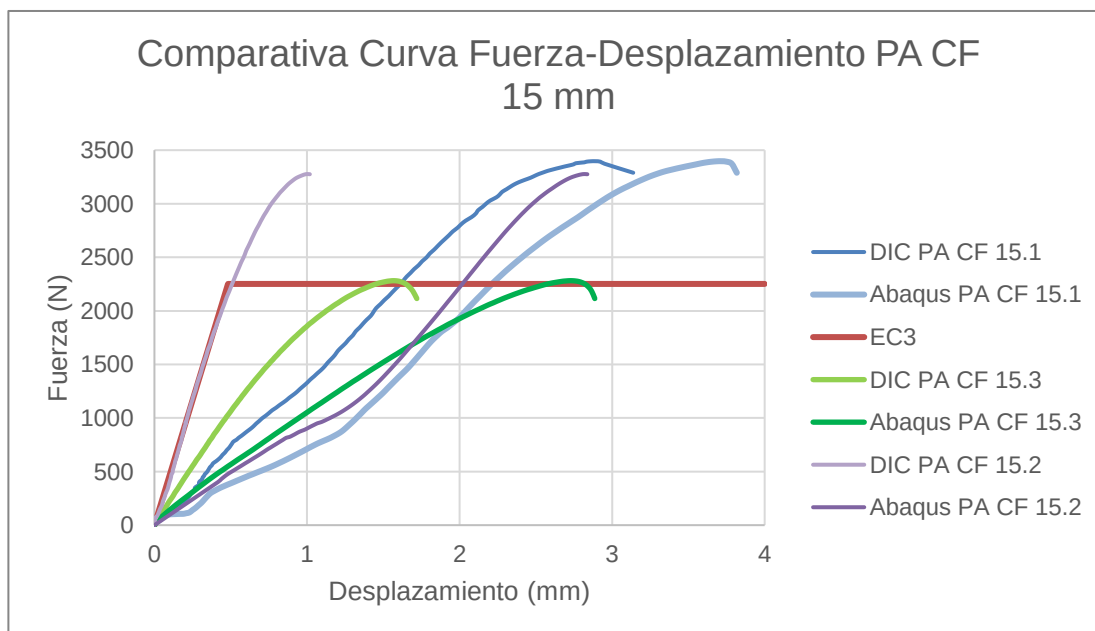


Figura 133. Comparativa Curva Fuerza-Desplazamiento PA CF 15 mm de longitud efectiva.

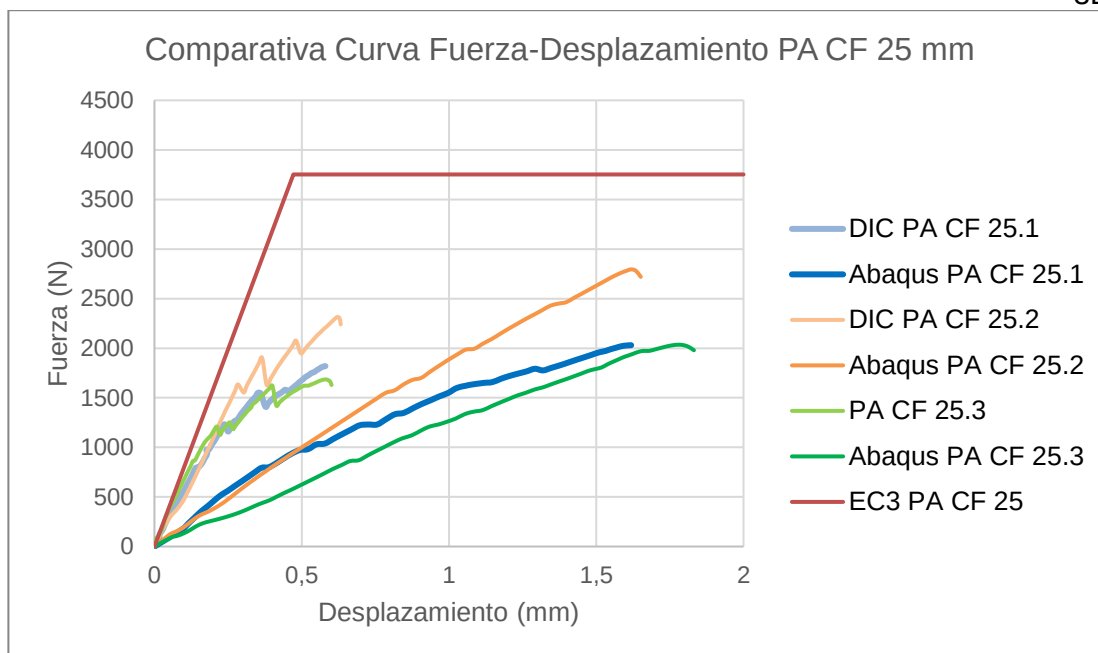


Figura 134. Comparativa Curva Fuerza-Desplazamiento PA CF 25 mm de longitud efectiva.

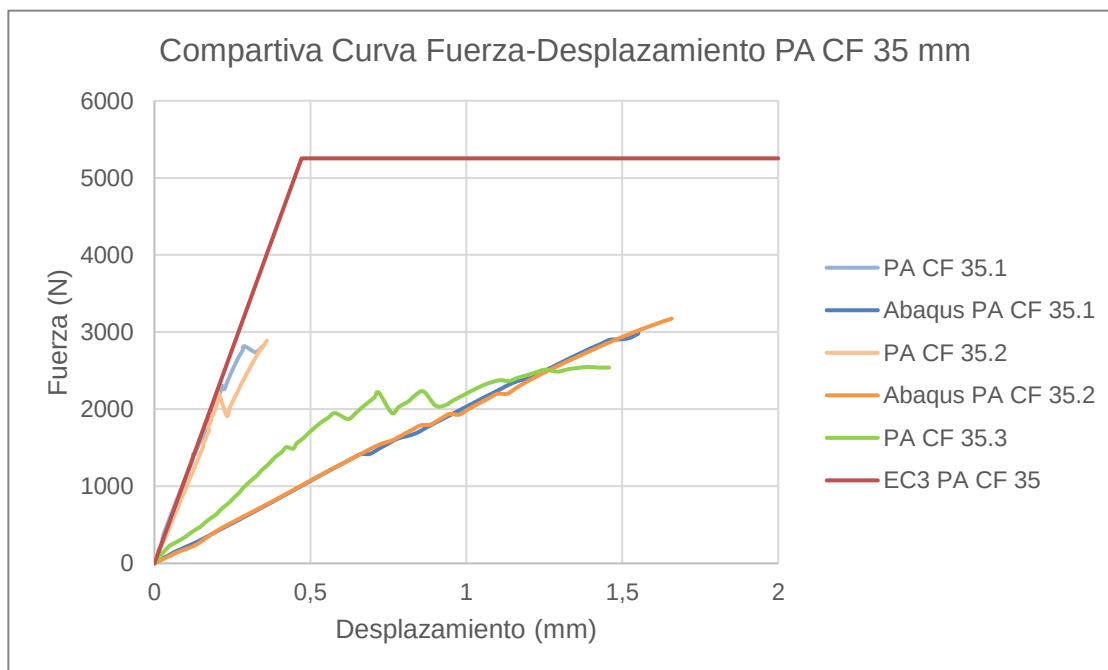


Figura 135. Comparativa Curva Fuerza-Desplazamiento PA CF 35 mm de longitud efectiva.

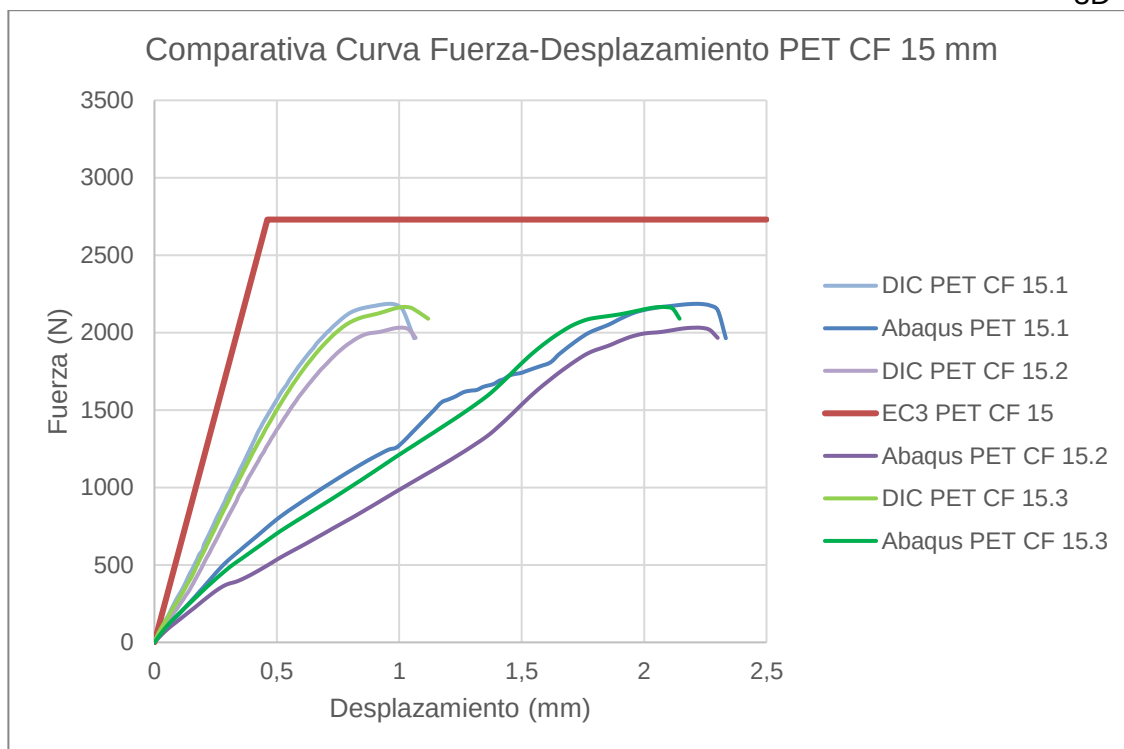


Figura 136. Comparativa Curva Fuerza-Desplazamiento PET CF 15 mm de longitud efectiva.

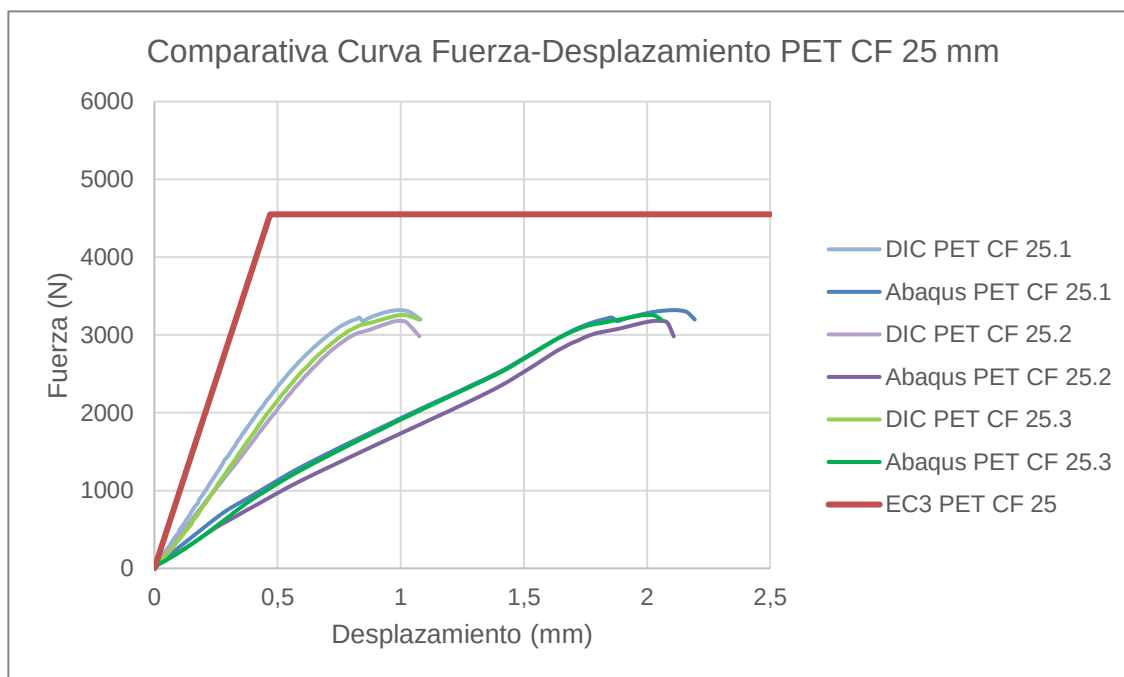


Figura 137. Comparativa Curva Fuerza-Desplazamiento PET CF 25 mm de longitud efectiva.

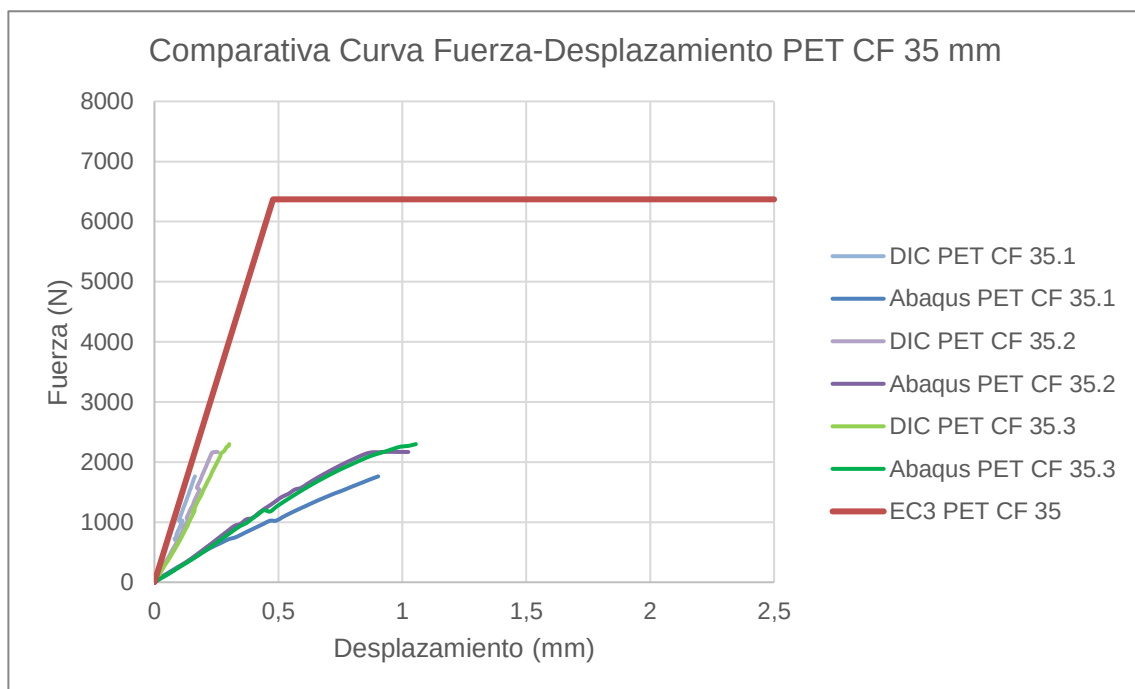


Figura 138. Comparativa Curva Fuerza-Desplazamiento PET CF 35 mm de longitud efectiva.

Tal y como se puede observar de la Figura 127 a 132, el desplazamiento que ha dado resultado de hacer la simulación numérica, simulando la pieza como un sólido isótropo con propiedades definidas según el material en su dirección horizontal de impresión, ha sido mucho mayor en todos los casos que el realmente medido durante los ensayos mediante DIC. Esto hace que tengamos unas curvas bastante diferentes que las curvas que obtenemos con los desplazamientos en DIC.

Como las curvas experimentales se ajustan mucho más a las curvas teóricas calculadas según el Eurocódigo 3, donde sobre todo se puede apreciar en el valor de rigidez entre una y otra, que son de una pendiente muy parecida o en algunos casos casi igual, da a entender que los resultados obtenidos mediante el DIC son más fiables que los obtenidos con la simulación numérica, donde ni se obtienen desplazamientos verticales parecidos ni tampoco una pendiente (rigidez) comparable o similar a la del EC3.

Por tanto, como conclusión podemos decir que justificamos los errores en las simulaciones diciendo que se han realizado considerando un sólido isótropo de densidad constante, cuando en realidad lo que tenemos son sólidos fabricados por capas y con refuerzos de fibra.

6.3.6. Distintas comparativas respecto a la longitud efectiva de las probetas Tstub.

Con el objetivo de observar qué importancia tiene la variación de la longitud efectiva (ancho de nuestras probetas: 15, 25 y 35 mm) en algunas de las variables más significativas de los ensayos realizados, se han graficado resultados respecto a esa variación de espesor para PA CF y PET CF, como vemos a continuación:

Longitud efectiva	PA CF Δ rotura		
	15	25	35
	3,14	0,581	0,348
	1,019	0,632	0,361
	1,720	0,601	1,458
Valores medios	1,959	0,605	0,722

Tabla 25. Alargamiento de rotura respecto a longitud efectiva PA CF.

