



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior (Jaén)

Trabajo Fin de Grado

**DISEÑO NUMÉRICO Y
VERIFICACIÓN
EXPERIMENTAL DE UNIONES
ESTRUCTURALES
FABRICADAS MEDIANTE
IMPRESIÓN 3D**

Alumno: Abraham Garrido Morales

Tutor: Daniel Carazo Álvarez
Dpto: Ingeniería Mecánica y Minera

Septiembre, 2021



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: Diseño numérico y verificación experimental de uniones estructurales fabricadas mediante impresión 3D, que presenta Abraham Garrido Morales, autoriza su presentación para defensa y evaluación en la Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Jaén, SEPTIEMBRE de 2021

El alumno:

ABRAHAM GARRIDO MORALES

El tutor:

DANIEL CARAZO ÁLVAREZ

Índice

Resumen.....	9
Abstract.....	10
1. INTRODUCCIÓN.....	11
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	12
2.1. La impresión 3D.....	12
2.1.1. Evolución histórica de la impresión 3D [2].....	12
2.1.2. Tipos de impresión 3D.....	14
2.1.2.1. Estereolitografía (SLA).....	14
2.1.2.2. Procesado digital de luz.....	15
2.1.2.3. Inyección de aglutinante.....	15
2.1.2.4. Multijet printing.....	16
2.1.2.5. Sinterizado selectivo por láser.....	16
2.1.2.6. Fabricación con filamento fundido.....	17
2.1.3. Aplicaciones de la impresión 3D.....	18
2.2. Impresión 3D en uniones y estructuras.....	19
2.3. Método de Elementos Finitos.....	21
2.4. Correlación digital de imágenes.....	22
3. OBJETIVOS.....	23
4. REQUISITOS DEL DISEÑO.....	24
5. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO.....	30
5.1. Modelo inicial.....	30
6. DESCRIPCIÓN DEL MODELO BASE.....	33
6.1. Mallado del modelo.....	33
6.2. Condiciones de contorno.....	34
6.2.1. Elementos fijos.....	35
6.2.2. Fuerzas.....	35
6.3. Introducción del material.....	36
6.4. Simulación.....	38
6.5. Obtención de resultados.....	38
7. MEJORA DEL MODELO INICIAL.....	43
7.1. Mejora 1: Aumento de espesor.....	43
7.1.1. Mejora 1.1: Espesor 7,5mm.....	43

7.1.2.	Mejora 1.2: Espesor 10mm.	44
7.2.	Mejora 2: Salientes alrededor de los taladros.....	44
7.2.1.	Mejora 2.1: Espesor máximo 15mm.	44
7.2.2.	Mejora 2.2: Espesor máximo 20mm.	45
7.2.3.	Mejora 2.3: Espesor máximo 25mm.	46
7.2.4.	Mejora 2.4: Espesor máximo 30mm.	47
7.2.5.	Mejora 2.5: Espesor máximo 35mm.	48
7.2.6.	Mejora 2.6: Espesor máximo 37,5mm	49
7.3.	Resumen de modelos según el material.....	50
7.4.	Evoluciones del modelo fallidas.....	52
8.	VALIDACIÓN EXPERIMENTAL.	53
8.1.	Obtención de los prototipos.....	53
8.2.	Diseño de los útiles de ensayo.....	56
8.3.	Preparación de los prototipos y montaje en el banco.	61
8.4.	Ensayo de los prototipos.	64
8.4.1.	Prototipo 1: Ensayo elástico a compresión.....	65
8.4.2.	Prototipo 1: Ensayo a rotura por compresión.	66
8.4.3.	Prototipo 2: Ensayo elástico a compresión.....	67
8.4.4.	Prototipo 2: Ensayo elástico a tracción.....	67
8.4.5.	Prototipo 2: Ensayo a rotura por tracción.	67
8.5.	Postprocesado de imágenes.	68
9.	EXTRACCIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.	74
9.1.	Comparativa de los mapas de desplazamiento.	74
9.2.	Resistencia.	79
9.3.	Obtención de los valores de rigidez.....	81
9.4.	Modos de rotura.	86
10.	CONCLUSIONES.....	90
11.	BIBLIOGRAFÍA	91
ANEXO 1:	PLANOS.	93

Índice de ilustraciones

Ilustración 2.1:	Primera pieza impresa en 3D de la historia [2]	13
Ilustración 2.2:	RepRap Darwin 3D Printer [3]	13
Ilustración 2.3:	Esquema de funcionamiento SLA [4].....	15
Ilustración 2.4:	Esquema sobre el funcionamiento de la tecnología Binder Jetting [5]	16

Ilustración 2.5: Esquema de funcionamiento FFF/FDM [6]	18
Ilustración 2.6: Construcción de una vivienda con impresión 3D [7]	19
Ilustración 2.7: Colocación del primer puente impreso en 3D, situado en Ámsterdam [8].	19
Ilustración 2.8: Cúpula en impresión 3D planteada en el MIT, USA [11].	20
Ilustración 2.9: Planta y render de “ <i>The BOD</i> ”, la primera construcción impresa en 3D en Europa [12].	21
Ilustración 2.10: Nodos y elementos en una malla [14].	21
Ilustración 2.11: Esquema de la digitalización y el almacenamiento de una muestra discretizada a partir de una distribución continua de intensidad [15].	22
Ilustración 4.1: Tabla 64.2.a de la Instrucción de acero estructural de 2011 [16].	25
Ilustración 4.2: Tabla 64.7.1 de la Instrucción de acero estructural de 2011 [16].	26
Ilustración 4.3: Tabla 64.7.2 de la Instrucción de acero estructural de 2011 [16].	27
Ilustración 4.4: Tabla A-9-7 de la Instrucción de acero estructural de 2011 (Parte superior) [16] 28	
Ilustración 4.5: Tabla A-9-7 de la Instrucción de acero estructural de 2011 (Parte inferior) [16] 28	
Ilustración 5.1: Primer modelo de la unión realizado en Catia V5.	30
Ilustración 5.2: Detalle de los conos de reducción de material del primer modelo.	31
Ilustración 5.3: Detalle del abocardado de la pieza para facilitar la entrada de los tubos.	31
Ilustración 5.4: Cambio en la disposición de los taladros. En rojo la antigua disposición; en verde la nueva disposición.	32
Ilustración 6.1: Detalle de control de mallado en el radio de acuerdo de la unión en T.	33
Ilustración 6.2: Mallado del modelo.	34
Ilustración 6.3: Detalles del estudio de mallado extraídos de SolidWorks.	34
Ilustración 6.4: Elementos fijados para la simulación.	35
Ilustración 6.5: Carga aplicada al modelo.	36
Ilustración 6.6: Propiedades mecánicas del ABS y del PLA [17].	37
Ilustración 6.7: Propiedades mecánicas del PET CF [17].	37
Ilustración 6.8: Propiedades mecánicas del Ultrafuse 316L [18].	38
Ilustración 6.9: Campo de tensiones del primer modelo (el límite elástico mostrado es referente al ABS).	39
Ilustración 6.10: Campo de desplazamiento vertical (eje Z) del primer modelo en ABS.	40
Ilustración 6.11: Campo de desplazamiento vertical (eje Z) del primer modelo en PLA.	40
Ilustración 6.12: Campo de desplazamiento vertical (eje Z) del primer modelo en PET CF.	41
Ilustración 6.13: Campo de desplazamiento vertical (eje Z) del primer modelo en Ultrafuse.	41
Ilustración 7.1: Campo de tensiones en la Mejora 1.1: 7mm de espesor.	43
Ilustración 7.2: Campo de tensiones en la Mejora 1.2: 10mm de espesor.	44
Ilustración 7.3: Campo de tensiones en la Mejora 2.1: Espesor máx. 15mm.	45

Ilustración 7.4: Campo de tensiones en la Mejora 2.2: Espesor máx. 20mm.	46
Ilustración 7.5: Campo de tensiones en la Mejora 2.3: Espesor máx. 25mm.	47
Ilustración 7.6: Campo de tensiones en la Mejora 2.4: Espesor máx. 30mm.	48
Ilustración 7.7: Campo de tensiones en la Mejora 2.5: Espesor máx. 35mm.	49
Ilustración 7.8: Campo de tensiones en la Mejora 2.6: Espesor máx. 37,5mm.	50
Ilustración 7.9: Modelo asignado al Ultrafuse.	50
Ilustración 7.10: Modelo asignado al PLA.....	51
Ilustración 7.11: Modelo asignado al PET CF.....	51
Ilustración 7.12: Mejora fallida número 1.	52
Ilustración 7.13: Mejora fallida número 2.	52
Ilustración 8.1: Campo de tensiones en el modelo de PLA, donde se observa una tensión menor en el área central.....	53
Ilustración 8.2: Medidas del horno de curado de Ultrafuse ofrecidas por la empresa.	54
Ilustración 8.3: Imagen de los prototipos 2 y 3 previa a ser pintados.	55
Ilustración 8.4: Características del filamento de PLA de Smart Materials 3D [19]	56
Ilustración 8.5: Vista de la disposición entre el prototipo y los útiles de ensayo.	57
Ilustración 8.6: Detalle de la solución dentada para evitar el deslizamiento.....	58
Ilustración 8.7: Detalle de la zona hueca en los útiles.....	59
Ilustración 8.8: Detalle holgura de los útiles.....	59
Ilustración 8.9: Útil 1 mecanizado.	60
Ilustración 8.10: Útiles acabados y en disposición similar a la de trabajo.	60
Ilustración 8.11: Prototipos 2 y 3 previos a ser pintados.	61
Ilustración 8.12: Prototipo tras el moteado.....	62
Ilustración 8.13: Vista general del equipo de ensayo, incluyendo el banco de ensayo, la cámara de alta resolución y el prototipo colocado para ser ensayado.	63
Ilustración 8.14: Detalle del prototipo y los útiles montados en el banco de ensayo.	63
Ilustración 8.15: Esquema del banco de ensayo [20].....	64
Ilustración 8.16: Ajuste de los tornillos de la pieza a los útiles.	65
Ilustración 8.17: Gráfica y datos obtenidos del software del banco de ensayo para Prototipo 1: Ensayo elástico a compresión.	66
Ilustración 8.18: Gráfica y datos obtenidos del software del banco de ensayo para Prototipo 1: Ensayo a rotura por compresión.....	66
Ilustración 8.19: Gráfica y datos obtenidos del software del banco de ensayo para Prototipo 2: Ensayo elástico a compresión.	67
Ilustración 8.20: Gráfica y datos obtenidos del software del banco de ensayo para Prototipo 2: Ensayo a rotura por tracción.....	68

Ilustración 8.21: Mapa de desplazamiento vertical en Prototipo 1: Ensayo elástico a compresión.....	69
Ilustración 8.22: Mapa de desplazamiento vertical en Prototipo 1: Ensayo a rotura por compresión (justo antes de romper).	70
Ilustración 8.23: Mapa de desplazamiento vertical en Prototipo 1: Ensayo a rotura por compresión.....	70
Ilustración 8.24: Gráfica de desplazamiento vertical frente a imágenes en Prototipo 1: Ensayo a rotura por compresión.....	71
Ilustración 8.25: Mapa de desplazamiento vertical en Prototipo 2: Ensayo elástico a compresión.....	71
Ilustración 8.26: Mapa de desplazamiento vertical en Prototipo 2: Ensayo elástico a tracción.....	72
Ilustración 8.27: Gráfica de desplazamiento vertical frente a imágenes en Prototipo 2: Ensayo elástico a tracción. En verde los datos sin refinar. En rojo los datos tras el postprocesado.....	72
Ilustración 8.28: Mapa de desplazamiento vertical en Prototipo 2: Ensayo a rotura por tracción (justo antes de romper).	73
Ilustración 8.29: Gráfica de desplazamiento vertical frente a imágenes en Prototipo 2: Ensayo a rotura por tracción.....	73
Ilustración 9.1: Mapa de desplazamiento vertical extraído de SolidWorks para 41,75KN a compresión.....	74
Ilustración 9.2: Mapa de desplazamiento vertical en Prototipo 1: Ensayo a rotura por compresión (justo antes de romper).	74
Ilustración 9.3: Mapa de desplazamiento vertical extraído de SolidWorks para 15KN a compresión.....	75
Ilustración 9.4: Mapa de desplazamiento vertical en Prototipo 1: Ensayo elástico a compresión.....	75
Ilustración 9.5: Mapa de desplazamiento vertical en Prototipo 2: Ensayo elástico a compresión.....	76
Ilustración 9.6: Mapa de desplazamiento vertical extraído de SolidWorks para 10KN a tracción.	77
Ilustración 9.7: Mapa de desplazamiento vertical en Prototipo 2: Ensayo elástico a tracción.....	77
Ilustración 9.8: Mapa de desplazamiento vertical extraído de SolidWorks para 20,5KN a tracción.	78
Ilustración 9.9: Mapa de desplazamiento vertical en Prototipo 2: Ensayo a rotura por tracción.	78
Ilustración 9.10: Mapa de tensiones en el modelo para una carga de 41,75KN.....	80
Ilustración 9.11: Gráfico comparativo de las distintas cargas.....	80
Ilustración 9.12: Gráfica Fuerza-Desplazamiento del ensayo Prototipo 1: Ensayo elástico a compresión.....	81
Ilustración 9.13: Gráfica Fuerza-Desplazamiento del ensayo Prototipo 1: Ensayo a rotura por compresión (completo).	82

Ilustración 9.14: Gráfica Fuerza-Desplazamiento del ensayo Prototipo 1: Ensayo a rotura por compresión (parte lineal).	82
Ilustración 9.15: Gráfica Fuerza-Desplazamiento del ensayo Prototipo 2: Ensayo elástico a compresión.	83
Ilustración 9.16: Gráfica Fuerza-Desplazamiento del ensayo Prototipo 2: Ensayo elástico a compresión (parte lineal, sin efecto talón).	83
Ilustración 9.17: Gráfica Fuerza-Desplazamiento del ensayo Prototipo 2: Ensayo elástico a tracción (parte lineal, omitiendo ruido inicial).	84
Ilustración 9.18: Gráfica Fuerza-Desplazamiento del ensayo Prototipo 2: Ensayo a rotura por tracción (completo).	84
Ilustración 9.19: Detalle de rotura del Prototipo 1 a compresión.	86
Ilustración 9.20: Detalle 2 de rotura del Prototipo 1 a compresión.	86
Ilustración 9.21: Detalle 3 de rotura del Prototipo 1 a compresión.	87
Ilustración 9.22: Detalle 4 de rotura del Prototipo 1 a compresión.	87
Ilustración 9.23: Detalle 1 de rotura del Prototipo 2 a tracción.	88
Ilustración 9.24: Detalle 2 de rotura del Prototipo 2 a tracción.	88
Ilustración 9.25: Detalle 3 de rotura del Prototipo 2 a tracción.	89

Resumen.

Bien es sabido que en las últimas décadas la evolución de la impresión 3D ha sido exponencial. La expansión a cada vez más campos ha sido una constante y los usos que ha ido adquiriendo se han multiplicado, proporcionando soluciones a múltiples problemas complejos.

A día de hoy se sigue observando ese incremento de uso, el cual ha dado un salto al mundo de la industria, y, más afín a este proyecto, al mundo de las estructuras y las edificaciones.

Este trabajo pretende ser un impulso en el desarrollo de la impresión 3D en el ámbito estructural, dotando de un punto de partida para futuras investigaciones al campo de las uniones en estructuras ligeras de tubo hueco.

Además del diseño y simulación de unos modelos creados desde cero, se completará con la correspondiente verificación experimental de los prototipos impresos en 3D, que permitirá una comparación objetiva entre el análisis mediante el Método de Elementos Finitos y los resultados experimentales procesados con la tecnología de DIC-2D.

Abstract.

It is well known that the evolution the last decades the evolution of 3D printing has been exponential. The growth to more and more purposes has been constant and the applications acquired have been multiplied, providing solutions to some hard problems.

Nowadays the usage is still growing up, which has expanded into the industry, and specifically, to structures and edifications' world.

This project aims to be an impulse to the development of 3D printing in the structural field, providing a starting point to future researches of joints in lightweight structures of hollow section tubes.

In addition to the design and simulation of the models created from zero, it will be completed with the appropriate experimental verification of the 3D printed prototypes, which will allow an objective comparison between the Finite Elements Method analysis and the experimental results processed with DIC-2D technology.

1. INTRODUCCIÓN.

Las uniones de tubos huecos utilizados para estructuras se han realizado tradicionalmente mediante soldadura. Sin embargo, este método presenta una serie de características que, dependiendo de su finalidad, pueden no ser las idóneas. Las uniones atornilladas son muy poco utilizadas en este tipo de secciones ya que es difícil acceder a las paredes interiores de los tubos para hacer una unión directa y, en la mayoría de casos, hay que abrir agujeros para acceder al interior de los mismos o modificarlos antes de ejecutar la unión.

Las uniones atornilladas presentan unas ventajas sobre las soldadas tales como el ahorro de tiempo en la preparación de los tubos a unir, la posibilidad de su realización por parte de operarios no especializados, un menor riesgo de una mala ejecución, con lo que ello conlleva, o la posibilidad de ser realizada en estructuras temporales y poder ser desmontada fácilmente.

Para poder realizar todo lo anterior es necesaria una solución que lo haga posible. Este proyecto aborda esta problemática y plantea una solución impresa en 3D, dando una oportunidad a esta tecnología que está en auge e impulsándola en beneficio del sector industrial. Todo ello se realizará mediante el diseño en 3D, simulación con elementos finitos y validación experimental de una unión en T de tubo estructural SHS 40.40.3.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.

2.1. La impresión 3D

Si pensamos en progreso en cuanto a nuevos métodos de fabricación en las últimas décadas, no cabe duda de que uno de los más importantes es el método de fabricación aditiva (FDM), o más conocido como impresión 3D.