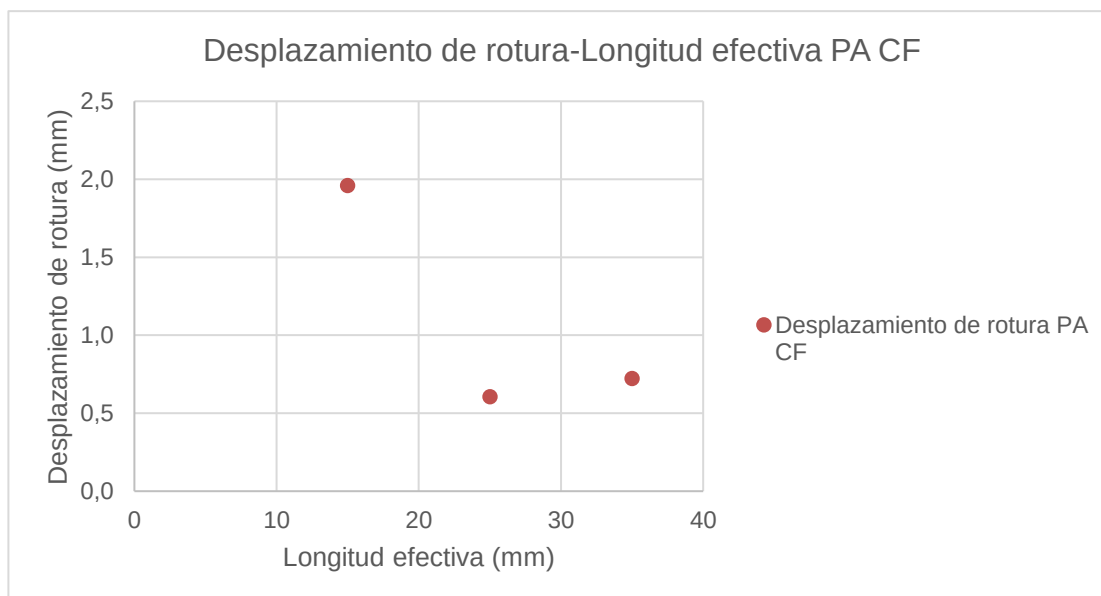


Figura 139. Desplazamiento de rotura frente a longitud efectiva PA CF.

	PET CF	Δ rotura	
Longitud efectiva	15	25	35
	1,060	1,081	0,1636
	1,067	1,076	0,255
	1,118	1,077	0,302
Valores medios	1,082	1,078	0,240

Tabla 26. Alargamiento de rotura respecto a longitud efectiva PET CF.

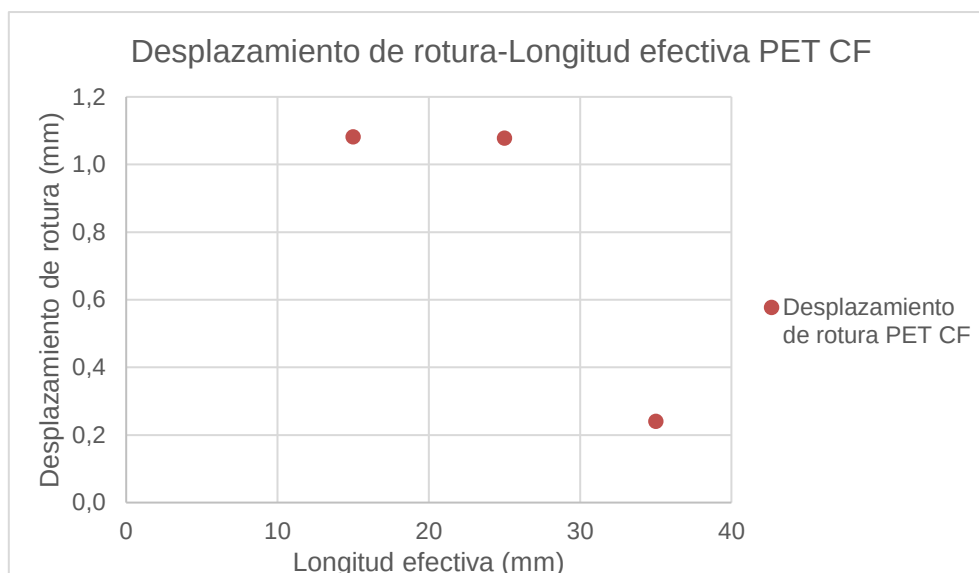


Figura 140. Desplazamiento de rotura frente a longitud efectiva PET CF.

	PA CF	Rigidez (N/mm)	
Longitud efectiva	15	25	35
	1387	5190	10180
	4650	5580	9970
	2020	6180	3430
Valores medios	2680	5650	7860

Tabla 27. Rigidez respecto a longitud efectiva PA CF.

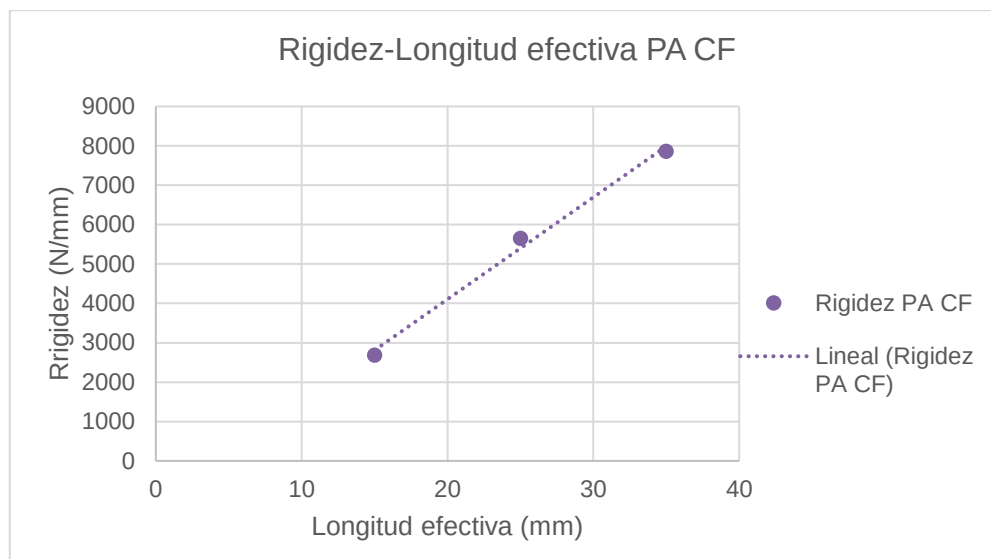


Figura 141. Rigidez frente a longitud efectiva PA CF.

Longitud efectiva	PET CF Rigidez (N/mm)		
	15	25	35
	3210	4790	6740
	2820	4050	7430
	3070	4400	7180
Valores medios	3030	4410	7120

Tabla 28 . Rigidez respecto a longitud efectiva PET CF.

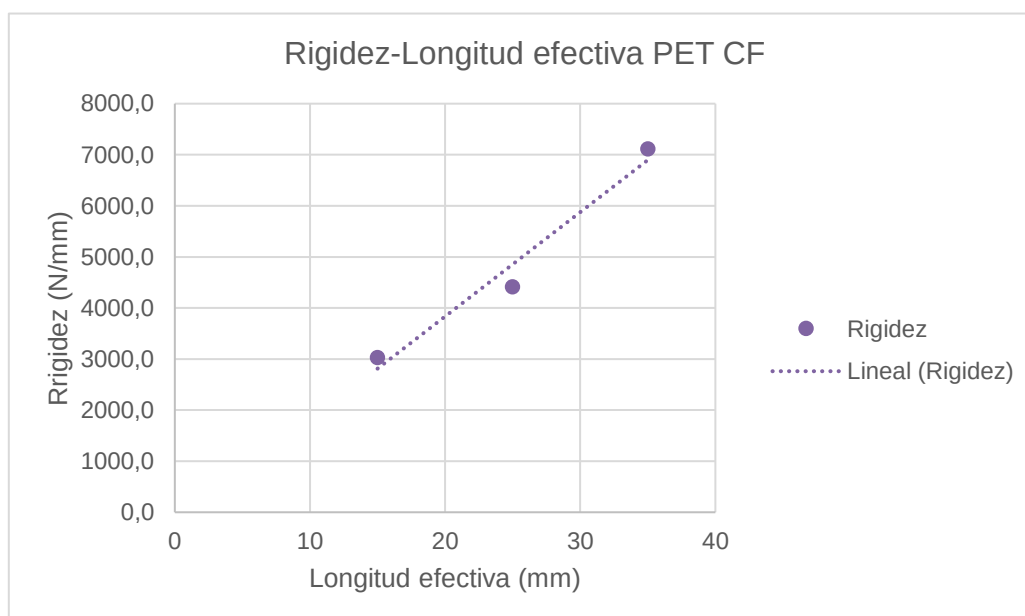


Figura 142. Rigidez frente a longitud efectiva PET CF.

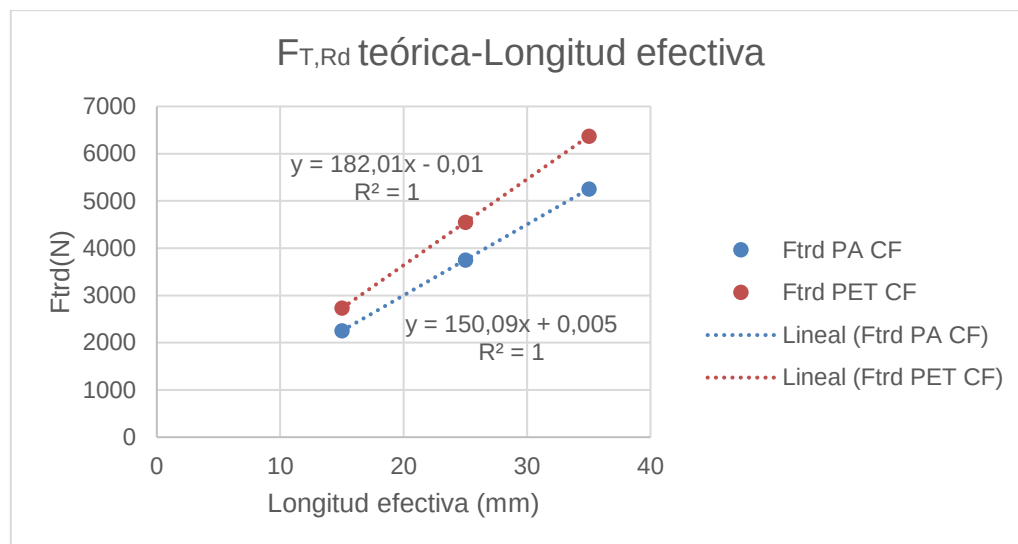


Figura 143. Fuerza máxima resistente teórica frente a longitud efectiva.

De las Figuras 139 a la 143 podemos observar distintas curvas de algunos de los parámetros más importantes respecto a la variación de longitud efectiva de nuestras piezas ensayadas.

Si graficamos el desplazamiento de rotura respecto a la longitud efectiva, como podemos ver en las Figuras 139 y 140, vemos como decrece para ambos materiales conforme aumentamos el ancho de la pieza, aunque en PET los resultados de la media entre las piezas de 15 y 25 mm son prácticamente iguales. En PA CF sí que se nota más como descienden los datos, con valores que decaen mucho de unas piezas a otras. Cabe destacar que para ABS y PLA ocurre exactamente lo contrario, la longitud de rotura se va incrementando conforme la pieza es más ancha, como podemos observar en la Tabla 21.

En cuanto a la variación de la rigidez respecto a la longitud efectiva, como vemos en las Figuras 141 y 142, claramente aumenta debido al aumento también del ancho tanto para PA CF como para PET CF. Si hacemos una comparación entre ambos materiales, la rigidez en el caso del material PA CF es mayor que en el caso de PET CF tanto para las piezas de 25 y 35 mm, no así con las de 15 mm, donde ocurre lo contrario.

En el caso de la Fuerza máxima resistente teórica representada en la Figura 143, vamos como aumenta a medida que aumenta la longitud efectiva pero, como se ha explicado más detenidamente en el apartado anterior, no se cumple de la misma forma con los resultados experimentales, donde, a pesar de ser la fuerza mayor a la teórica como debería ser, no se incrementa de la misma forma que lo hace teóricamente con la longitud efectiva.

6.3.7. Localización de las rótulas plásticas.

Para localizar las rótulas plásticas en nuestras probetas de nuevo haremos uso del programa Vic 2D. Lo que buscamos es hacer una representación de la deformación de Von Mises a lo largo de una recta respecto a la dirección en X. Las zonas donde se podrá ver la aparición de las rótulas plásticas serán tanto en la zona inferior como en la superior de las alas del perfil. Por tanto, en Vic 2D, crearemos esas dos rectas, donde E0 nos medirá las deformaciones de Von Mises en la parte inferior y E1 de igual forma en la parte superior. Dado a que el mallado no se ajusta completamente a los límites de la pieza lo que se hará será medir la distancia desde el centro hasta las rectas que hemos colocado y, como las deformaciones serán proporcionales a la distancia a la fibra neutra, calcularemos el valor exacto por semejanza de triángulos.

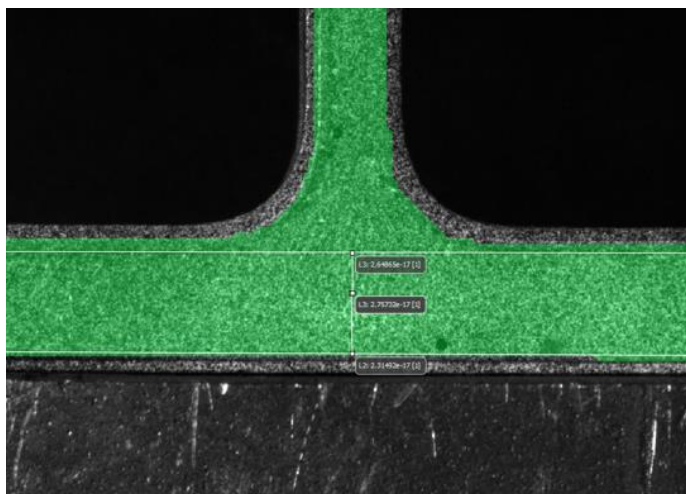


Figura 144. Imagen de Vic 2D calculando la distancia al centro de la probeta.

Al representar E1 y E2, que recordamos que son los valores a lo largo de una recta horizontal de la deformación de Von Misses, frente a la distancia X a lo largo del eje longitudinal de la probeta conseguiremos localizar las rótulas. Para analizar el momento exacto donde aparecen pondremos como criterio que la deformación de Von Misses sea máxima, de esta forma ya sabremos qué foto analizar en Vic 2D una vez encontrada.

En las gráficas que vamos a ver a continuación, las rótulas se aprecian bastante bien dado a que la curva se incrementa en forma de picos muy visibles. Estos picos son los valores que han conseguido sobrepasar el valor de la deformación del límite elástico, por lo que la pieza plastifica y aparece una rótula plástica. En la parte inferior de cada gráfica estará la imagen procesada en Vic, donde es posible apreciar que los picos que aparecen coinciden con la zona de mayor deformación en la probeta.

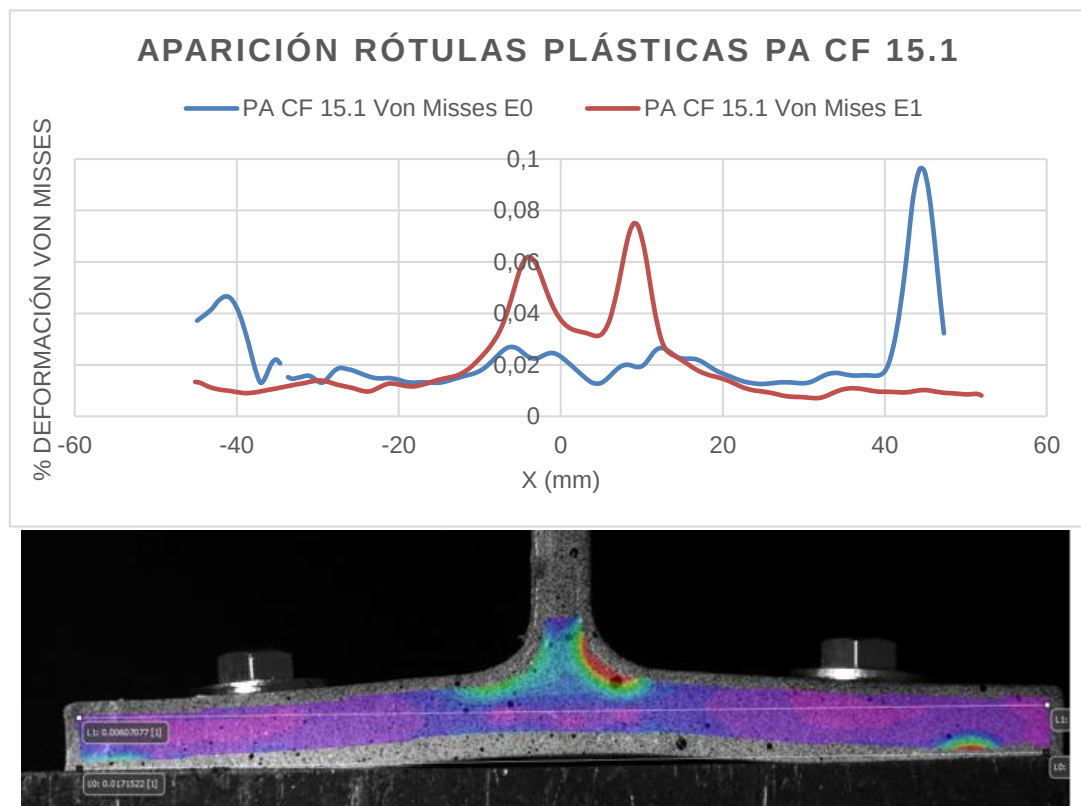


Figura 145. Rótulas plásticas PA CF 15.1.

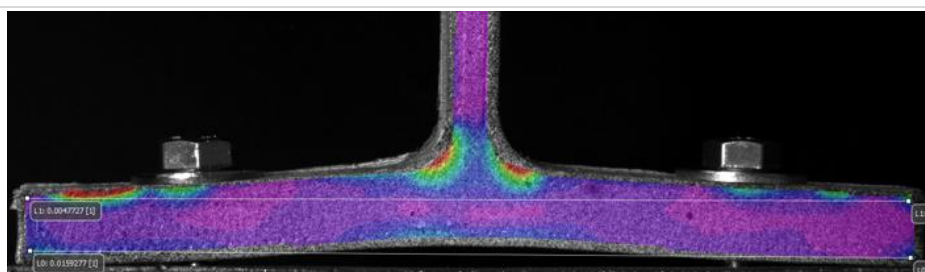
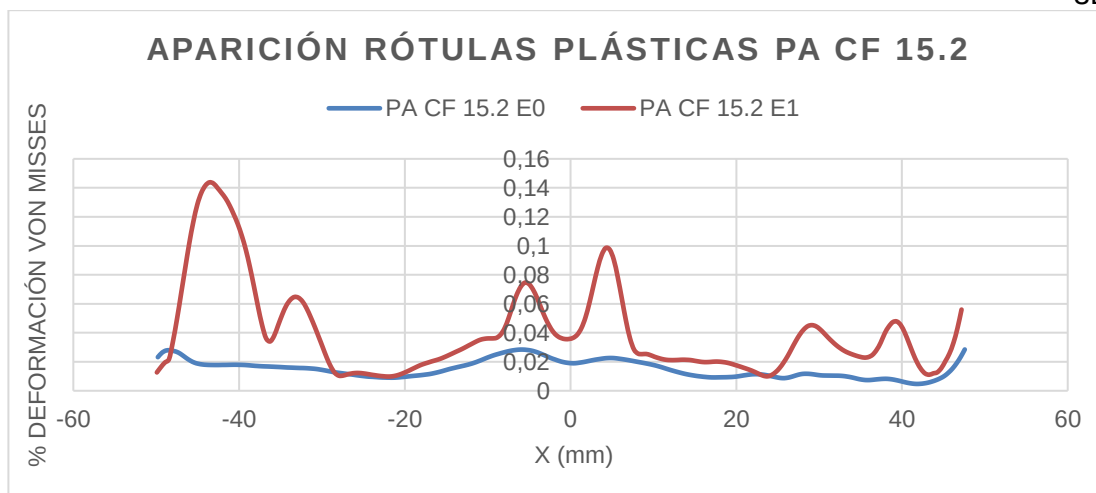


Figura 146. Rótulas plástica PA CF 15.2.

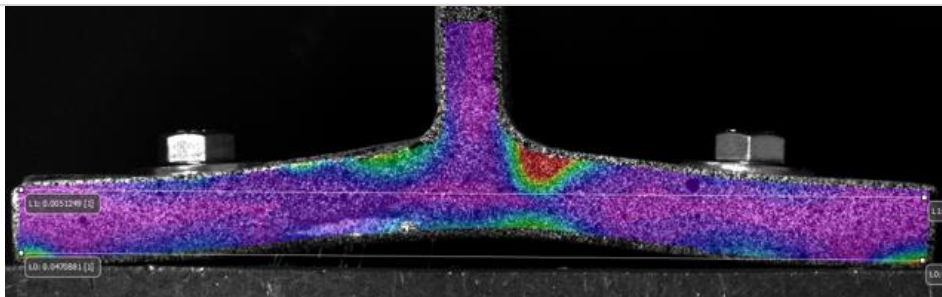
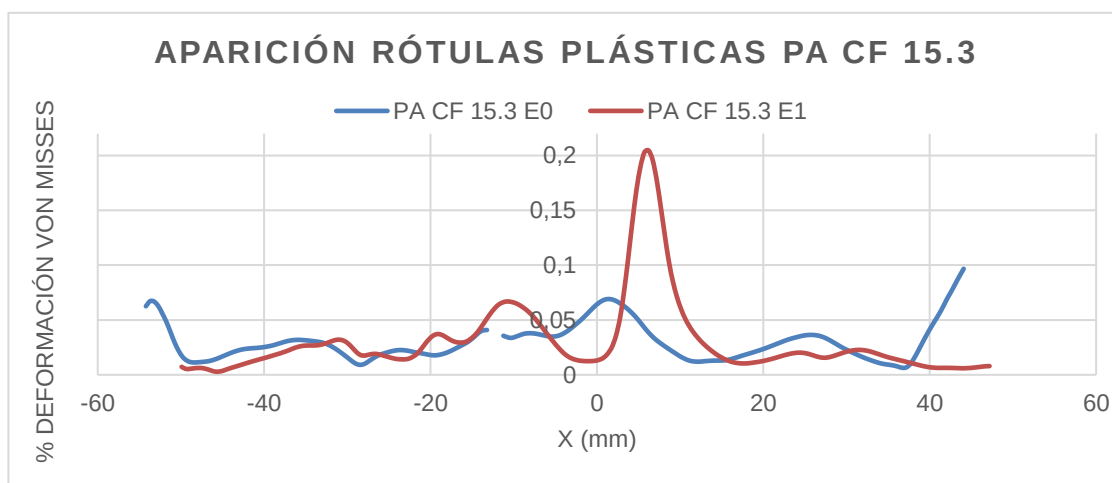


Figura 147. Rótulas plásticas PA CF 15.3.

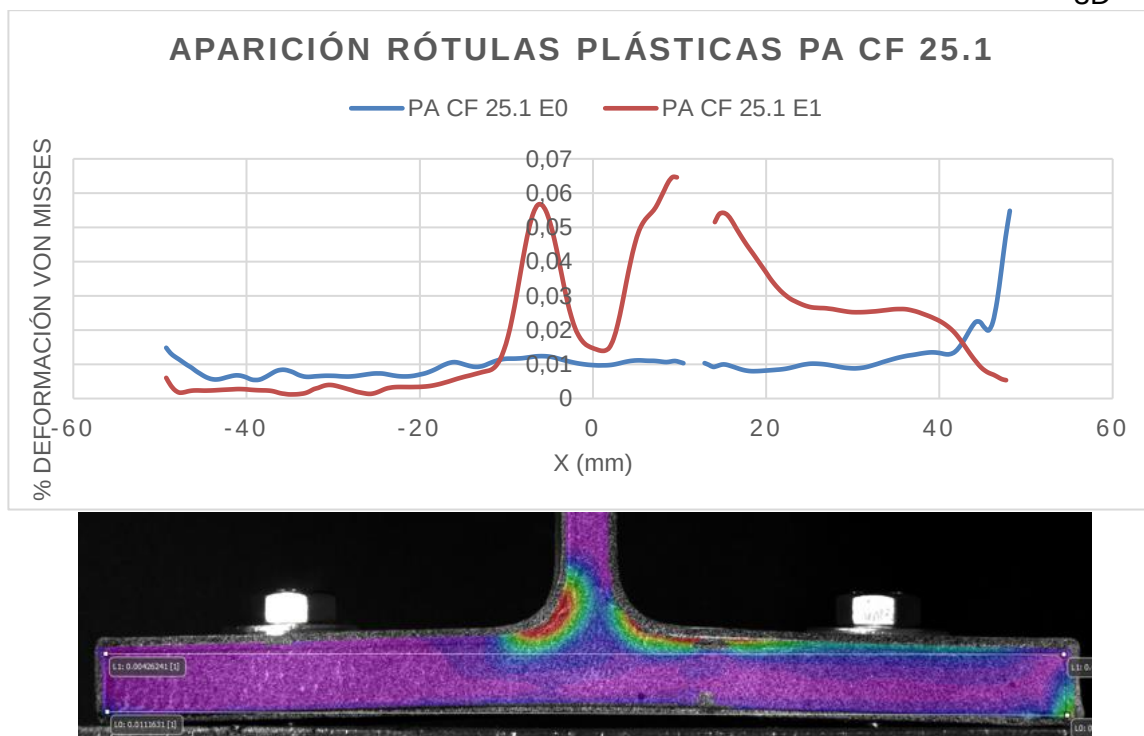


Figura 148. Rótulas plásticas PA CF 25.1

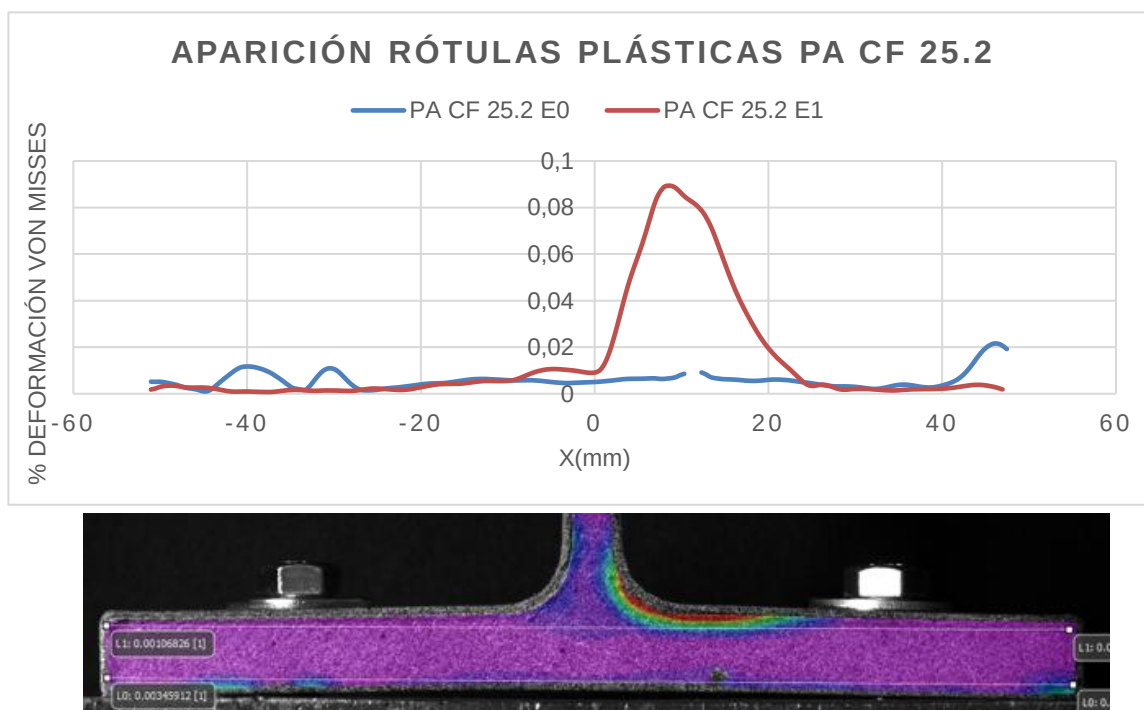


Figura 149. Rótulas plásticas PA CF 25.2.

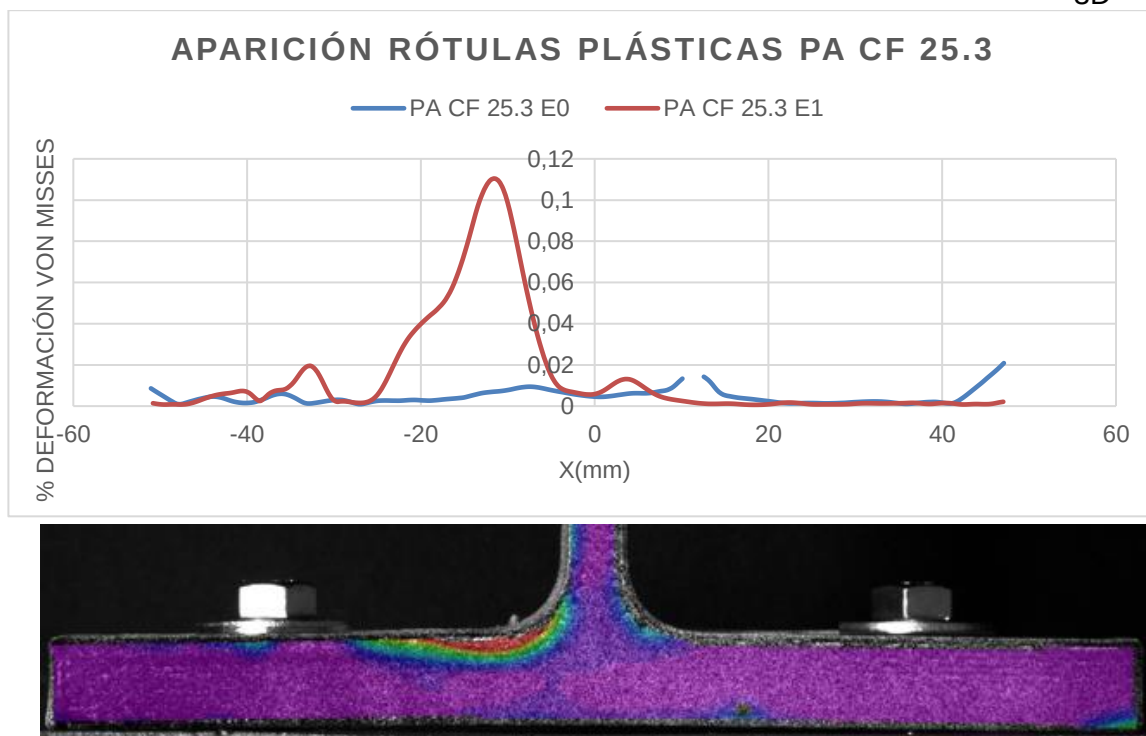


Figura 150. Rótulas plásticas PA CF 25.3.

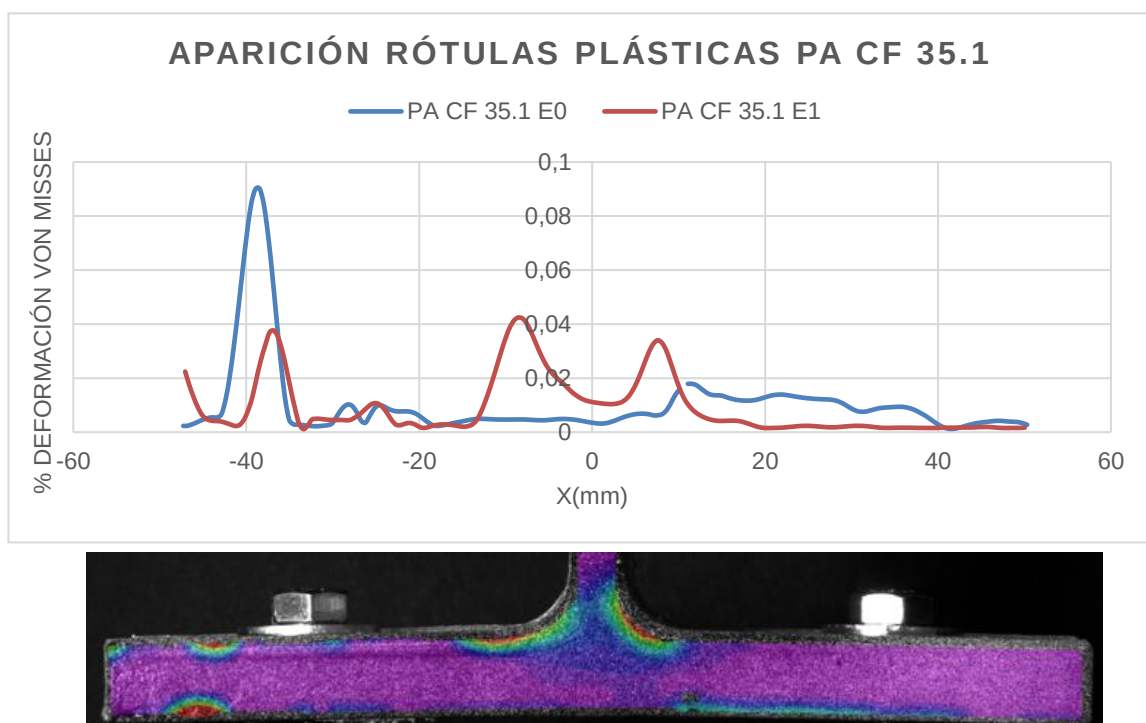


Figura 151. Rótulas plásticas PA CF 35.1.

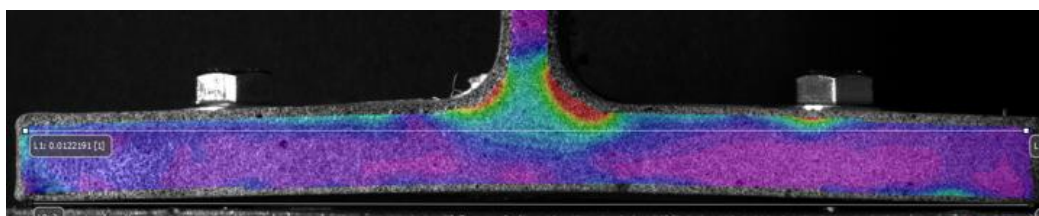
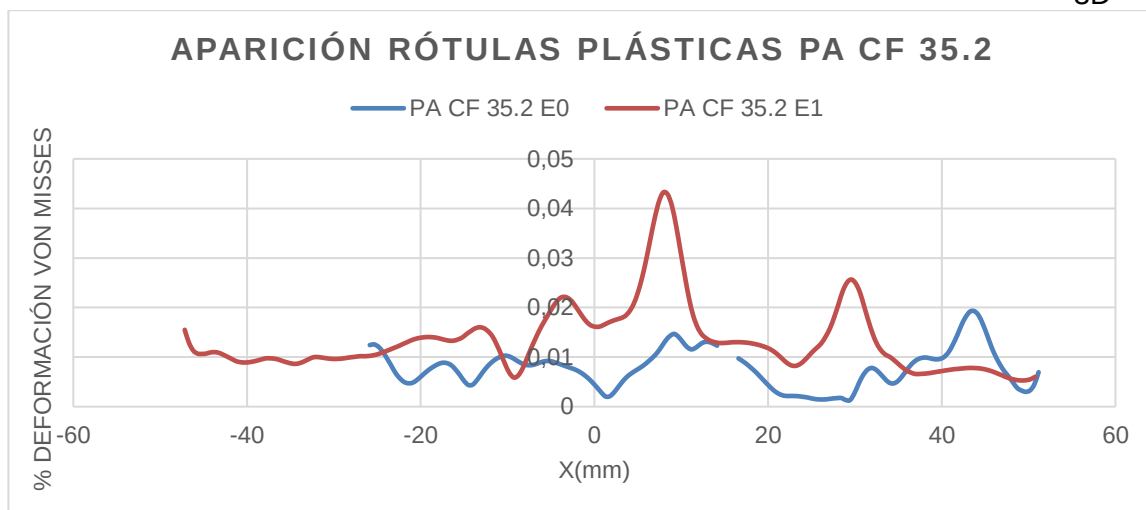


Figura 152. Rótulas plásticas PA CF 35.2.