La impresión 3D es un método de fabricación que se basa en la adición de material por capas horizontales, una sobre otra, hasta crear una figura o geometría previamente diseñada. Esto supone un cambio en la manera de proceder que había hasta ahora, que se basaba en la sustracción de material (mecanizado, tallado...), la combinación de varios materiales (tejido, collage...) o la deformación del mismo (moldeo, extrusión...). [1]

2.1.1. Evolución histórica de la impresión 3D [2].

La primera patente de una impresora 3D se remonta a 1984 por Charles W. Hull. Su patente se basaba en el proceso de impresión 3D conocido como estereolitografía (SLA). Este proceso surgió poco antes en la empresa de Hull, cuando estaba usando resina endurecida por luz ultravioleta para dar una mayor duración al revestimiento de sus mesas. A Hull se le ocurrió que podía utilizar esta técnica para crear capas de material endurecido hasta crear una figura en 3D. Paralelamente, era consciente de que necesitaría un modelo 3D a ordenador, cosa que aún estaba en una fase prematura en esa época, lo que acabó resultando en un nuevo tipo de archivo creado por él mismo: el *SLA file format*, abreviado como STL, el cual sigue siendo un estándar a día de hoy. En 1983, Hull imprimió satisfactoriamente su primer modelo en 3D: una copa.



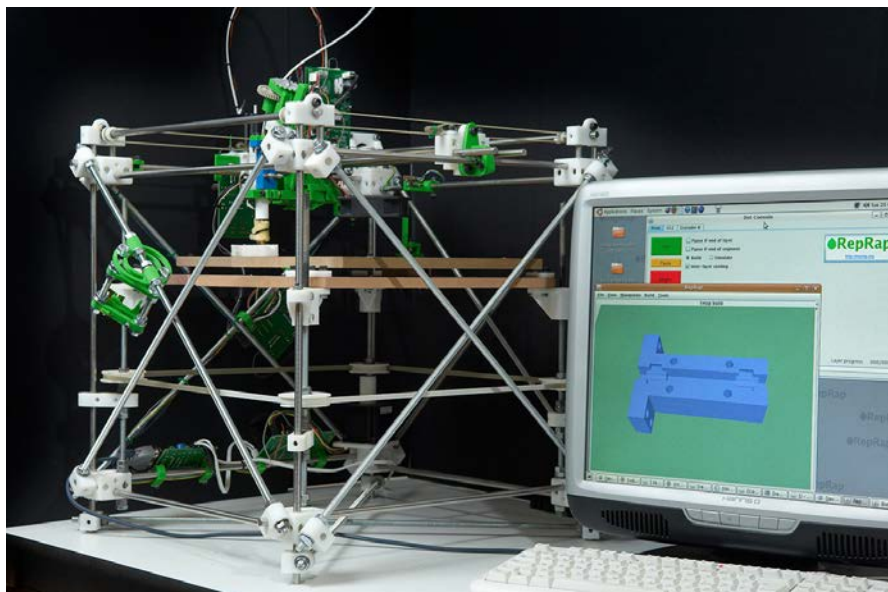
Ilustración 2.1: Primera pieza impresa en 3D de la historia [2]

En 1989 Scott Crump desarrolló el proceso de impresión por deposición de material fundido (FDM), el cual es el más extendido a día de hoy. Como consecuencia de este nuevo proceso, Crump desarrolló otras tecnologías asociadas, como es el filamento de ABS.

Tras inventar este proceso, Crump fundó junto su mujer Lisa la empresa Stratasys, actualmente el mayor fabricante de impresoras 3D. En 2009, la patente de la impresión mediante FDM expiró, abriendo el mercado de las impresoras de FDM, normalmente nombradas como *fabricación con filamento fundido (FFF)* si no son impresoras 3D de Stratasys.

En 2005, el doctor Adrian Bowyer lanzó el proyecto RepRap, cuyo fin fue crear una impresora 3D barata de código abierto que pudiese autorreplicarse a sí misma, de manera que fuese más accesible a todas las personas. Era una meta elevada y difícil, ya que había elementos electrónicos y piezas que no eran de plástico, pero fue un buen punto de partida para futuros desarrollos en la impresión 3D.

La primera impresora 3D RepRap fue lanzada en 2007 bajo el nombre de Darwin 3D printer, con un diseño simple y una calidad mediocre, pero que permitía a la gente tener una impresora 3D en casa como hobby sin ser demasiado cara.

**Ilustración 2.2: RepRap Darwin 3D Printer [3]**

En 2009 se lanzó una versión RepRap mejorada, que aplicaba diversos avances llevados a cabo en esos dos años, llamada Mendel. En 2015 había al menos 30 diseños oficiales RepRap, que derivaron en cientos más. Esos diseños rivalizaron con las impresoras que ya había de compañías como 3D Systems y Stratasys, que tenían sus propios diseños de código cerrado.

Gracias al proyecto RepRap se produjo una transición de las impresoras 3D de uso profesional y de coste elevado a las impresoras 3D de menor coste para uso doméstico. No sólo se mejoraron los costes de los equipos, sino que también hubo una mejora en la calidad de impresión y se creó un ecosistema en torno a la impresión 3D.

A día de hoy, el mundo de la impresión 3D continúa en proceso de maduración, experimentando nuevas mejoras tanto en el proceso de impresión como en materiales y aplicaciones, lo que hace que se abaraten los costes conforme va evolucionando, siendo así, una alternativa viable cada vez en más ámbitos.

2.1.2. Tipos de impresión 3D

Cuando se habla de impresión 3D, por lo general, se suele pensar en el método FDM o FFF, pero lo cierto es que existen distintos métodos a la hora de llevar a cabo una impresión 3D. En ciertas ocasiones, dependen del tipo de aplicación de la pieza o de un material particular.

2.1.2.1. Estereolitografía (SLA).

En el apartado de historia de la impresión 3D ya comentaba por encima este tipo de impresión. La estereolitografía (SLA) se fundamenta en el endurecimiento de una resina líquida fotosensible mediante la aplicación de un láser de luz ultravioleta. Cuando se crea una capa, el soporte se desplaza, y se crea una nueva capa.

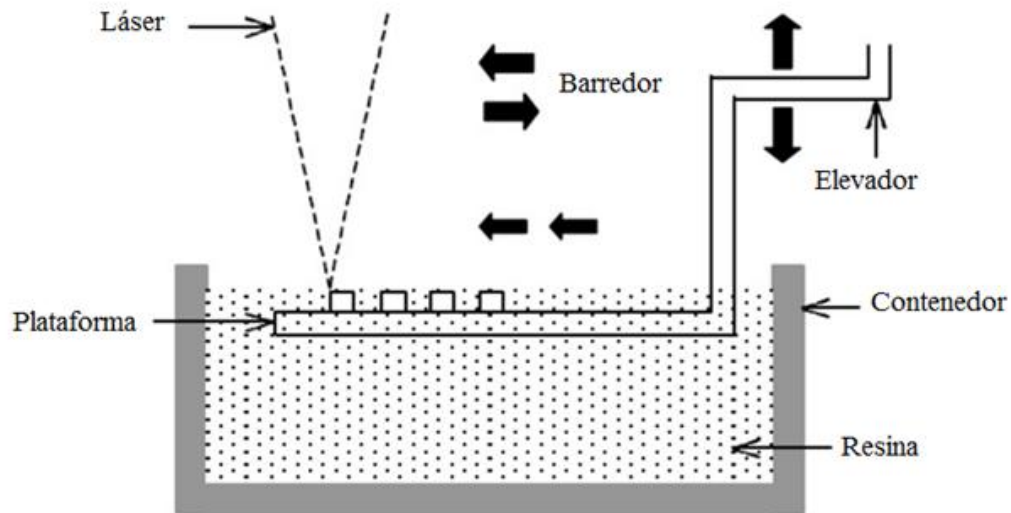


Ilustración 2.3: Esquema de funcionamiento SLA [4]

La precisión del rayo ultravioleta otorga a las piezas un buen acabado y unas tolerancias estrechas, siendo difícil incluso la diferenciación entre las capas de impresión. Esto hace que las piezas sean útiles para la creación de moldes y para el desempeño profesional, pero a un coste más elevado.

2.1.2.2. Procesado digital de luz.

El procesado digital de luz (DLP) es muy similar al SLA, con la diferencia de que, en este tipo de impresión, se puede curar una capa entera de material de una sola vez, lo que hace que sea mucho más rápido que un puntero láser. La tecnología es similar a la utilizada en los proyectores para crear formas en una pantalla.

Sin embargo, este tipo de impresión 3D tiene el mismo inconveniente que el SLA: el elevado coste. No solo el coste de la resina en sí, sino de la propia impresora, que es notablemente más elevado.

2.1.2.3. Inyección de aglutinante.

La inyección de aglutinante (Binder Jetting) es un proceso en el cual se inyecta un aglutinante sobre un material en polvo para solidificarlo en capas. Desde su invención se ha probado polvo de diversos materiales, desde el yeso con inyección de agua hasta materiales más complejos como resinas avanzadas o combinaciones de epoxi, que replican materiales ingenieriles comunes.