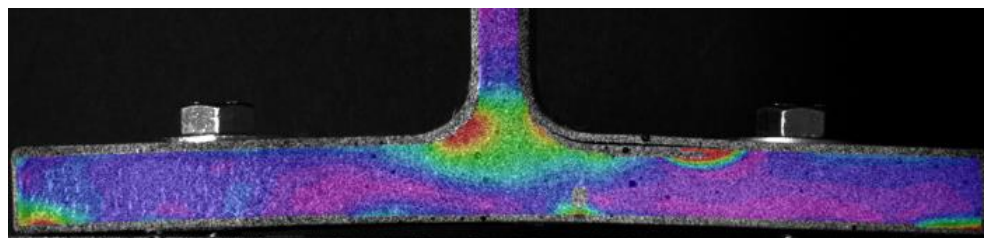
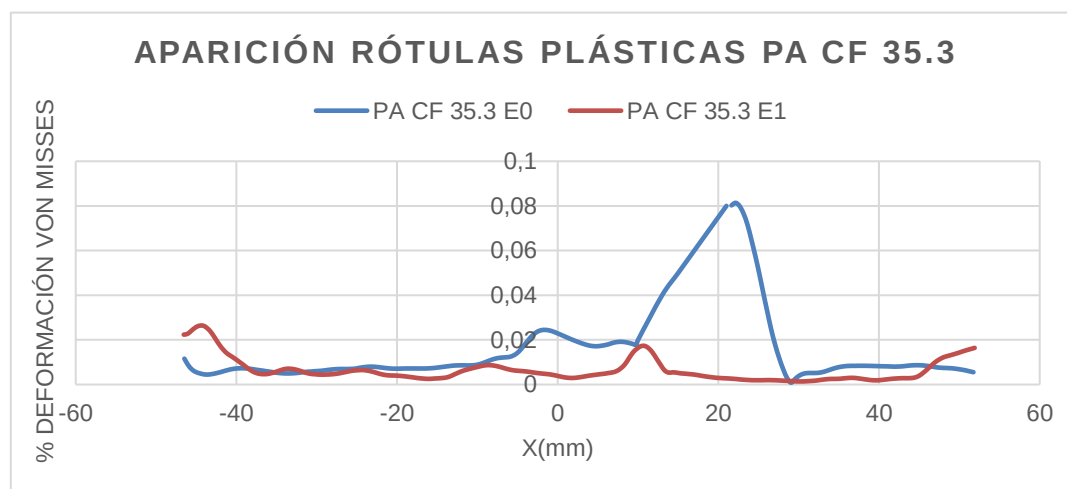


Figura 153. Rótulas plásticas PA CF 35.3.

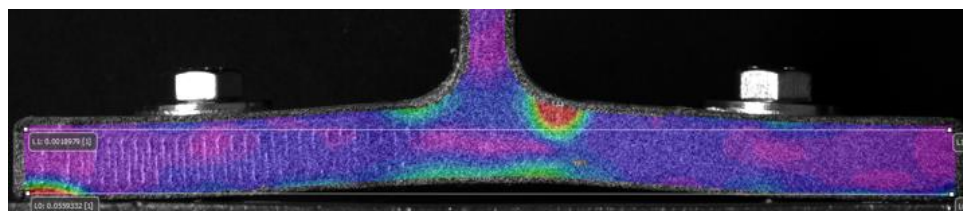
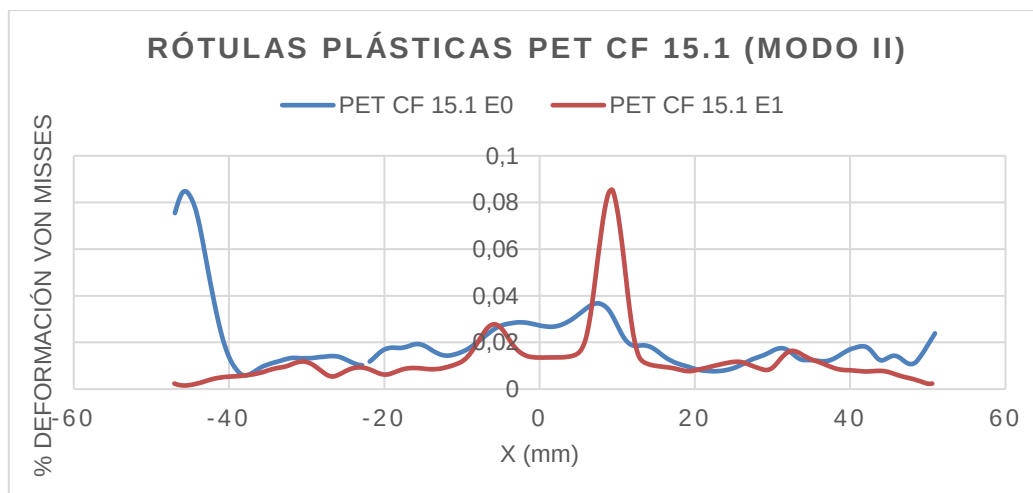


Figura 154. Rótulas plásticas PET CF 15.1 Modo II de fallo.

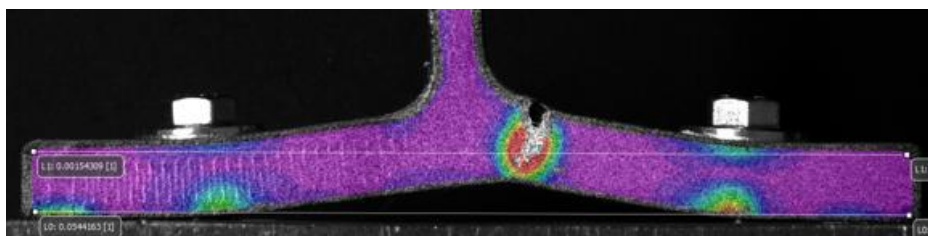
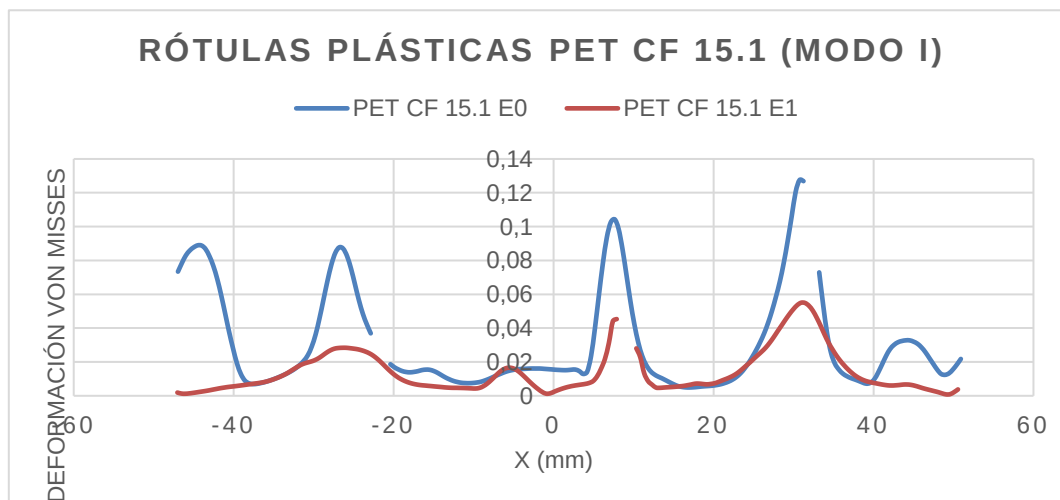


Figura 155. Rótulas plásticas PET CF 15.1 Modo I de fallo.

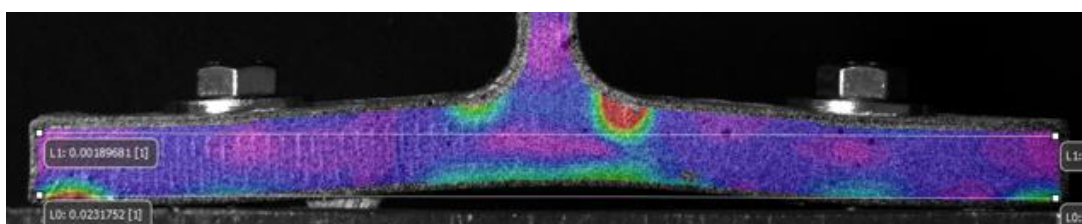
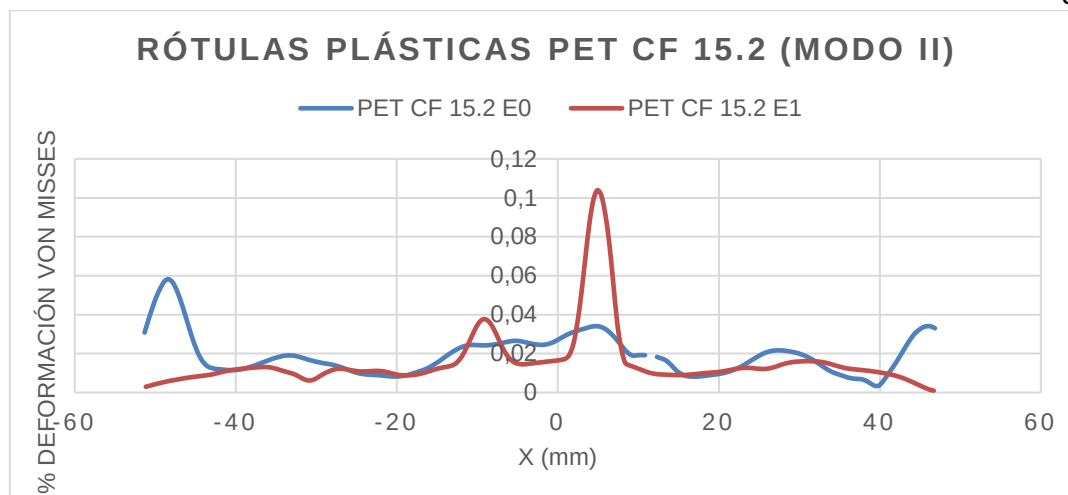


Figura 156. Rótulas plásticas PET CF 15.2 Modo II de fallo.

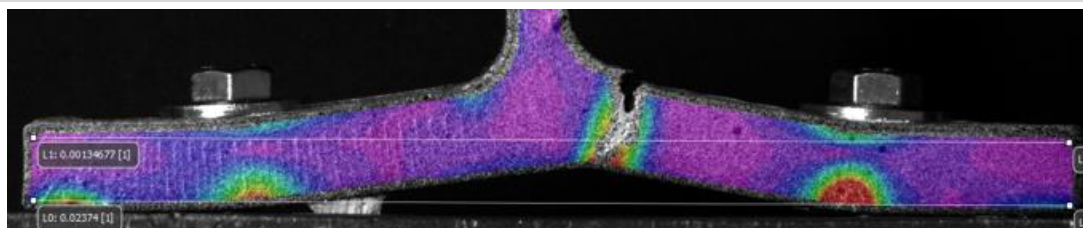
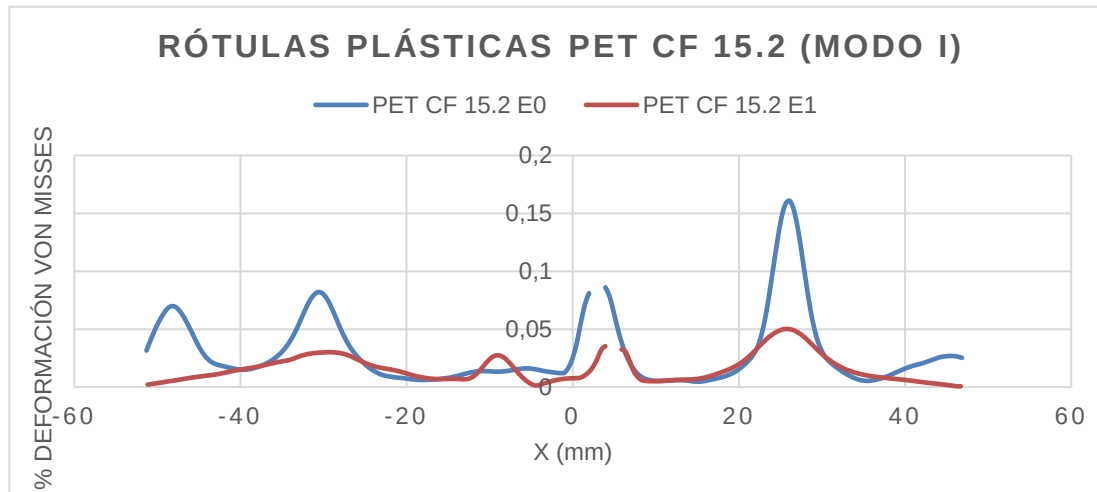


Figura 157. Rótulas plásticas PET CF 15.2 Modo I de fallo.

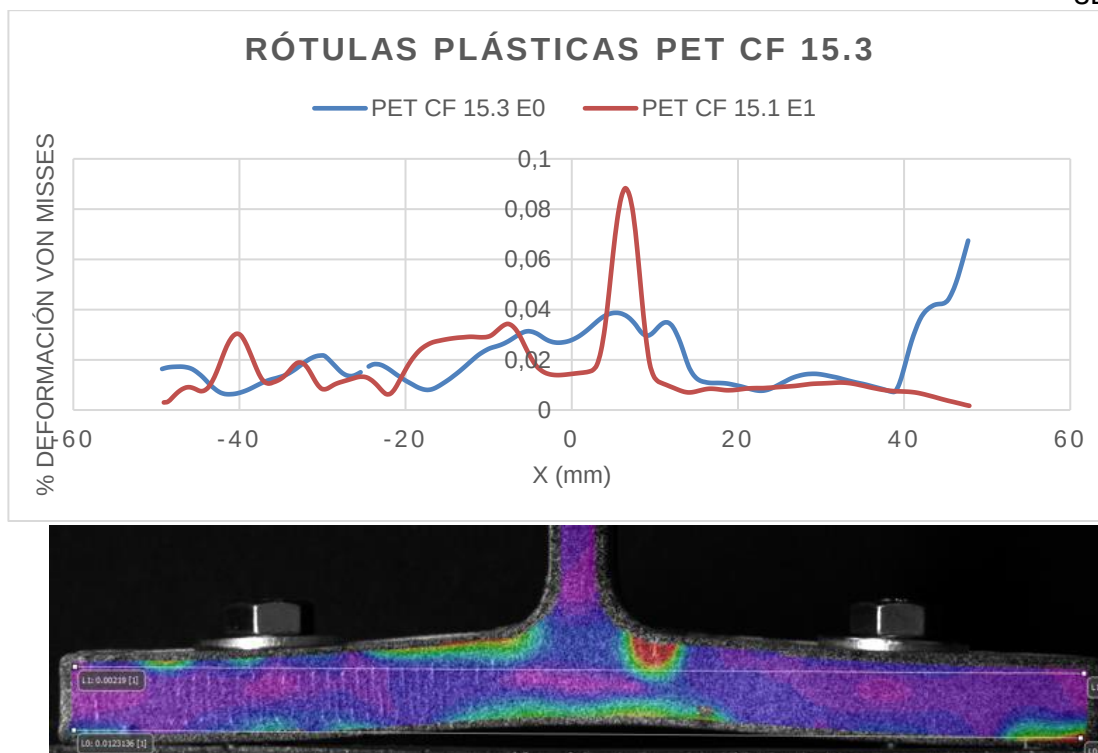


Figura 158. Rótulas plásticas PET CF 15.3.

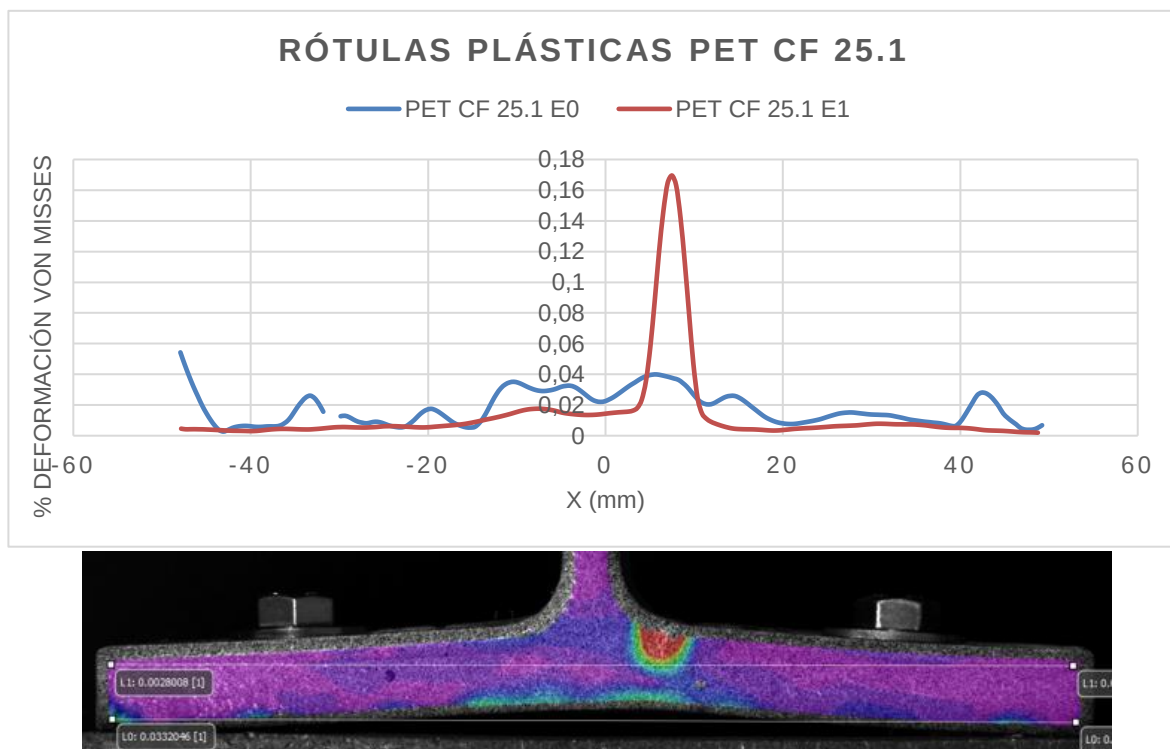


Figura 159. Rótulas plásticas PET CF 25.1.

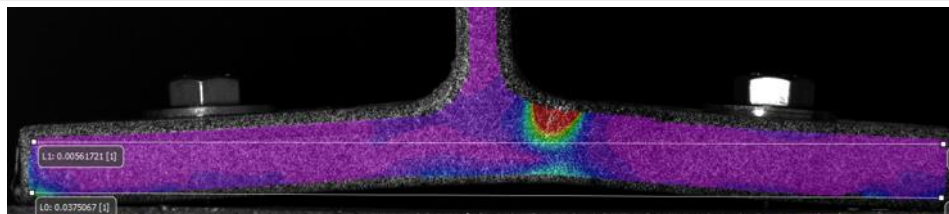
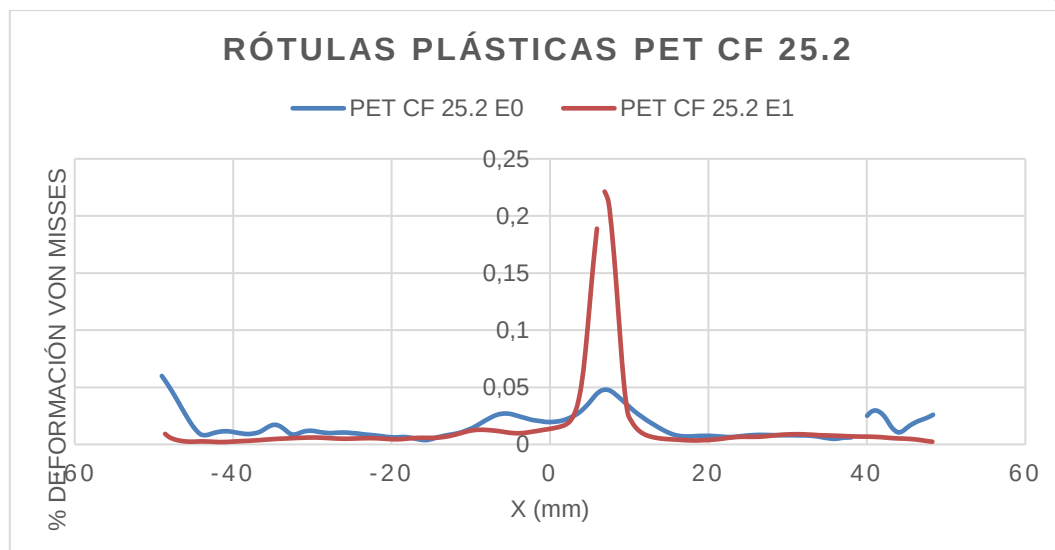


Figura 160. Rótulas plásticas PET CF 25.2.

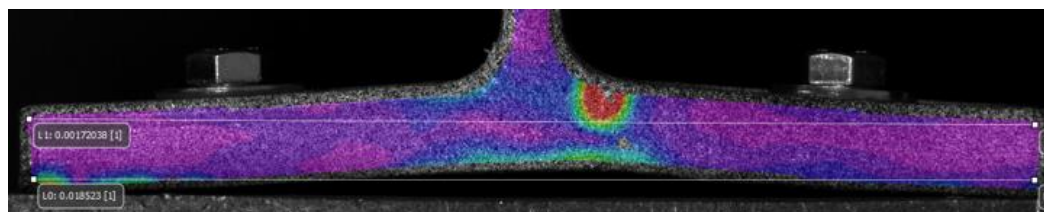
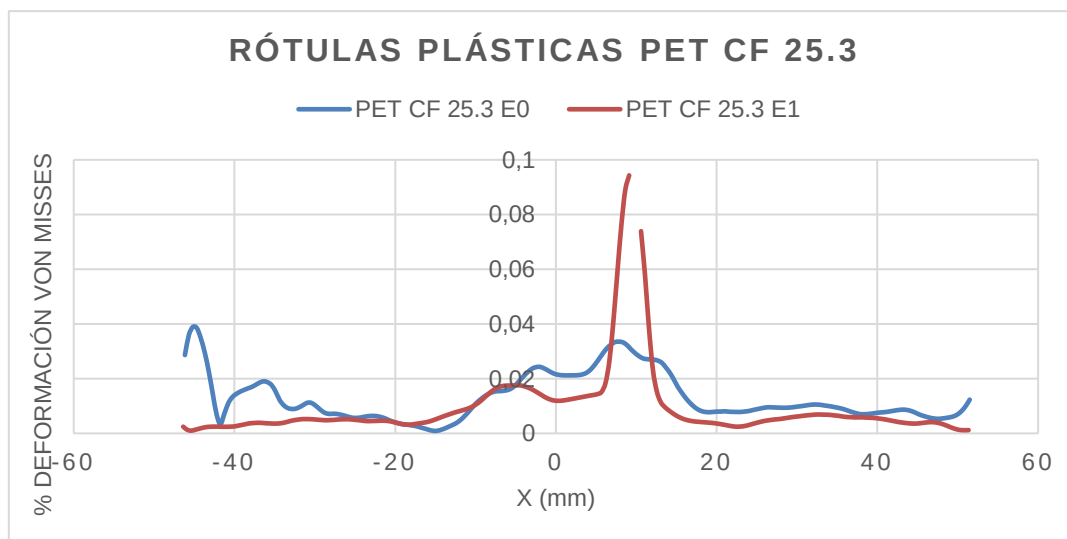


Figura 161. Rótulas plásticas PET CF 25.3.

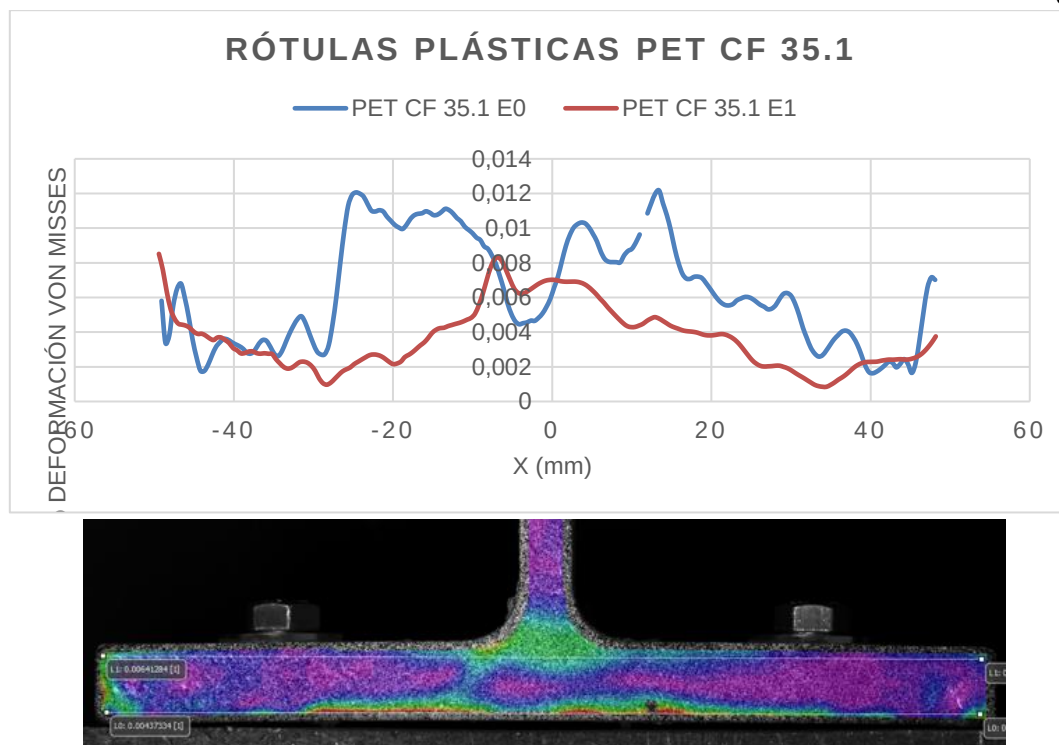


Figura 162. Rótulas plásticas PET CF 35.1.

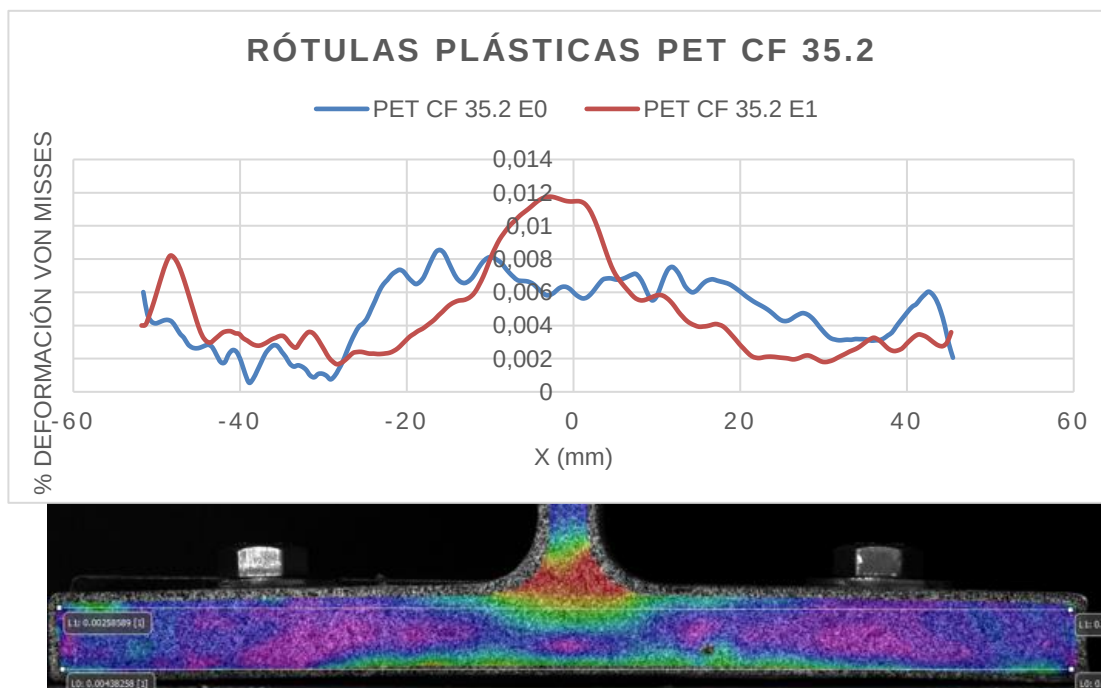


Figura 163. Rótulas plásticas PET CF 35.2.

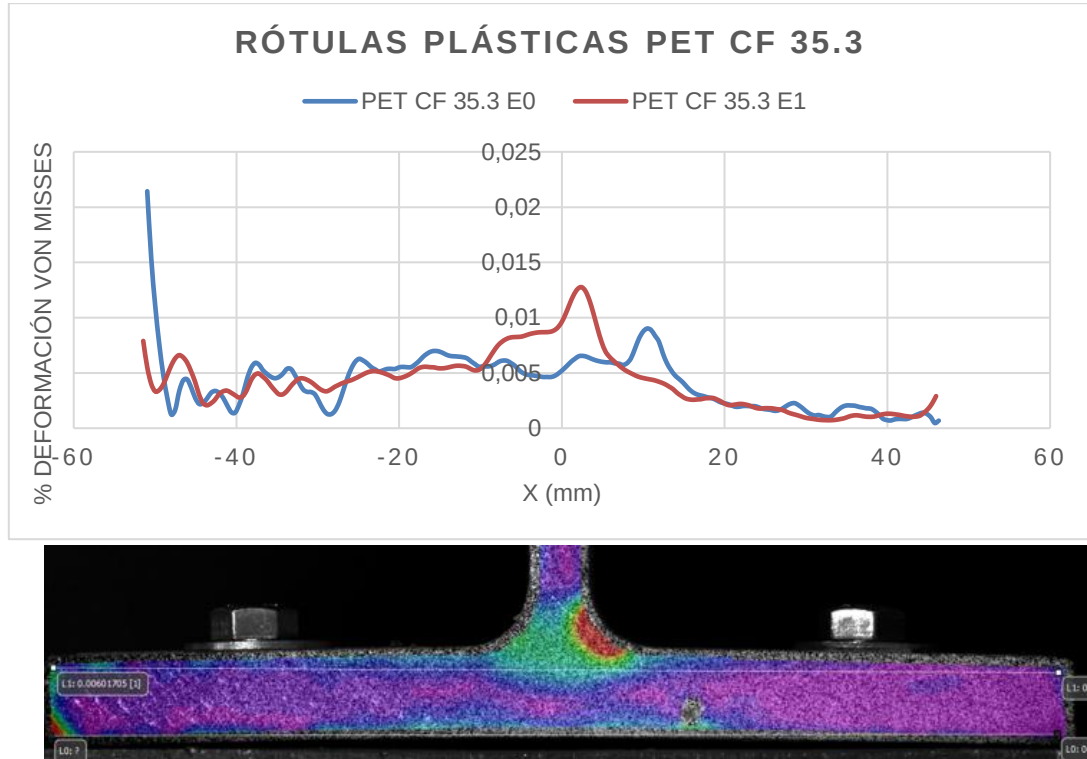


Figura 164. Rótulas plásticas PET CF 35.3.

Como se comentó en el apartado 6.3.4, la mayoría de las probetas de 15 y 25 mm de ancho rompieron por la unión entre el ala y el alma del perfil, como se puede apreciar muy bien en la Figura 165 siguiente:

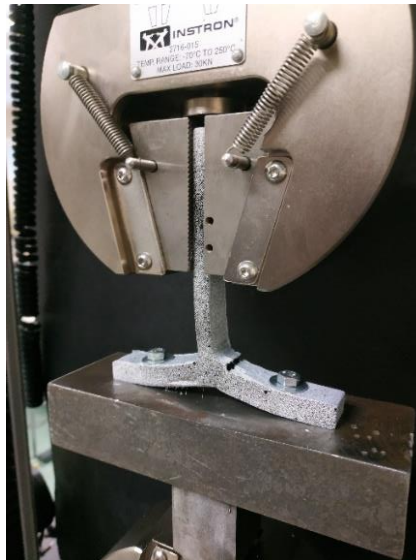


Figura 165. Probeta de 15 mm de ancho justo después de romper y terminar el ensayo.

Se podría deducir que, para las probetas de 15 mm de ancho, si hubiéramos alargado más el ensayo pese a haber roto ya en la unión entre el ala y el alma se podría apreciar también la rotura por el tornillo, como ya se demostró con una de ellas y que se puede ver en la Figura 115. Si observamos las curvas de rótula plástica correspondientes a esta pieza (PET CF 15.1), las Figura 154 y 155, cada una de ellas pertenece a momentos diferentes. En primer lugar, la Figura 154 corresponde a cuando aparece la rótula plástica en modo de fallo II y por tanto la rotura en el radio de unión, donde se aprecia claramente un pico en la curva que nos indica que la deformación de Von Mises ha superado la deformación del límite elástico y por tanto está apareciendo la rotura pero, por otro lado, en la Figura 155, donde ha pasado un tiempo de la anterior, aparece otra rótula plástica en el tornillo con valores de deformación de Von Mises incluso mayores a la anterior rótula.

De igual forma queda también demostrado con las Figuras 156 y 157, correspondientes a la segunda pieza de 15 mm ensayada de PET CF.

Si analizamos algunas de las piezas de 25 mm de longitud efectiva como, por ejemplo, las curvas de las Figuras 159, 160 y 161, correspondientes a las piezas de 25 mm de PET CF, evidencian con claridad donde han aparecido las rótulas plásticas, teniendo la deformación máxima de Von Mises localizada en el momento de romper la probeta entre el alma y el ala del perfil, siendo por tanto modo de fallo II, y sin romper más adelante por el tornillo como las anteriores.

En cuanto a las probetas de 35 mm de longitud efectiva, para los dos materiales su fallo ha sido producido por delaminación, lo que no nos ha permitido analizar mejor el comportamiento de éstas. Si observamos las Figuras 162, 163 y 164 se puede observar que los valores de deformación de Von Mises que tenemos representados son muy pequeños. Esto es debido a que la rotura en este tipo de piezas de 35 mm se produjo en el interior de la pieza por alguna de sus capas, generalmente por la zona donde se ubica el tornillo. En DIC medimos las deformaciones en la cara frontal, por lo que con este tipo de rotura las deformaciones en esta cara donde han sido medidas son mucho más pequeñas que

en la zona interior de la probeta donde se ha producido la rotura. Es por ello que los resultados graficados para estos especímenes de 35 mm no nos indican valores correctos. Es por ello que los resultados no nos ofrecen un resultado claro de donde aparecen rótulas plásticas.

Con el objetivo de comparar los resultados de la localización de las rótulas plásticas experimentales con lo que establece el EC3 se analizan algunas de las muestras a continuación, donde se pretende evaluar la diferencia entre la distancia que establece la norma y donde han aparecido durante los ensayos realizados.

El EC3 3, tal y como se explica en el apartado 2.5.5, establece el modelo de mecanismo de colapso en las uniones Tstub, donde nos indica el punto exacto donde aparecerán las rótulas plásticas. Estos puntos se diferencian entre los distintos modos de fallo existentes. Para modo de fallo I, el punto donde aparece la rótula será en $x_{modo I} = \frac{b}{2} - n$ (desde el centro de la probeta), y para modo de fallo II corresponderá a la distancia de $x_{modo II} = \frac{b}{2} - (m + n)$ (desde el centro de la probeta). Para nuestro modelo, esas distancias, según el EC3, quedan definidas como:

$$x_{modo I} = \frac{b}{2} - n = 50 - 20 = 30 \text{ mm}$$

$$x_{modo II} = \frac{b}{2} - (n + m) = 50 - (20 + 17,6) = 12,4 \text{ mm}$$

Los especímenes que vamos a analizar serán las probetas de 15 mm de ancho de PA CF y las probetas tanto de 15 mm como de 25 mm de ancho de PET CF, ya que han sido los resultados más fiables obtenidos.

Gracias a las curvas representadas anteriormente es posible localizar el punto donde han aparecido las rótulas plásticas experimentalmente. A este punto es lo que llamaremos distancia experimental en las siguientes tablas, y será la distancia desde el centro de la probeta hasta una rótula localizada a la derecha (cuando el

valor es positivo) o hasta una localizada a la izquierda (cuando el valor sea negativo). También diferenciaremos si dichas rótulas son en modo I de fallo o por el contrario de modo II.