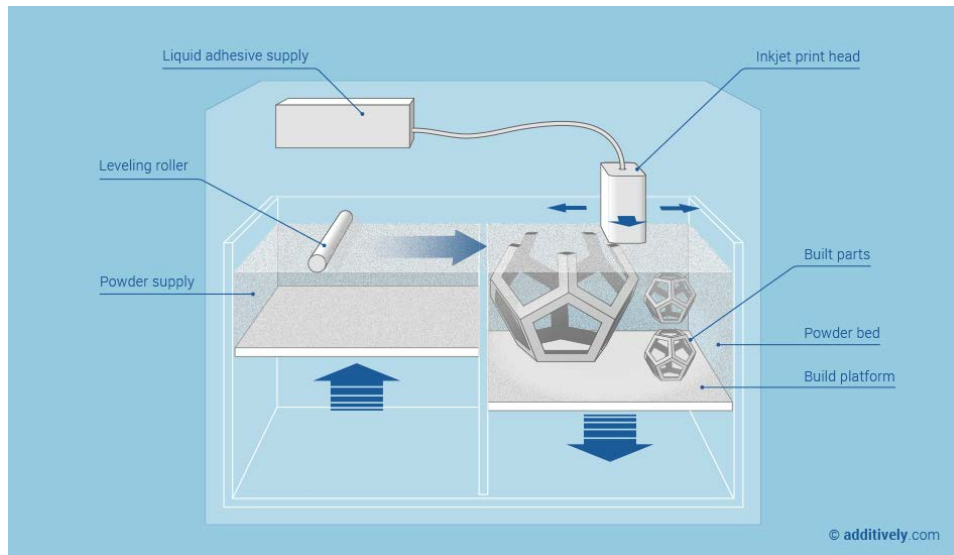


Ilustración 2.4: Esquema sobre el funcionamiento de la tecnología Binder Jetting [5]

Una ventaja de este método es la posibilidad de imprimir con polvo de metales, que posteriormente, se someten a un proceso de curado en un horno.

2.1.2.4. Multijet printing.

El Multijet Printing (MPJ) es un proceso de impresión 3D con un inyector parecido al proceso anterior, el cual puede imprimir en distintos colores, pero con la diferencia de que en este proceso no tenemos el polvo en la cama, sino que se utiliza resina que sale directamente del inyector y se solidifica de manera instantánea con luz ultravioleta.

Gracias al uso de resina en lugar de polvo, se obtienen piezas funcionales y resistentes, ya que con el polvo las piezas eran de carácter más débil.

Esta tecnología tampoco está lo suficientemente madura y por lo tanto el coste sigue siendo elevado.

2.1.2.5. Sinterizado selectivo por láser.

El sinterizado selectivo por láser (SLS), sinterizado directo de metal por láser (DMLS) y fusión selectiva por láser (SLM) trabajan de manera similar. Utilizan láseres de alta potencia para sinterizar o derretir partículas de polvo para convertirlas en masas sólidas.

De manera similar al proceso utilizado en la inyección de aglutinante, el polvo depositado en la cama se solidifica capa a capa hasta tener la pieza final. Sin embargo, en este tipo de impresión no se necesita aglutinante, lo que significa que cualquier material que pueda ser convertido en polvo y pueda derretirse o sinterizarse puede ser utilizado en este tipo de impresión, como pueden ser algunos metales, cerámicas o plásticos.

Al igual que otros procedimientos, este tipo de impresión 3D es muy costosa, resultando más económico un mecanizado por control numérico en una máquina de múltiples ejes.

2.1.2.6. Fabricación con filamento fundido.

Este proceso es el más conocido, aunque, como ya comentaba antes, el nombre más utilizado es el de *Fused Deposition Modeling (FDM)*. Este procedimiento se basa en la fusión de un filamento de plástico en un cabezal móvil, que deposita dicho material capa a capa sobre una superficie, en ocasiones caliente, hasta crear el sólido deseado. Dependiendo del modelo, pueden ser necesarios soportes que se retiran posteriormente.

En cuanto a materiales, hoy día existe una gran gama de plásticos con distintas propiedades. Los más comunes son el ABS, PLA o nylon, aunque existen muchos otros e incluso materiales reforzados con fibras.

Uno de los principales problemas que suele presentarse es el llamado warping, que surge por la contracción del material al enfriarse. Una forma sencilla de solucionarlo es utilizar camas calientes de impresión.

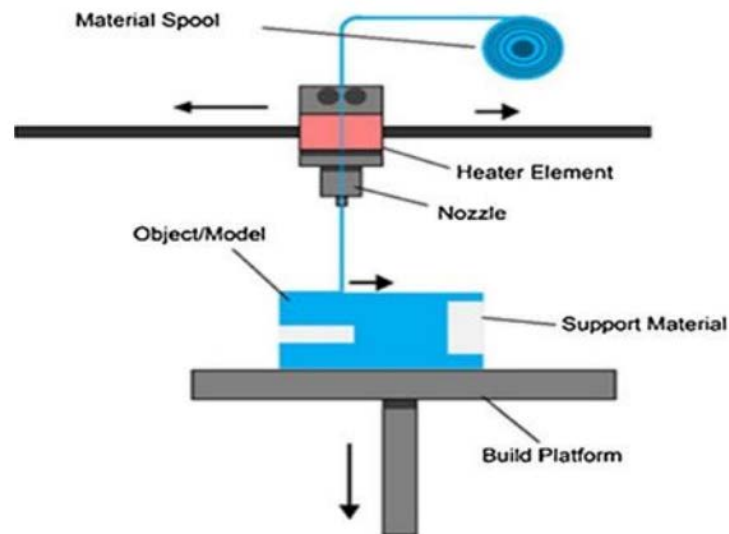


Ilustración 2.5: Esquema de funcionamiento FFF/FDM [6]

2.1.3. Aplicaciones de la impresión 3D.

En cuanto a usos, la impresión 3D nos brinda un amplio abanico de posibilidades y sectores donde puede ser utilizada, desde un uso doméstico hasta un uso industrial o comercial. Se pueden destacar los siguientes campos.

- Arquitectura, diseño de interiores.
- Estructuras.
- Ganadería y agricultura.
- Medicina.
- Automovilismo y sector aeroespacial.
- Ingeniería en sus distintos sectores.
- Educación.
- Ocio y uso doméstico.



Ilustración 2.6: Construcción de una vivienda con impresión 3D [7]

2.2. Impresión 3D en uniones y estructuras.

La impresión 3D es un tema que poco a poco se está introduciendo en el mundo de las estructuras y las edificaciones. Tal es el caso del primer puente construido en acero íntegramente impreso en 3D y que está situado en Ámsterdam. El puente tiene unas características tales que es capaz de soportar el paso, no solo de personas, sino que también el de vehículos [8].



Ilustración 2.7: Colocación del primer puente impreso en 3D, situado en Ámsterdam [8].

Las construcciones impresas en 3D presentan la ventaja de que amplían el abanico geometrías complejas y reducen la dificultad de ejecución ya que se pueden crear a partir de un modelo CAD y sin pasos intermedios [9], y reduciendo la necesidad de personal a la mitad y los costes hasta casi a un tercio [10]. Ya se han hecho varios intentos de utilización de la impresión 3D en la construcción. Además del caso ya citado, nos encontramos otros bastante interesantes como la posibilidad de hacer una cúpula de 3,6m de altura y 15m de diámetro, planteada en 2017 en el MIT, USA [11].



Ilustración 2.8: Cúpula en impresión 3D planteada en el MIT, USA [11].

La primera construcción en 3D en Europa surge en terreno danés. “*The BOD*” se trata de una construcción de menos de 50m² en la que no hay ninguna pared recta, para así poder resaltar la facilidad que ofrece esta tecnología a la hora de realizar geometrías tediosas para un método común, las cuales implicarían un sobrecosto [12].



Ilustración 2.9: Planta y render de “The BOD”, la primera construcción impresa en 3D en Europa [12].

Hoy en día, la vista está puesta en la investigación de materiales comunes como el acero o el hormigón, pero materiales compuestos tipo sándwich también son una posibilidad que se puede plantear [13].

2.3. Método de Elementos Finitos.

El Método de Elementos Finitos (MEF) es una técnica que es llevada a cabo para realizar análisis y simulaciones computacionales.

El método se fundamenta en dividir una geometría, que está sometida a unas condiciones de contorno determinadas, en partes más pequeñas o “elementos”, de manera que un problema complejo se subdivide en problemas más simples. Dependiendo del problema, dichos elementos pueden presentar geometrías diversas, como la triangular o la cuadrangular, entre otras. El hecho de que el número de dichos elementos es determinado o finito, es lo que le da el nombre a dicho método.

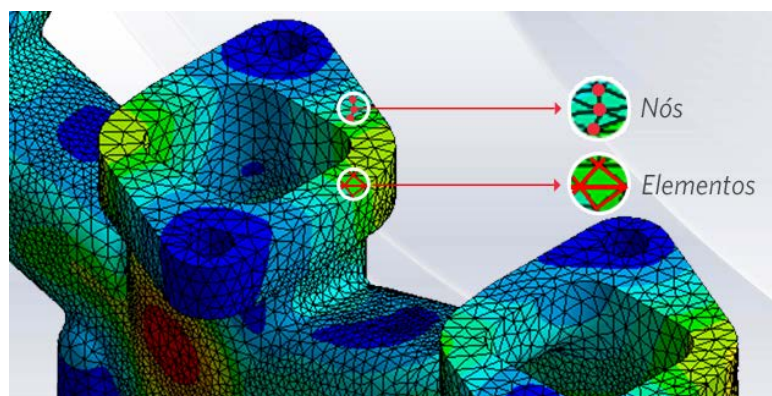


Ilustración 2.10: Nodos y elementos en una malla [14].

Los elementos están conectados entre sí a través de nodos, y al conjunto de todos los elementos se le conoce como malla. Las ecuaciones físicas y matemáticas del problema se resuelven de manera aproximada, y el resultado del análisis computacional se va a ver modificado por el tamaño de la malla y el número de subdivisiones que haya en ella; cuanto más pequeña (y, por tanto, con más elementos) sea la malla, los resultados obtenidos más precisos serán, pero el tiempo de obtención de los mismos también se elevará [14].

2.4. Correlación digital de imágenes.

Digital Image Correlation (DIC) es una técnica utilizada para medir los desplazamientos y deformaciones que se producen en una superficie (DIC-2D) o en un sólido tridimensional (DIC-3D) durante un ensayo mediante captura de imágenes y comparación de las mismas.

En DIC-2D, los parámetros son medidos con una precisión de ± 0.01 píxeles. El proceso consiste en la toma sucesiva de fotografías sobre una superficie con una cámara de alta resolución. El programa discretiza la superficie creando elementos de distinto color (es por ello, que lo ideal es tener una superficie con un moteado fino).

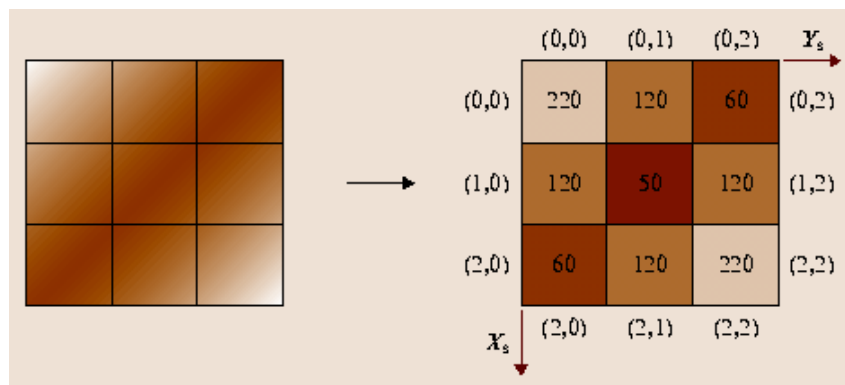


Ilustración 2.11: Esquema de la digitalización y el almacenamiento de una muestra discretizada a partir de una distribución continua de intensidad [15].

A continuación, el software compara el movimiento de los elementos en cada imagen, obteniéndose, así, un campo de desplazamientos y de deformaciones.

Otra opción que ofrece el DIC es la posibilidad de obtener dichos datos en un sólido 3D. El fundamento es parecido, pero en esta ocasión se deben emplear dos cámaras en vez de una sola.

3. OBJETIVOS.

Este trabajo tiene como fin superar una serie de objetivos, tanto a nivel técnico como a nivel académico.

En cuanto a objetivos técnicos, se tiene como principal el diseño de una unión de tubos SHS 40x40.2 que resista, como mínimo, lo que su correspondiente unión soldada, puesto que el objetivo principal es sustituirla. Además de esta característica, deberá presentar una serie de requerimientos que se expondrán con más amplitud en el apartado de requisitos del diseño. Cabe destacar que este proyecto supone los cimientos para futuras investigaciones más amplias y exhaustivas de este campo, y es por ello que el estudio se realizará sobre uniones de barras con una disposición en T, dejando abierta una puerta al estudio de distintas disposiciones y ángulos que permitan una mejor combinación y por tanto estructuras más complejas.

Los objetivos didácticos o académicos que se proponen son los siguientes: aprendizaje del ecosistema existente alrededor de la impresión 3D, incluyendo su historia, aplicaciones y los distintos procesos y técnicas que ello involucra; familiarización y especialización en el modelado con el programa Catia V5 y en el mallado y la simulación mediante métodos de elementos finitos en SolidWorks; aprendizaje de la metodología a seguir para la realización de los ensayos en laboratorio, incluyendo la preparación de las piezas a ensayar y de los soportes pertinentes para el ensayo de compresión y su procesado mediante el método de correlación digital de imágenes; elaboración de una memoria técnica y extracción de resultados y conclusiones de todo el proceso.

4. REQUISITOS DEL DISEÑO.

La finalidad de la pieza que se diseña es la unión de tubo hueco para estructuras ligeras, y es por ello que debe reunir una serie de características que satisfagan dicho fin.

Una de las principales y más importantes es la resistencia que debe tener para soportar las cargas generadas en la unión, y, por tanto, vamos a tomar como referencia la resistencia que tiene una unión soldada de dichos tubos estructurales. Para ello acudimos a la *Instrucción de acero estructural (EAE)* [16] y hacemos el cálculo que se muestra a continuación.

En primer lugar, la norma establece una serie de requisitos para una unión de tubos estructurales.

- *“El espesor mínimo de cualquier barra no será inferior a 2,5mm.”*

En nuestro caso el espesor de los tubos a unir es de 3mm.

- *“Se tomará el valor $\gamma_{M5}=1,00$ para el coeficiente parcial de seguridad γ_{M5} en este tipo de uniones.”*
- *“El ángulo θ entre barras contiguas debe satisfacer la condición $\theta \geq 30^\circ$.”*

En nuestro caso $\theta=90^\circ$ y nos situaríamos en el caso “Unión en T” de la figura 64.2.a.

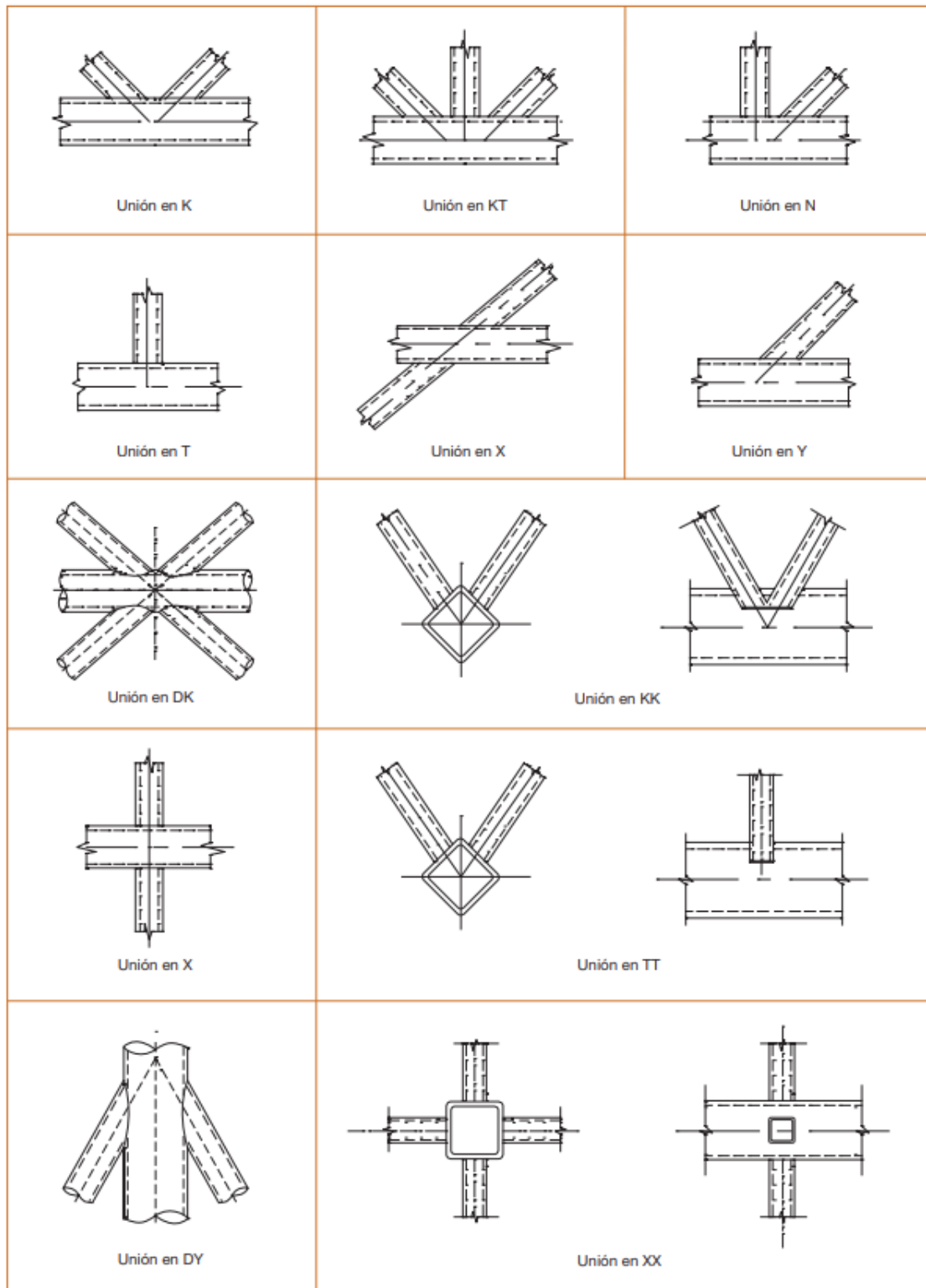


Ilustración 4.1: Tabla 64.2.a de la Instrucción de acero estructural de 2011 [16]

“ β , relación de dimensiones entre una diagonal o montante y el cordón correspondiente. Según los distintos tipos de uniones, se tomarán los valores siguientes:”

$$\beta = \frac{b_1}{b_0} = \frac{40mm}{40mm} = 1$$

Ecuación 1. Coeficiente β .

Donde b_1 es referente al cordón y b_0 es referente al montante.

Sin embargo, al no poder continuar con el valor de $\beta=1$, establecemos $\beta=0,85$, quedando, así, del lado de la seguridad.