PA CF			
PA CF 15.1	Distancia teórica EC3 (mm)	Distancia experimental (mm)	Diferencia (%)
MODO I	30	44,9	-14,9
MODO II	12,4	9,5 -3,67	2,9 8,73
PA CF 15.2			
MODO I	30	-42,6	-12,6
MODO II	12,4	4,73 -5,02	7,67 7,38
PA CF 15.3			
MODO I	30	-	-
MODO II	12,4	5,71	6,69
DIFERENCIA MEDIA			8,69
DESVIACIÓN TÍPICA			10,15

Tabla 29. Comparativa localización rótulas plásticas PA CF 15 mm.

PET CF			
PET CF 15.1	Distancia teórica EC3 (mm)	Distancia experimental (mm)	Diferencia (%)
MODO I	30	-26,3 31,2	3,7 -1,2
MODO II	12,4	7,63	4,77
PET 15.2			
MODO I	30	26,1 -30,6	3,9 -0,6
MODO II	12,4	3,18	9,22
PET CF 15.3			
MODO I	30	-	-
MODO II	12,4	5,95	6,45
DIFERENCIA MEDIA			4,26
DESVIACIÓN TÍPICA			3,69

Tabla 30. Comparativa localización rótulas plásticas PET CF 15 mm.

PET CF			
PET CF 25.1	Distancia teórica EC3 (mm)	Distancia experimental (mm)	Diferencia (%)
MODO I	30	-	-
MODO II	12,4	7,49	4,91
PET 25.2			
MODO I	30	-	-
MODO II	12,4	6,89	5,51
PET CF 25.3			
MODO I	30	-	-
MODO II	12,4	9,12	3,28
		DIFERENCIA MEDIA	4,57
		DESVIACIÓN TÍPICA	1,154

Tabla 31. Comparativa localización rótulas plásticas PET CF 25 mm.

Tras analizar la mitad de las probetas ensayadas se puede decir que existen diferencias con lo dictado por la norma, como prácticamente todos los resultados analizados en el presente trabajo (como las curvas Fuerza-Desplazamiento).

Estas diferencias están en un 8% de media en PA CF, con una desviación típica elevada, con lo cual hay mucha dispersión en los resultados. Para las probetas de PET CF, las diferencias son menores (en torno al 4%) tanto para las más pequeñas de 15 mm como para las intermedias de 25 mm. Además, para este material tenemos una desviación típica pequeña, lo que hace más fiable el estudio en el caso de este material.

6.4. Mapas de desplazamiento.

6.4.1. Mapas de desplazamiento de ABS y PLA.

A continuación, se muestran los resultados de la comparación entre las simulaciones por elementos finitos mediante *Abaqus* y los resultados de DIC de los desplazamientos verticales en las probetas Tstub fabricadas con ABS y PLA, utilizando como imágenes las tomadas en los ensayos realizados por Pedro Herranz Colomina previamente, las cuales nos ha facilitado para volver a realizar el estudio. Cabe destacar que por cuestiones de las dimensiones del tornillo usadas en las simulaciones numéricas, siendo más grande el simulado que el utilizado experimentalmente, las condiciones de la simulación no son exactamente las mismas que durante el ensayo.

· ABS 15 mm de ancho:

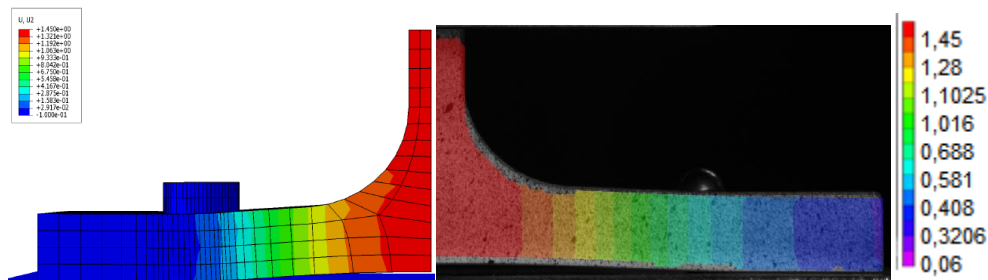


Figura 166. Comparación desplazamientos verticales ABS 15 mm Abaqus (izquierda) / DIC (derecha).

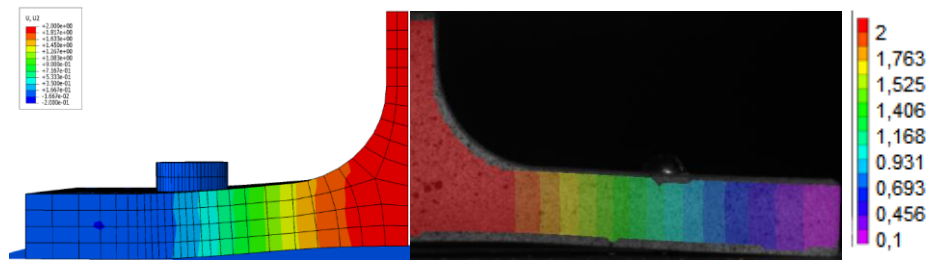
· ABS 25 mm de ancho:

Figura 167. Comparación desplazamientos verticales ABS 25 mm Abaqus (izquierda) / DIC (derecha).

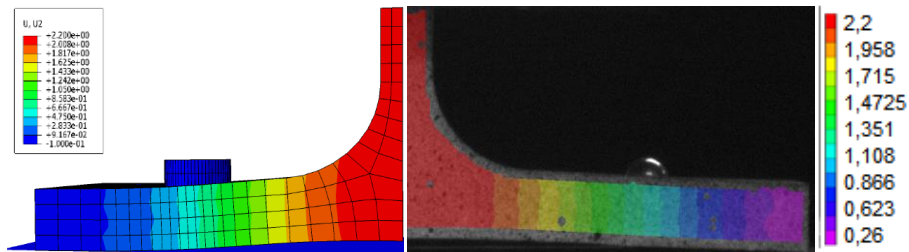
· ABS 35 mm de ancho:

Figura 168. Comparación desplazamientos verticales ABS 35 mm Abaqus (izquierda) / DIC (derecha).

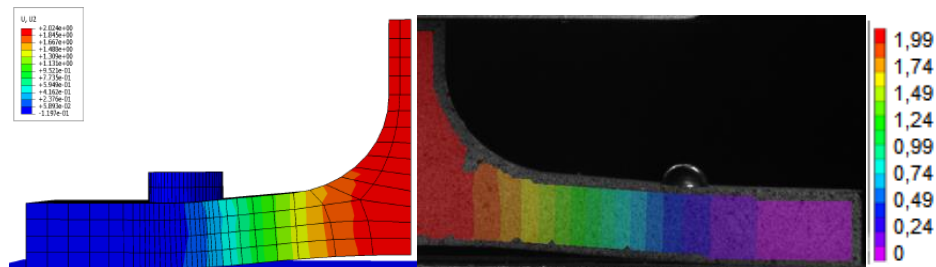
- PLA 15 mm de ancho:

Figura 169. Comparación desplazamientos verticales ABS 35 mm Abaqus (izquierda) / DIC (derecha).

- PLA 25 mm de ancho:

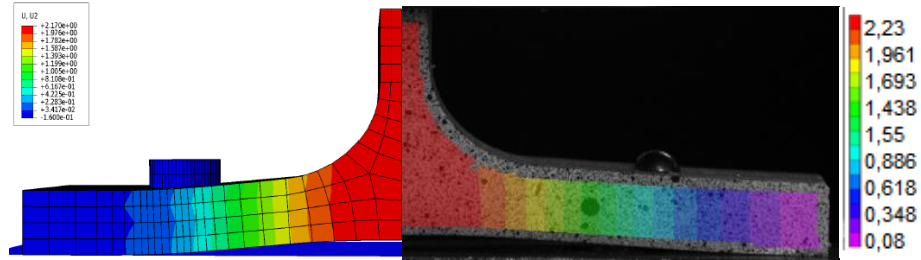


Figura 170. Comparación desplazamientos verticales ABS 35 mm Abaqus (izquierda) / DIC (derecha).

-PLA 35 mm de ancho:

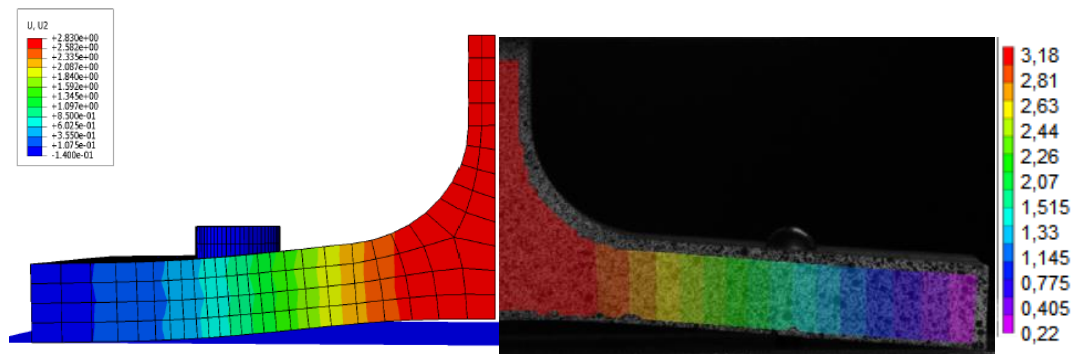


Figura 171. Comparación desplazamientos verticales ABS 35 mm Abaqus (izquierda) / DIC (derecha).

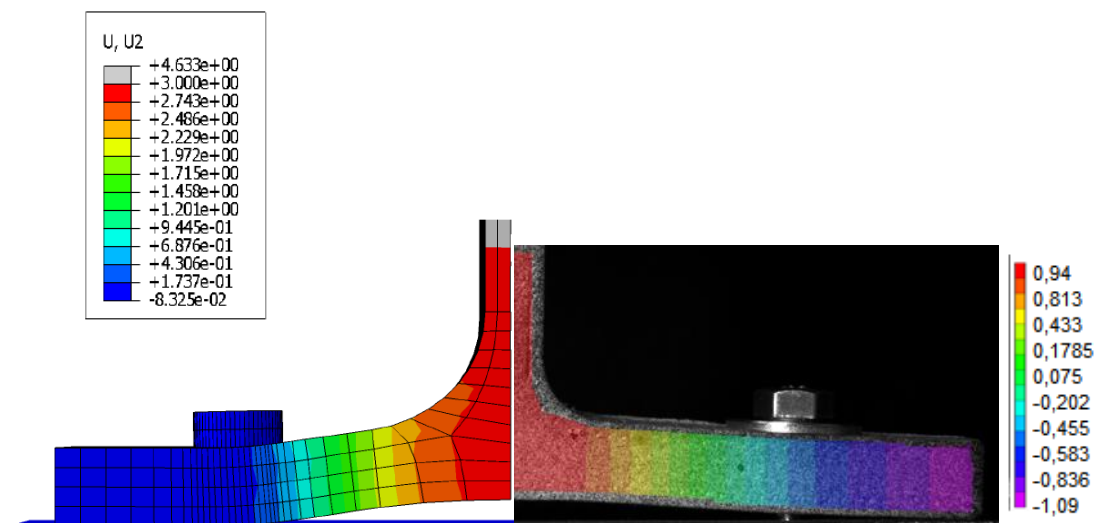
6.4.2. Mapas de desplazamiento de PA CF y PET CF.- PA CF 15 mm:

Figura 172. Comparación desplazamientos verticales PA CF 15 mm Abaqus (izquierda) / DIC (derecha).

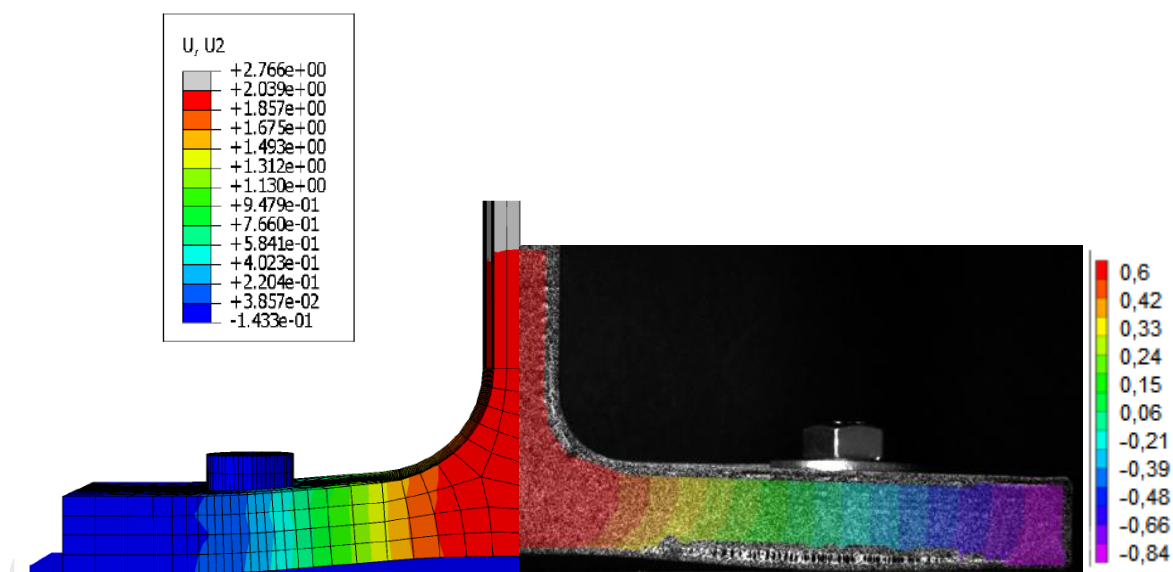
-PA CF 25 mm:

Figura 173. Comparación desplazamientos verticales PA CF 25 mm Abaqus (izquierda) / DIC (derecha).

-PA CF 35 mm:

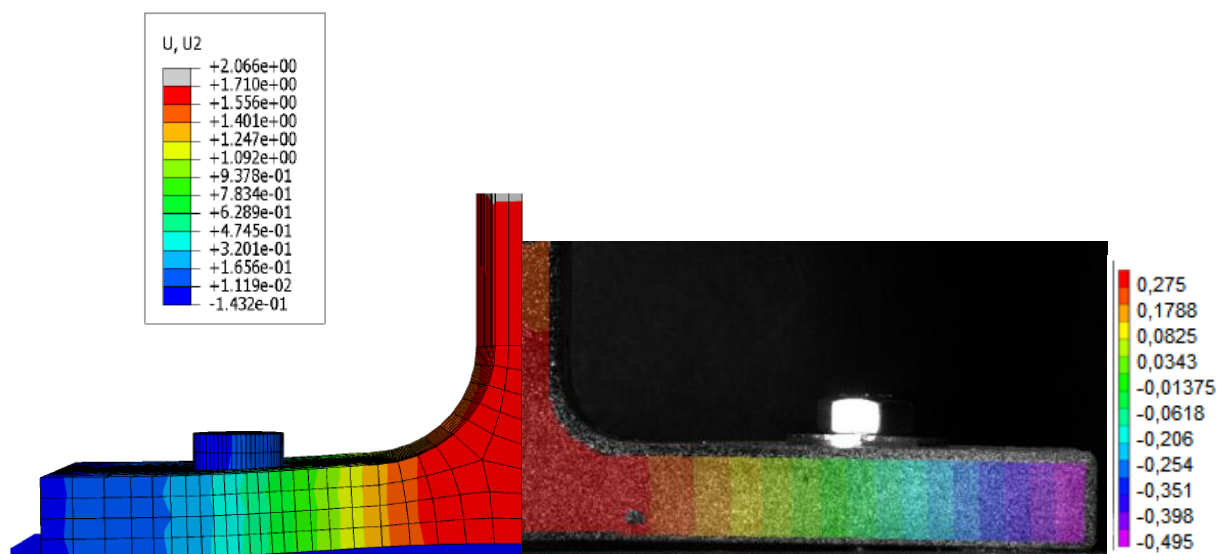


Figura 174. Comparación desplazamientos verticales PA CF 35 mm Abaqus (izquierda) / DIC (derecha).

-PET CF 15 mm:

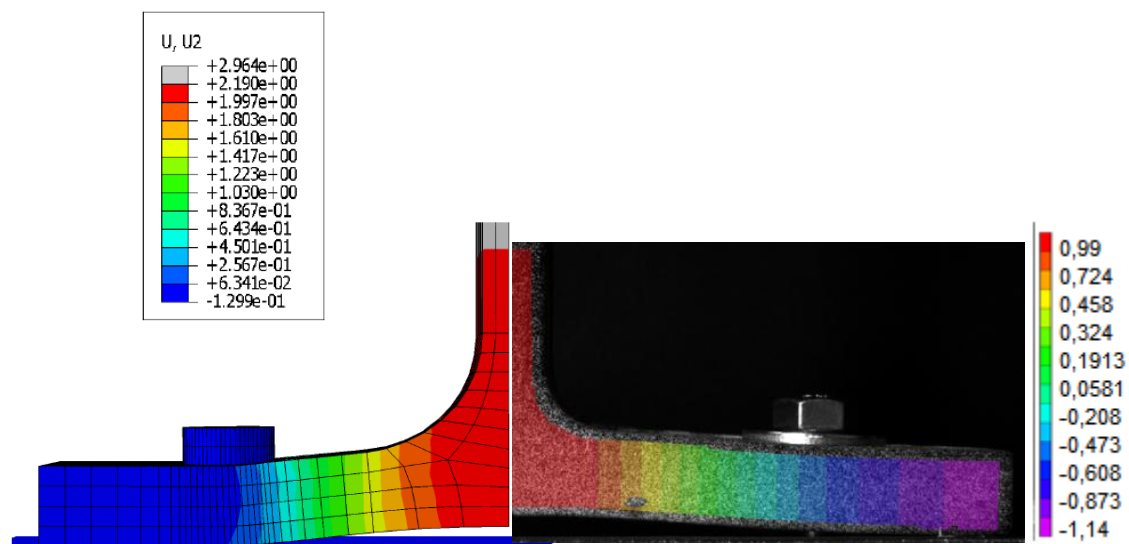


Figura 175. Comparación desplazamientos verticales PET CF 15 mm Abaqus (izquierda) / DIC (derecha).