“ γ , relación entre la dimensión de un cordón y el doble de su espesor, será:”

$$\gamma = \frac{b_0}{2t_0} = \frac{40mm}{2 \times 3mm} = 6,67$$

Ecuación 2. Coeficiente γ .

Donde b_0 vuelve a ser referente al cordón y t_0 es el espesor de 3mm.

“ η , relación entre la altura de una diagonal o montante y el diámetro o la anchura del cordón correspondiente:”

$$\eta = \frac{h_i}{b_0} = \frac{40mm}{40mm} = 1$$

Ecuación 3. Coeficiente η .

Para las condiciones geométricas en uniones entre diagonales o montantes SHS, como es nuestro caso, seguimos la Tabla 64.7.1.

Tipo de unión	Parámetros de la unión [$i = 1$ ó 2 , $j =$ diagonal o montante solapada]					
	b_i/b_0 o d_i/b_0	b_i/t_i y h_i/t_i o d_i/t_i		h_0/b_0 y h_i/b_i	b_0/t_0 y h_0/t_0	Separación o solape b_i/b_j
		Compresión	Tracción			
T, Y o X	$b_i/b_0 \geq 0,25$	$b_i/t_i \leq 35$ y $h_i/t_i \leq 35$ y Clase 1 ó 2	$b_i/t_i \leq 35$ y $h_i/t_i \leq 35$	$\geq 0,5$ pero $\leq 2,0$	≤ 35 y Clase 1 ó 2	—
K con separación N con separación	$b_i/b_0 \geq 0,35$ y $\geq 0,1 + 0,01 b_0/t_0$				≤ 35 y Clase 1 ó 2	$g/b_0 \geq 0,5(1-\beta)$ pero $\leq 1,5(1-\beta)^{(1)}$ y como mínimo $g \geq t_1 + t_2$
K con solape N con solape	$b_i/b_0 \geq 0,25$	Clase 1			Clase 1 ó 2	$25\% \leq \lambda_{ov} \leq \lambda_{ov,lim}^{(2)}$ y $b_i/b_j \leq 0,75$
Diagonal o montante circular	$d_i/b_0 \geq 0,4$ pero $\leq 0,8$	Clase 1	$d_i/t_i \leq 50$	Como las anteriores, pero con d_i sustituyendo a b_i y d_j sustituyendo a b_j .		

(1) Si $g/b_0 > 1,5(1-\beta)$ y $g > t_1 + t_2$ se tratará la unión como dos uniones T o Y independientes.

(2) $\lambda_{ov,lim} = 60\%$ si la parte oculta no está soldada al cordón, y 80% si la parte oculta está soldada al cordón. Si el recubrimiento sobrepasa el valor $\lambda_{ov,lim}$ o si las diagonales o montantes son secciones rectangulares con $h_i < b_i$ y/o $h_j < b_j$, la unión entre las diagonales o montantes y la cara del cordón debe ser comprobada a cortante.

Ilustración 4.2: Tabla 64.7.1 de la Instrucción de acero estructural de 2011 [16]

Dado que nos encontramos ante una unión en T, realizamos las siguientes comprobaciones:

$$\frac{b_i}{b_0} = 1 \geq 0,25$$

$$\frac{b_i}{t_i} = 13,33 \leq 35$$

$$\frac{h_i}{t_i} = 13,33 \leq 35$$

$$0,5 \leq \frac{b_0}{h_0} = 1 \leq 2$$

$$0,5 \leq \frac{h_i}{b_i} = 1 \leq 2$$

Ecuaciones 4 a 8. Comprobaciones geométricas.

Como podemos observar, se cumplen todas ellas.

En uniones donde los montantes se encuentren sometidos solamente a axil, como es nuestro caso:

$$N_{i,Ed} \leq N_{i,Rd}$$

Ecuación 9. Condición de cálculo de N.

donde el primer término es el esfuerzo axil de cálculo y el segundo término es la resistencia de cálculo de la unión.

Además de las condiciones anteriormente comprobadas, la norma establece en la Tabla 64.7.2 una serie de condiciones adicionales:

Tipo de diagonal o montante	Tipo de unión	Parámetros de unión	
Perfil tubular cuadrado	En T, Y o X	$\frac{b_1}{b_0} \leq 0,85$	$\frac{b_0}{t_0} \geq 10$
	En K o en N con separación	$0,6 \leq \frac{b_1 + b_2}{2b_1} \leq 1,3$	$\frac{b_0}{t_0} \geq 15$
Perfil tubular circular	En T, Y o X		$\frac{b_0}{t_0} \geq 10$
	En K o en N con separación	$0,6 \leq \frac{d_1 + d_2}{2d_1} \leq 1,3$	$\frac{b_0}{t_0} \geq 15$

Ilustración 4.3: Tabla 64.7.2 de la Instrucción de acero estructural de 2011 [16]

Las cuales, como puede verse a continuación, para perfil tubular cuadrado con unión en T, también se cumplen:

$$\frac{b_0}{t_0} = 13,33 \geq 10$$

Puesto que se cumplen las condiciones de ambas tablas, podemos calcular la resistencia de cálculo a partir de la Tabla A-9-7.

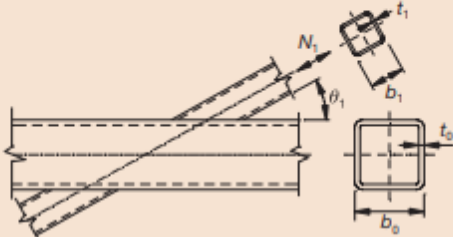
Tipo de unión	Resistencia de cálculo [$i = 1$ ó 2 , $j =$ diagonal o montante solapada]
Uniones en T, Y y X	Agotamiento de la cara del cordón $\beta \leq 0,85$
	$N_{i,Rd} = \frac{k_n f_{y0} t_0^2 \left(\frac{2\beta}{\sin \theta_1} + 4\sqrt{1-\beta} \right)}{\gamma_{M5}}$

Ilustración 4.4: Tabla A-9-7 de la Instrucción de acero estructural de 2011 (Parte superior) [16]

Parámetros b_{eff} , $b_{e,ov}$ y k_n	
$b_{eff} = \frac{10}{b_0} \frac{f_{y0} t_0}{f_{yt} t_i} b_i \quad \text{pero } b_{eff} \leq b_i$	Para $n > 0$ (compresión):
	$k_n = 1,3 - \frac{0,4n}{\beta} \quad \text{pero } k_n \leq 1,0$
$b_{e,ov} = \frac{10}{b_i} \frac{f_{yt} t_j}{f_{y0} t_i} b_i \quad \text{pero } b_{e,ov} \leq b_i$	Para $n \leq 0$ (tracción):
	$k_n = 1,0$
Para diagonales o montantes de sección circular, se multiplican las resistencias anteriores por $\pi/4$, sustituyendo b_1 y h_1 por d_1 y b_2 y h_2 por d_2 .	

Ilustración 4.5: Tabla A-9-7 de la Instrucción de acero estructural de 2011 (Parte inferior) [16]

En primer lugar, vamos a calcular los coeficientes previos que luego hay que introducir en la fórmula. El coeficiente en este caso es $n > 0$ (compresión), más concretamente $n=1$, ya que la unión trabaja a esfuerzo máximo.

A pesar de que en nuestro caso $\beta=1$, en la tabla especifica que para utilizar la fórmula hay que aplicar un β menor o igual a 0,85. Aplicando dicho β quedamos del lado de la seguridad.

Por tanto, para calcular k_n :

$$k_n = 1,3 - \frac{0,4n}{\beta} = 1,3 - \frac{0,4 \times 1}{0,85} = 0,829 \leq 1,0$$

Ecuación 10. Coeficiente k_n .

Ahora podemos proceder a calcular la resistencia de cálculo:

$$N_{1,Rd} = \frac{\frac{K_n f_{y0} t_o^2}{(1 - \beta) \sin \vartheta_1} \left(\frac{2\beta}{\sin \vartheta_1} + 4\sqrt{1 - \beta} \right)}{\gamma_{M5}} = 38KN$$

Ecuación 11. Resistencia de cálculo.

Llegados hasta aquí, tenemos, como comentábamos anteriormente, uno de los requisitos más importantes y que nos servirá de base para los diseños y simulaciones de nuestras uniones.

Siguiendo con la lista de requisitos de nuestra unión tenemos el objetivo de diseñar una unión de fácil ensamblaje. Por ello, se ha optado por la utilización de tornillos en reemplazo de la unión soldada. Tal característica permitiría una puesta en obra más rápida que la solución de soldadura y ampliaría el abanico de operarios capaces de llevar a cabo dicha tarea.

Dado que la unión será parte de una estructura susceptible de ser colocada al aire libre, debemos tener en cuenta el material. Éste debe ser capaz de aguantar las condiciones climatológicas cambiantes y una exposición duradera a la intemperie, sin que resulte en un deterioro significativo de sus propiedades.

Por último, para que todo lo anterior tenga más solidez, es necesario que la nueva solución para la unión suponga un ahorro económico para que sea viable su implantación.

5. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO.

Los distintos modelos de la unión se han realizado en el programa Catia V5 y posteriormente se han mallado y simulado en SolidWorks.

5.1. Modelo inicial.

En un inicio se modela una pieza en forma de T en la cual entran los tubos para posteriormente ser atornillados. Se facilita la entrada de los mismos mediante un abocardado en la unión. El contorno interior de la pieza tiene las dimensiones exteriores de los tubos a unir (SHS40.40.3). La zona central es rellena y se ha realizado un vaciado en forma de cono para reducir el peso y tiempos de impresión en la medida de lo posible. Los taladros tienen un diámetro de 20mm y el centro de los mismos dista 30mm del borde de la pieza. Se modela con un espesor de 5mm.

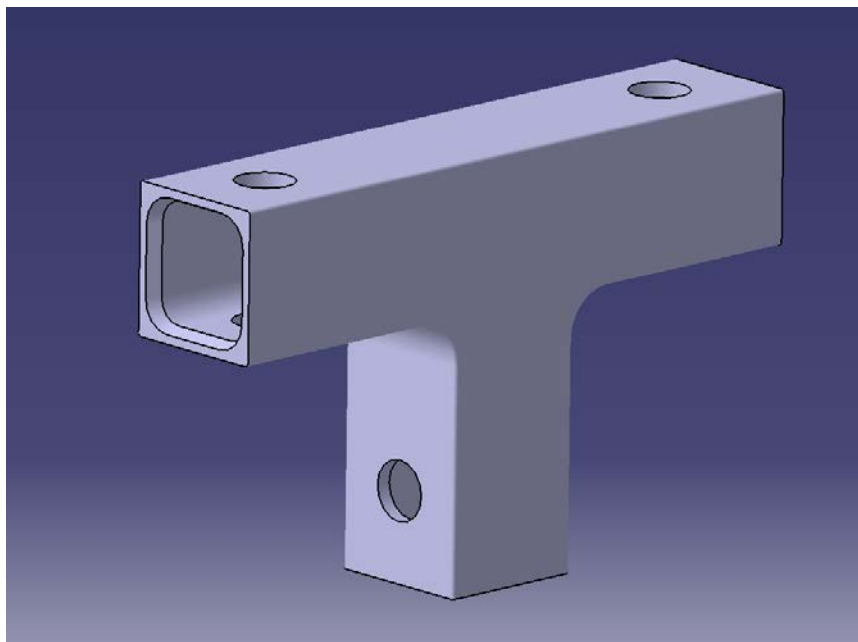


Ilustración 5.1: Primer modelo de la unión realizado en Catia V5.

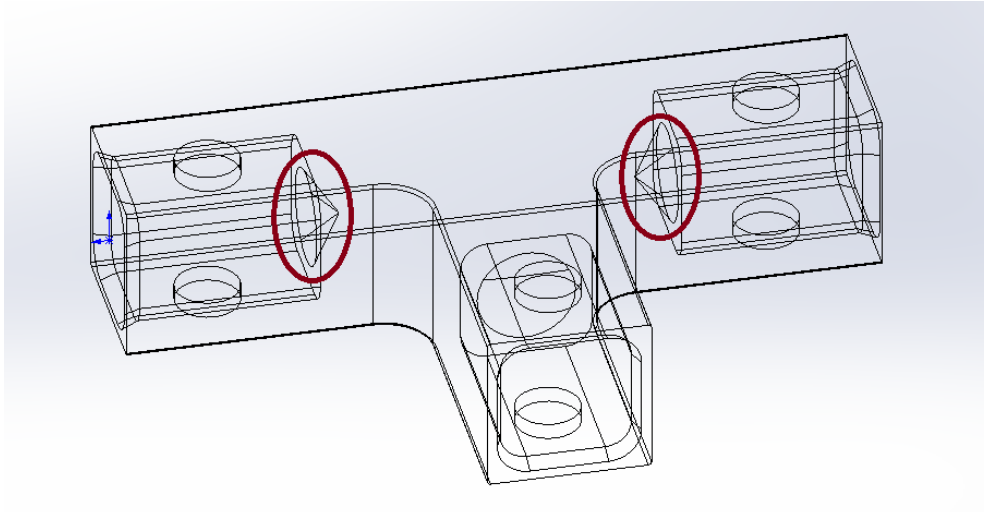


Ilustración 5.2: Detalle de los conos de reducción de material del primer modelo.

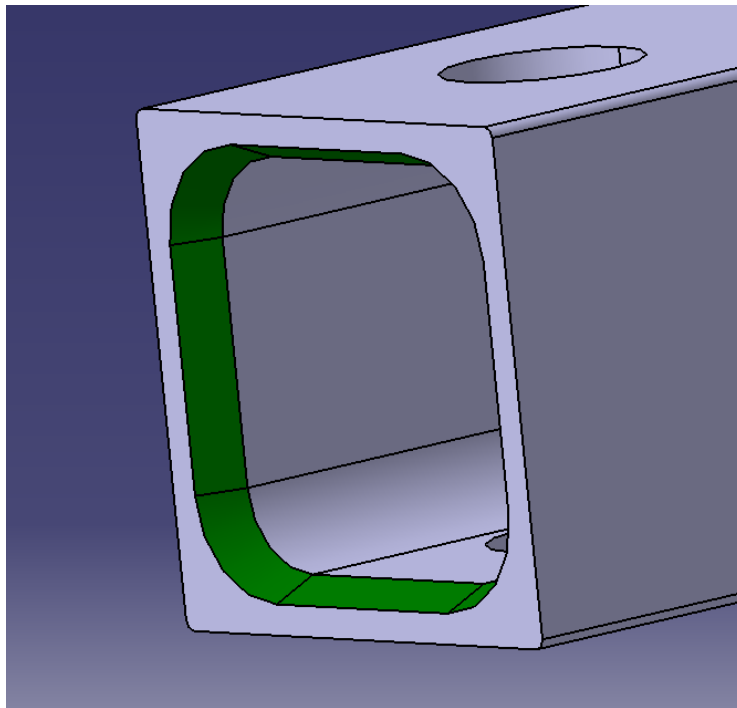


Ilustración 5.3: Detalle del abocardado de la pieza para facilitar la entrada de los tubos.

Como se puede apreciar, los taladros están de tal forma que el tornillo quedaría dentro del plano que forman la pieza y los tubos a unir. Dicha disposición es menos efectiva a la hora de atornillar, y podría resultar incómoda o incompatible con futuras disposiciones de tubos que no fuesen de 90° entre sí. Es por ello que se decide cambiar la disposición de los taladros.

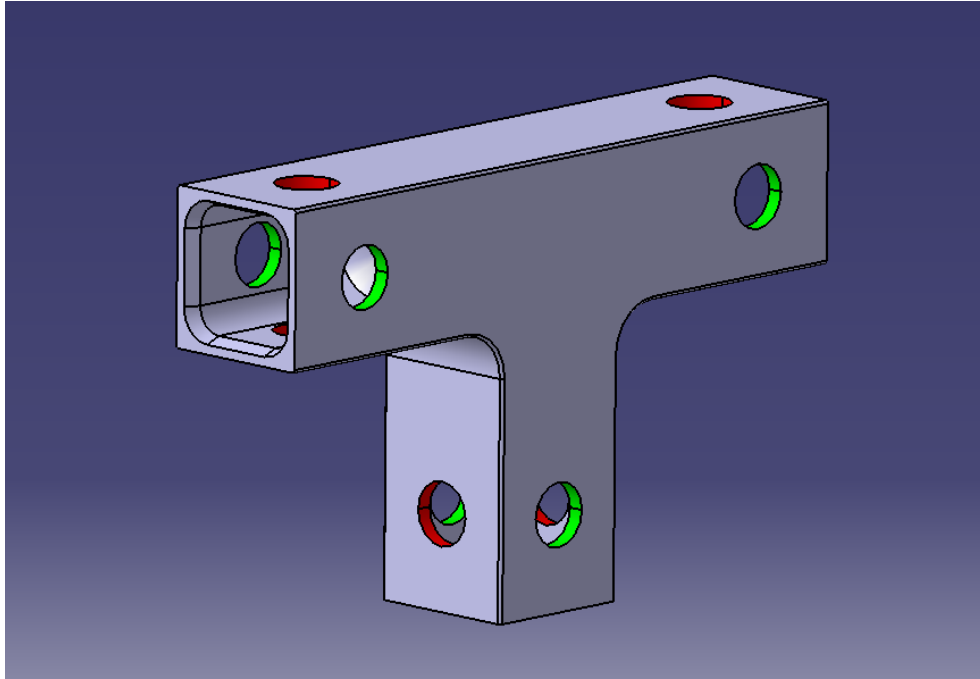


Ilustración 5.4: Cambio en la disposición de los taladros. En rojo la antigua disposición; en verde la nueva disposición.

Con la nueva disposición nos aseguramos la libertad de estudiar posteriormente nuevas uniones con distintos ángulos entre los elementos a unir sin que sea complicado atornillarlos a la unión.

6. DESCRIPCIÓN DEL MODELO BASE.

6.1. Mallado del modelo.

A partir de este apartado se utiliza el software SolidWorks y su módulo de simulación. Tras importar el modelo en formato STL y la posterior comprobación de errores, se pasa al módulo de simulación y se procede a crear la malla.

Para la creación de la misma se establecen controles de mallado en los radios de acuerdo de la T y en las superficies y aristas de los taladros. De esta manera, tendremos un tamaño de celda más pequeño y nos permitirá ver con mayor precisión lo que ocurre alrededor de estos puntos más conflictivos.

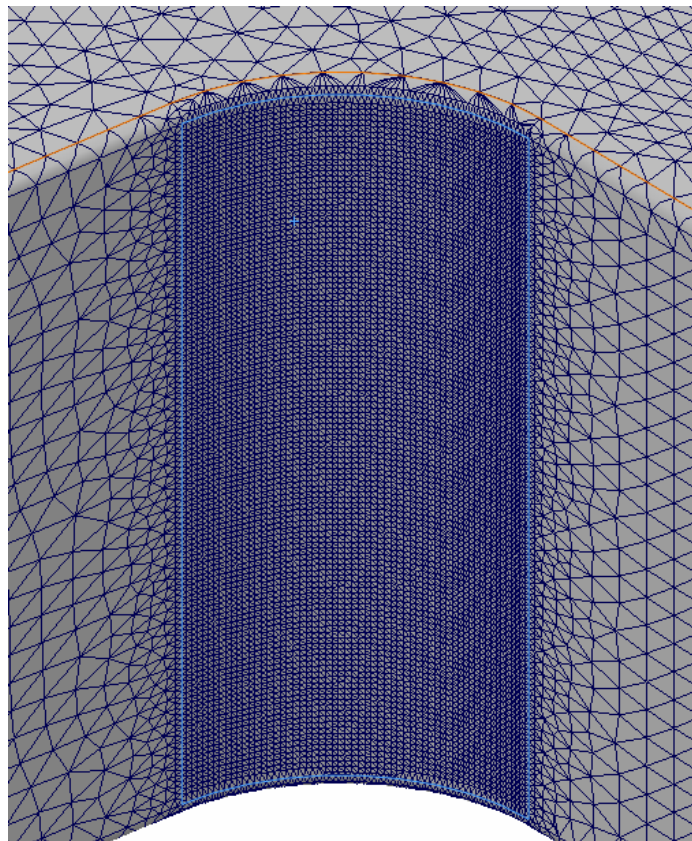


Ilustración 6.1: Detalle de control de mallado en el radio de acuerdo de la unión en T.

Se debe verificar que la malla está realizada correctamente, y para ello se emplea un estudio de mallado, donde se va a comprobar que no se pierde información con el tamaño actual de la malla. Esto se hace realizando simulaciones sucesivas, cada vez con una malla más pequeña, hasta que un resultado es igual al anterior, y se concluye que no hay pérdida de información debido al tamaño de malla y que la malla es correcta.

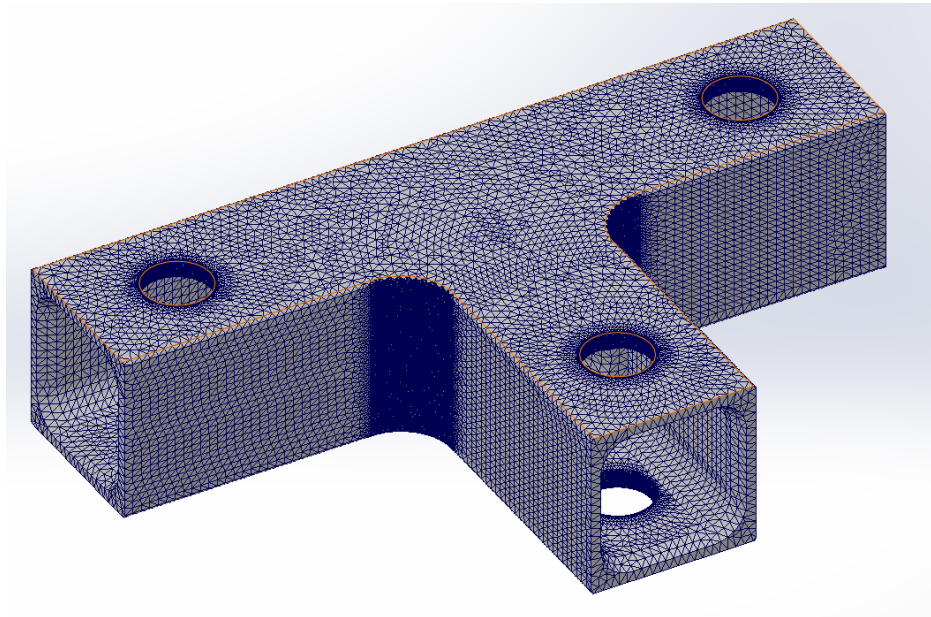


Ilustración 6.2: Mallado del modelo.

Los resultados que arroja el estudio vienen detallados en la siguiente ilustración, y son los tamaños que se emplearán en el resto de simulaciones.

Malla Detalles	
Nombre de estudio	Análisis estático 1 [-Predeterminado-]
Tipo de malla	Malla sólida
Mallador utilizado	Malla estándar
Transición automática	Desactivar
Incluir bucles automáticos de malla	Desactivar
Puntos jacobianos para malla de alta calidad	16 puntos
Control de malla	Definida
Tamaño de elemento	2,55349 mm
Tolerancia	0,119695 mm
Calidad de malla	Elementos cuadráticos de alto orden
Número total de nodos	939685
Número total de elementos	631660
Cociente máximo de aspecto	254,62
Porcentaje de elementos con cociente de aspecto < 3	99,5
Porcentaje de elementos con cociente de aspecto > 10	0,00269
Porcentaje de elementos distorsionados	0
Número de elementos distorsionados	0
Tiempo para completar la malla (hh:mm:ss)	00:00:44

Ilustración 6.3: Detalles del estudio de mallado extraídos de SolidWorks.

6.2. Condiciones de contorno.

Uno de los últimos pasos que se deben seguir antes de poder realizar una primera simulación es la definición de las condiciones de contorno que tendrá nuestro modelo. Para ello se establecen los elementos fijos y la aplicación de las cargas.

6.2.1. Elementos fijos.

Como ya hemos visto, necesitamos fijar el modelo por algunas zonas, las cuales representarán un anclaje o en este caso la oposición que ofrecen los tubos. En nuestro estudio vamos a suponer que las barras concéntricas no se mueven y el tubo transversal es el que ofrece una fuerza de compresión. Es por ello que establecemos como fijas las caras interiores de los taladros de dichas barras tal y como se muestra en la figura.

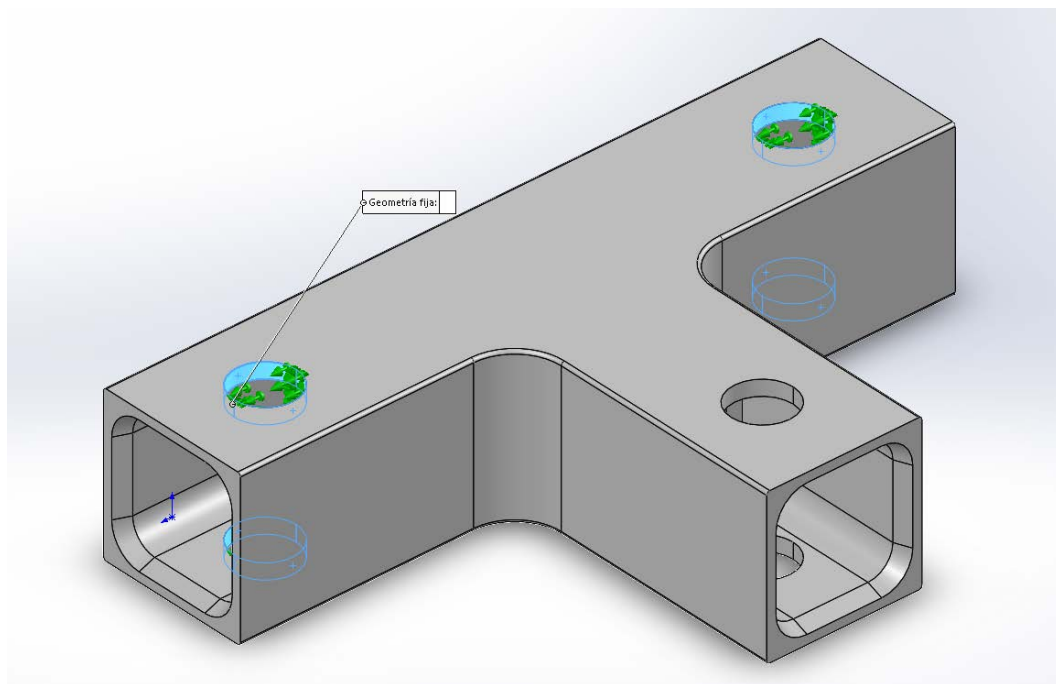


Ilustración 6.4: Elementos fijados para la simulación.

En azul se pueden observar las geometrías del modelo que quedan fijas, mientras que las flechas verdes nos indican que el movimiento en dichas caras queda restringido en todas las direcciones, ya que hay más tipos de condiciones de contorno como son los apoyos móviles o los desplazamientos en alguna dirección concreta.

6.2.2. Fuerzas.

Para la aplicación de las cargas, tal y como calculamos anteriormente, se utilizan 38KN a compresión. La carga está aplicada sobre las caras de los taladros restantes y en dirección al centro de la unión, como se puede ver en la figura. En un caso real se producen cargas en direcciones distintas y no únicamente a

compresión, pero en este proyecto se abordará el caso más sencillo, sirviendo de base a futuros proyectos que recojan dichos casos.