-PET CF 25 mm:

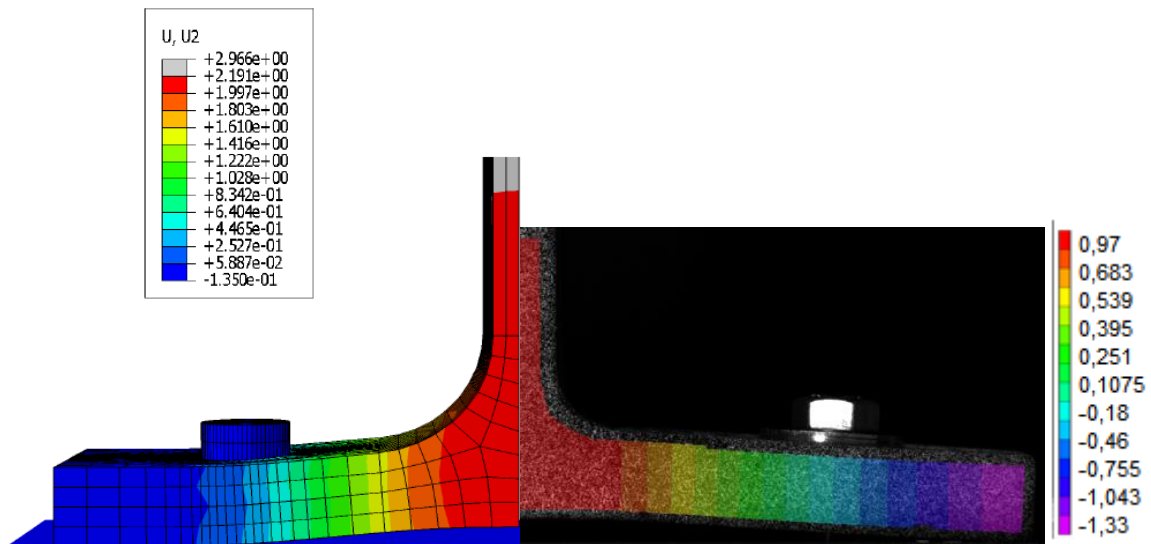


Figura 176. Comparación desplazamientos verticales PET CF 25 mm Abaqus (izquierda) / DIC (derecha).

-PET CF 35 mm:

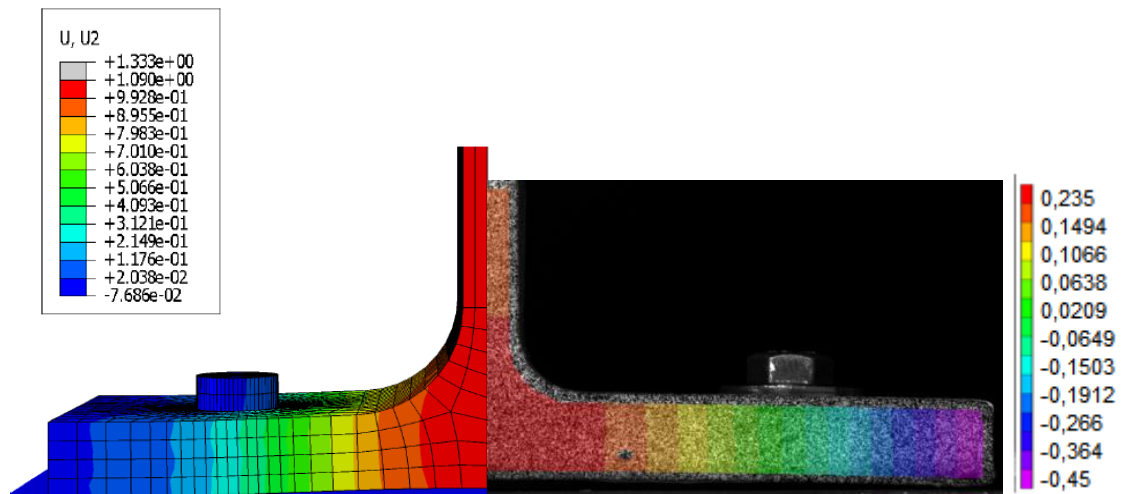


Figura 177. Comparación desplazamientos verticales PET CF 35 mm Abaqus (izquierda) / DIC (derecha).

De igual forma que con los resultados de ABS y PLA observados en el apartado 6.4.1, anteriormente se muestran la comparación entre el campo de

desplazamientos en el eje vertical que se han obtenido mediante las simulaciones con elementos finitos y en DIC. Como ya se explicó en el apartado 6.3.5, las diferencias existentes entre los resultados obtenidos de desplazamiento entre un análisis y otro hace que en este caso, comparando campos de desplazamientos, vuelvan a verse reflejadas si observamos la leyenda de cada una de las ilustraciones anteriores, donde muestran valores de desplazamiento vertical a lo largo de la probeta mediante un diagrama de colores.

Volvemos a insistir en este punto que, al haber sido simulado como un sólido isótropo de densidad constante y no como uno anisótropo donde el material no se comporta de igual manera en todas las direcciones de impresión dado a la orientación que toman las fibras en su interior, los resultados no coinciden con los obtenidos experimentalmente. Aún así, dejando de lado los resultados y centrándonos únicamente en la representación con distintos colores sobre la pieza, los resultados son muy parecidos.

Una opción viable para que las simulaciones puedan dar mejores resultados sería simulando la pieza como *shell* y no como un sólido. Para ello habría que definir como mínimo tres capas, cada una con la orientación de fibras que tenga el material y que previamente se tendría que haber analizado con una muestra de hilo. Otra opción es realizar la simulación con otro programa, llamado *DIGIMAT*.

DIGIMAT es un software que nos ofrecería una solución a nuestro problema, ya que es capaz de simular todo tipo de materiales compuestos, donde la microestructura y el comportamiento del material no son una barrera, siendo un gran método para las simulaciones de procesos de fabricación aditiva.

Con las simulaciones de ABS y PLA no nos encontramos el problema con las fibras que tenemos con PA CF y PET CF, dado que éstos no están reforzados. Por tanto, las simulaciones realizadas con dichos materiales sí que obtienen resultados muy parecidos a los experimentales.

7. CONCLUSIONES.

Los resultados experimentales obtenidos en este trabajo muestran que las predicciones del EC3 en cuanto a resistencia y rigidez de modelos de uniones estructurales Tstub no son fiables en aquellos casos en los cuales los modelos hayan sido obtenidos mediante impresión 3D.

Estas predicciones están elaboradas para modelos de acero y, aunque se tengan en cuenta las propiedades mecánicas de las piezas impresas en cuestión, se produce siempre una rotura anticipada según diferentes modos de fallo, de manera que raramente se alcanzan los valores de resistencia y rigidez que se obtienen al aplicar la formulación del EC3.

Estas afirmaciones han quedado verificadas para el caso de materiales impresos en 3D a partir de termoplásticos reforzados con fibra de carbono, los cuales han sido objeto de una caracterización mecánica para establecer sus propiedades, que resultan significativamente inferiores a las proporcionadas por el fabricante en la hoja técnica (lo que puede ser debido al proceso de impresión).

Las simulaciones mediante elementos finitos realizadas muestran un comportamiento menos rígido que el experimental, aunque similar en cuanto a tendencia. Al comparar mapas de desplazamientos se observan diferencias significativas, de lo que se deduce que no se puede simular de forma fiable el comportamiento de estas piezas sin considerar las particularidades del material (anisotropía, refuerzos con fibras, delaminación, ...).

Las tendencias observadas en los resultados experimentales muestran que la relación de la longitud efectiva del modelo Tstub con la resistencia y rigidez es lineal, excepto en aquellas probetas en las que se ha producido una rotura prematura (debidas a pequeñas excentricidades en la carga aplicada).

8. PROPUESTAS PARA TRABAJOS FUTUROS.

Con el objetivo de continuar con el estudio desarrollado en el presente proyecto se presentan distintas propuestas de cara a trabajos futuros.

- Realizar una caracterización mecánica completa de los dos materiales ensayados en el presente proyecto (PA CF y PET CF), a tener en cuenta la anisotropía de dichos materiales.
- Realizar una caracterización mecánica del hilo de PA CF y PET CF, con el objetivo de observar si dichos materiales pierden propiedades mecánicas en la fabricación.
- Realizar el mismo estudio de uniones Tstub fabricadas mediante fabricación aditiva con otros materiales, para continuar comparando su comportamiento si variamos el material.
- De cara a la realización de simulaciones para el análisis con elementos finitos, buscar una alternativa para que los resultados obtenidos muestren datos fiables que se ajustan al tipo de fabricación y materiales que estamos ensayando, ya sea mediante Abaqus u otro software capacitado para ello.

9. BIBLIOGRAFÍA.

- [1] European Committee for Standardization (CEN), *EN 1993-1-8:2005 Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-8: Design of joints*, 2005.
- [2] Daniel Carazo Álvarez, Tesis Doctoral, “*Estudio de uniones T-Stub en estructuras metálicas utilizando métodos ópticos para la medida de tensiones y deformaciones*”, Universidad de Jaén, 2012.
- [3] Pedro Herranz Colomina, Trabajo Fin de Grado, “*Estudio de uniones estructurales fabricadas empleando impresión 3D mediante correlación digital de imágenes*”, Universidad de Jaén, 2018.
- [4] Juan José Jiménez de Cisneros Fonfría, “*Comportamiento de componentes T-equivalentes asimétricas. Enfoque analítico, numérico y experimental*”, Universidad de Jaén, 2016.
- [5] W.H. Peters and W.F. Ranson. “*Digital Imaging techniques in experimental stress analysis*,” Opt.Eng., vol. 21, no. 3, pp. 427-432,1981.
- [6] M.A. Sutton, W.J. Wolters, W.H. Peters, W.F. Ranson, and S.R. McNeill, “*Determination of displacements using an improved digital correlation method*,” Image Vis. Comput, vol. 1(3), pp. 133-139,1983.
- [7] ¿Qué es la fabricación aditiva?, Recopilado de: <http://mizaradditive.com/que-es-fabricacion-aditiva/>, 2016
- [8] Mariano Jiménez Calzado y José Porras Galán, Universidad Pontifica Comillas. ETSI-ICAI ; Iris A. Domínguez, Luis Romero y María del Mar Espinosa, Área de Ingeniería del Diseño. UNED; “*La fabricación aditiva: La evidencia de una necesidad*”.
- [9] *Comprendiendo la fabricación aditiva*, Recopilado de: <http://hxx.es/2014/10/20/comprendiendo-la-fabricacion-aditiva/>
- [10] *FDM o modelado por deposición fundida, te explicamos todo*, Recopilado de: <https://www.3dnatives.com/es/modelado-por-deposicion-fundida29072015/>
- [11] *Tipología de uniones entre elementos estructurales*, Recopilado de: https://previa.uclm.es/area/ing_rural/Trans_const/ElementosConstruccion03.PDF
- [12] Álvaro Picazo Iranzo, “*Medios de unión de estructuras metálicas*”, Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica- U.P.M. Grupo Energía, Edificación y Patrimonio, Mayo 2007.
- [13] E. López Alba, R. López García, R. Dorado, F. A. Díaz : “*Aplicación de correlación digital de imágenes para el análisis de problemas de contacto*”, Departamento de Ingeniería Mecánica y Minera, Universidad de Jaén.

- [14] Álvaro Pardo Borrero, Trabajo Fin de Grado, “*Aplicación de la correlación de imágenes digitales a diversos ensayos mecánicos*”, Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Sevilla, 2014.
- [15] M. Turner, R.W. Clough, H.C. Martin and L.J. Topp, “*Stiffness and Deflection Analysis of Complex Structures.*,” *J. Aeronautical Science*, vol. 12, no 9, pp.805-823, Septiembre 1956.
- [16] J.J. Jiménez de Cisneros, D. Carazo Álvarez, J.D. Carazo Álvarez, S. Jordão y L. Simões da Silva, “*Análisis de componentes T-equivalente asimétricas: enfoque experimental y numérico*”, *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*.
- [17] Manuel Molina Romero, “*Estudio de viabilidad de los materiales compuestos híbridos para aplicaciones en vehículos de competición*”, Universidad Politécnica de Cataluña, 2015.
- [18] ABAQUS Theory Manual, Vers. 6.11. Hibbitt, Karlsson and Sorensen Inc., USA, 2011.
- [19] ABAQUS User’s Manual, Vers. 6.11. Hibbitt, Karlsson and Sorensen Inc., USA, 2011.
- [20] *El warping: qué es y cómo evitarlo*, Recopilado de: <https://www.impresoras3d.com/el-warping-que-es-y-como-evitarlo/>
- [21] Sotec3D Cubierta+Puertas con Filtro HEPA para Ultimaker 2+, imagen de cubierta para impresora, recopilada de: <https://www.3djake.es/sotec3d/cubierta-puertas-con-filtro-hepa-para-ultimaker-2>
- [22] Imágenes y características de Innovatefil Poliamida Fibra de Carbono, Smart Materials 3D, recopilado de: <https://www.smartmaterials3d.com/es/tienda-smart/507-innovatefil-poliamida-fibra-de-carbono.html>
- [23] Imágenes y características de Innovatefil PET Fibra de Carbono, Smart Materials 3D, recopilado de: <https://www.smartmaterials3d.com/es/tienda-smart/508-innovatefil-pet-fibra-de-carbono.html>
- [24] J.P. Jaspart, “Numerical simulation of a T-stub – experimental data,” Cost C1, Numerical simulation group, Doc. C1WD6/94-09, 1994.
- [25] O.S. Bursi and J.P. Jaspart, “ Benchmarks for finite element modelling for bolted steel connections,” *Journal of Constructional Steel Research*, vol 43, pp. 17-42, 1997.
- [26] O.S. Bursi and J.P. Jaspart, “ Basic issues in the finite element simulation of extended end plate connections,” *Computers and Structures*, vol 69, pp. 361-382, 1998.
- [27] O.S. Bursi, “ A refined finite element model for T-stub steel connections,” Cost C1, Numerical simulation group, Doc. C1WD6/95-07, 1995.

- [28] F.C.T. Gomes , L.F.C. Neves, L.A.P.S. Silva, and R.A.D. Simões, " Numerical simulation of a T.stub," Cost C1, Numerical simulation group, Doc. C1WG6/95-, 1995.
- [29] J. A. Swanson, *Characterization of the strength, stiffness and ductility behavior of T-stub connections*. Atlanta: Georgia Institute of Technology, 1999, Ph D. Dissertation.
- [30] A. M. Girao Coelho, *Characterization of the ductility of bolted end plate beam-to-column steel connections*.: Universidad de Coimbra, 2004, PhD Thesis.
- [31] Vic-2D v6 Reference Manual, Correlated Solutions.
- [32] J. M. Vasco Olmo, M. N. James, C. J. Christopher, E. A. Patterson and F. A. Díaz, "Assessment of crack tip plastic zone size and shape and its influence on crack tip shielding", Universidad de Jaén, Universidad de Plymouth, Universidad Nelson Mandela Metropolitan, Universidad de Liverpool; Abril 2016.
- [35] Estereolitografía (SLA), recopilado de <https://www.3dnatives.com/es/impresion-3d-por-estereolitografia-les-explicamos-todo/>
- [36] Proceso de SLA, recopilado de <http://www.ctadvancedmanufacturing.com/impresoras-3d/elija-por-tecnologia/estereolitografia/>
- [37] DLP (Digital Light Processing), recopilado de <http://hxx.es/tag/dlp-digital-light-processing/>
- [38] Proceso de DLP, recopilado de <https://www.think3d.in/digital-light-processing-dlp-3d-printing-service-india/>
- [39] MJM (Multi-Jet Modeling), recopilado de <http://hxx.es/tag/mjm-multi-jet-modeling/>
- [40] Proceso de MJM, recopilado de <https://elblogdelplastico.blogs.upv.es/2012/10/>
- [41] SLS (Selective Laser Sintering), recopilado de <https://www.3dnatives.com/es/sinterizado-selectivo-por-laser-les-explicamos-todo/>
- [42] Temario Tecnologías aplicadas a la fabricación, "Proceso de SLS", Rubén Dorado, Universidad de Jaén.
- [43] SLM (Sinterización por láser con aleaciones metálicas), recopilado de <https://www.3dnatives.com/es/sinterizado-directo-de-metal-por-laser-les-explicamos-todo/>

10. ANEXO I. VIC 2D.

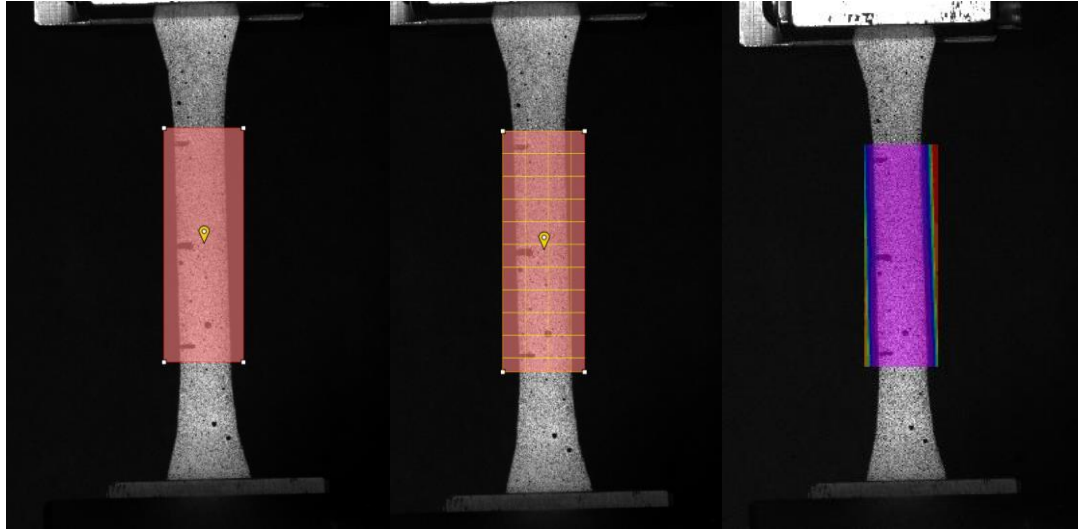
En el presente Anexo se hará una breve descripción del procedimiento a seguir en el programa Vic 2D, donde procesamos todo lo referente a la correlación digital de imágenes.

Para obtener la deformación en las probetas tipo hueso, los pasos a seguir son los siguientes:

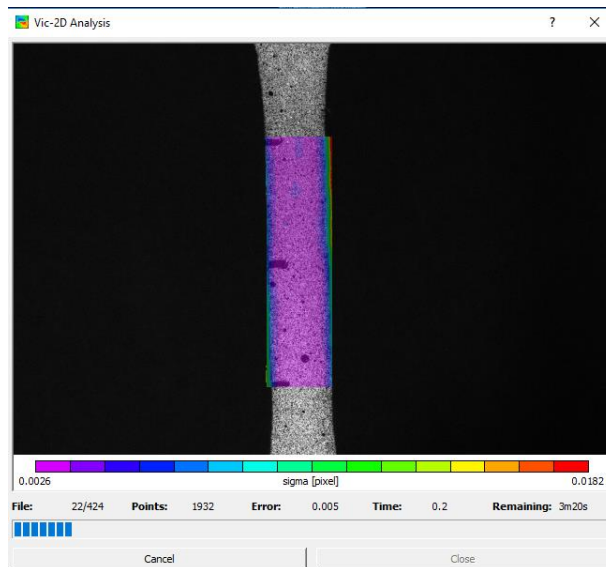
- Cargamos todas las imágenes grabadas durante el ensayo a tracción.



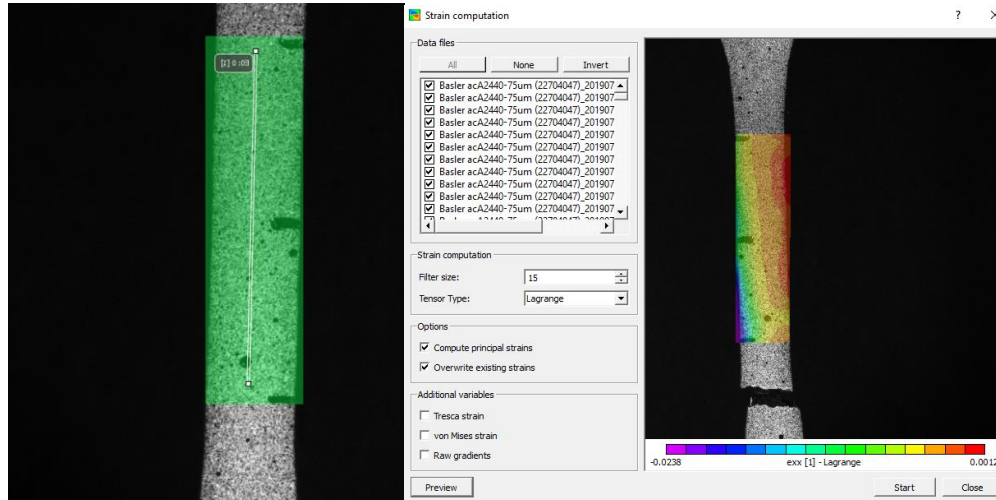
- Mallamos y calibramos. Para mallar usamos el siguiente icono , ya que queremos un rectángulo, y para calibrar el siguiente . Al calibrar lo que hacemos es escalar la imagen, dando un valor real en milímetros de la probeta (de ahí las marcas sobre la probeta que observamos en la imagen anterior, facilitan esta parte del proceso), para poder pasar de píxeles a milímetros. La malla puede definirse manualmente, pero si se desea tendremos una opción pulsando el siguiente símbolo  donde nos realiza el mallado más óptimo que considere el programa.



- Ejecutamos la simulación.



- Una vez terminado el proceso anterior calcularemos las deformaciones. Para ello debemos decirle al programa de dónde queremos que las calcule. Con el extensómetro, que se representa con el siguiente icono , hacemos una línea entre las marcas de la probeta. Una vez hecho esto, tocamos el icono  y se calcularán las deformaciones donde hayamos marcado con el extensómetro.

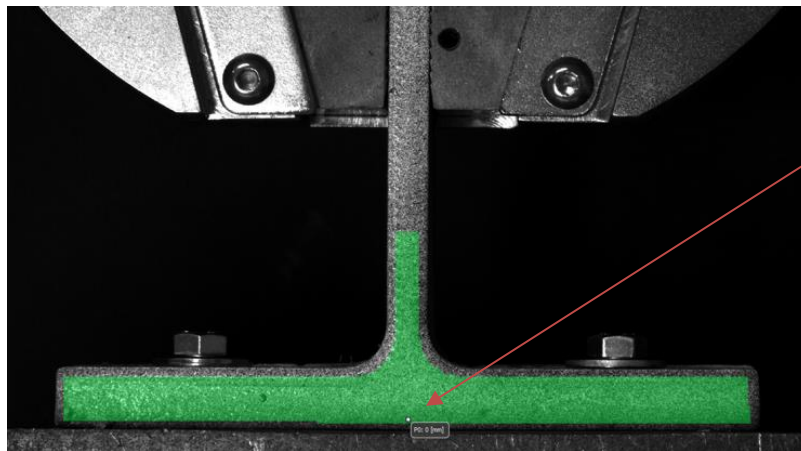
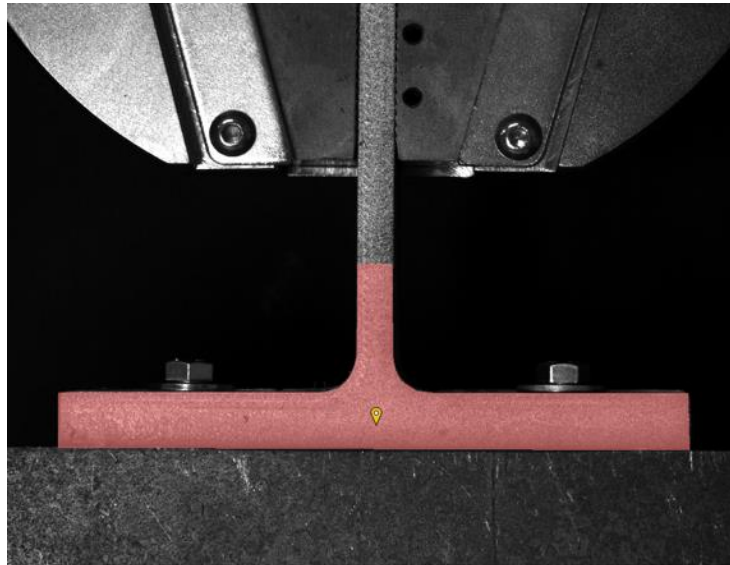


· Por último, con el icono PLOT se podrá graficar las variables que hayamos calculado y exportar los datos.



Para obtener el desplazamiento en las probetas Tstub, los pasos a seguir son los siguientes:

El procedimiento inicial es igual que anteriormente. En este caso queremos calcular el desplazamiento que sufre un punto situado en la parte inferior de la probeta, por lo que no haremos uso del extensómetro, sino colocaremos el punto en el lugar donde se desee y se graficarán los resultados a partir de ese punto que se ha colocado. En PLOT, graficamos P0 'V' respecto a Index, lo que nos devuelve la curva del desplazamiento vertical frente al tiempo.

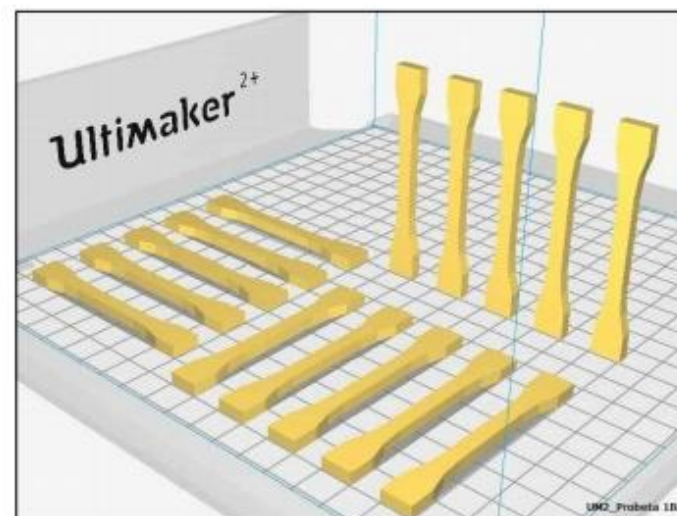
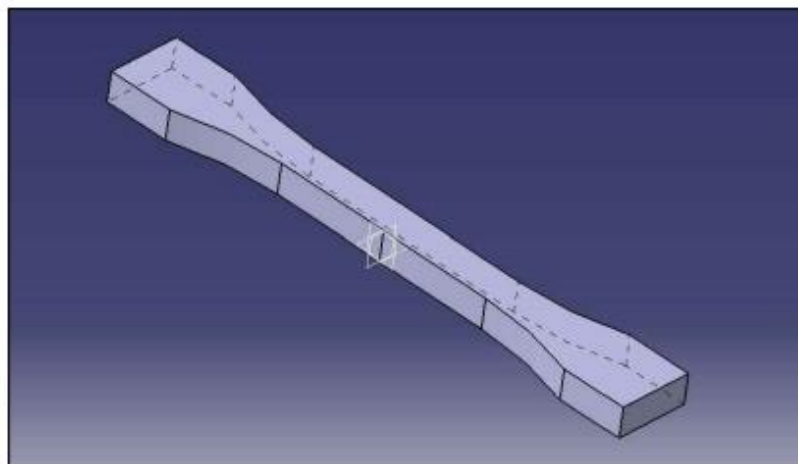
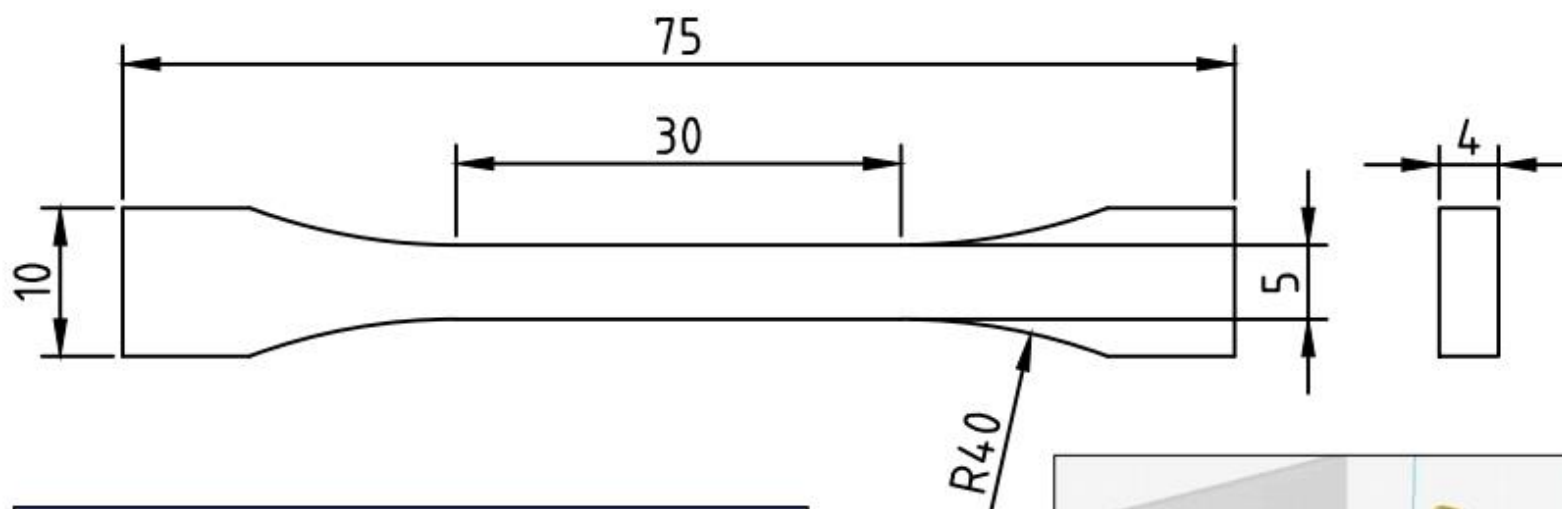


Punto que
estamos
analizando

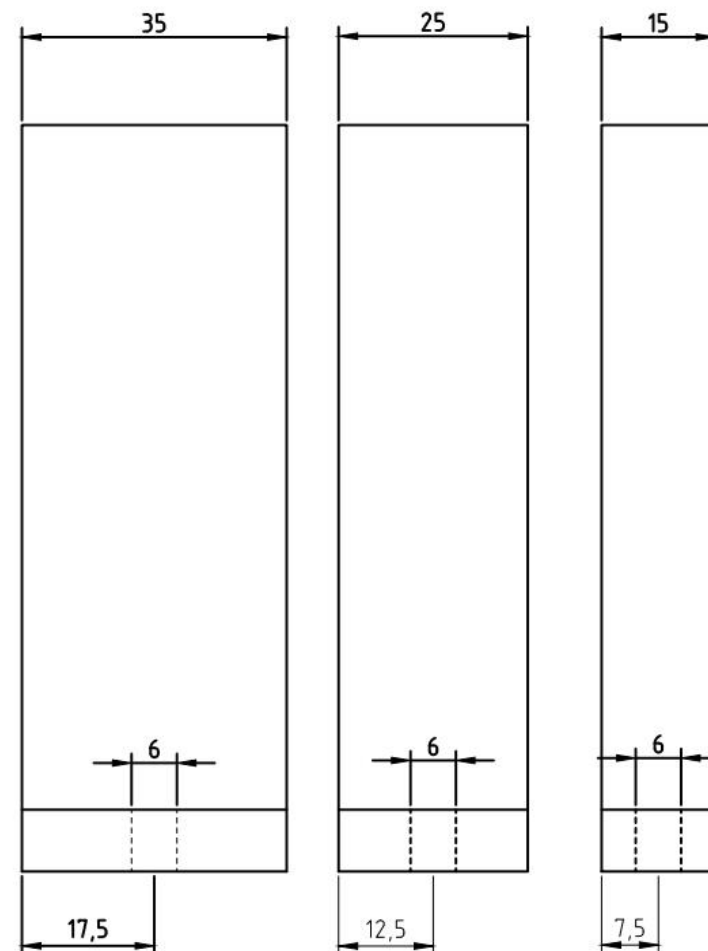
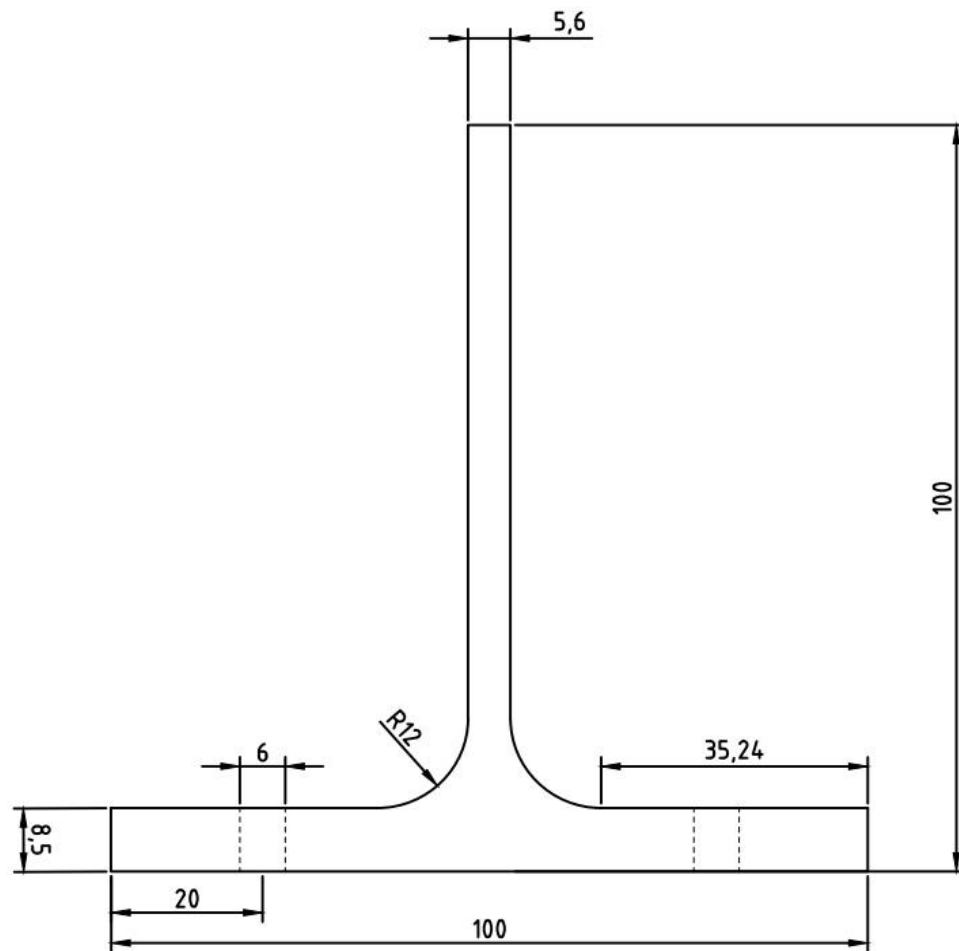
11. ANEXO II. PLANOS.

PLANO nº1: Medidas probetas Tipo Hueso 1BA.

PLANO nº2: Diseño T-stub.



	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE JAÉN
	29/03/19	Beatriz Aranda		
ESCALA: 2:1	Estudio experimental y numérico de uniones estructurales fabricadas mediante impresión 3D Medidas Probetas Tipo Hueso 1BA Dimensiones en mm			Nº PLANO Plano nº1
				SUSTITUYE A:
				SUSTITUIDO POR:



	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE JAÉN
	21/3/19	Beatriz Aranda		
ESCALA: 1:1	Estudio experimental y numérico de uniones estructurales fabricadas mediante impresión 3D Diseño T-STUB Medidas en mm			Nº PLANO Plano nº 3
				SUSTITUYE A:
				SUSTITUIDO POR: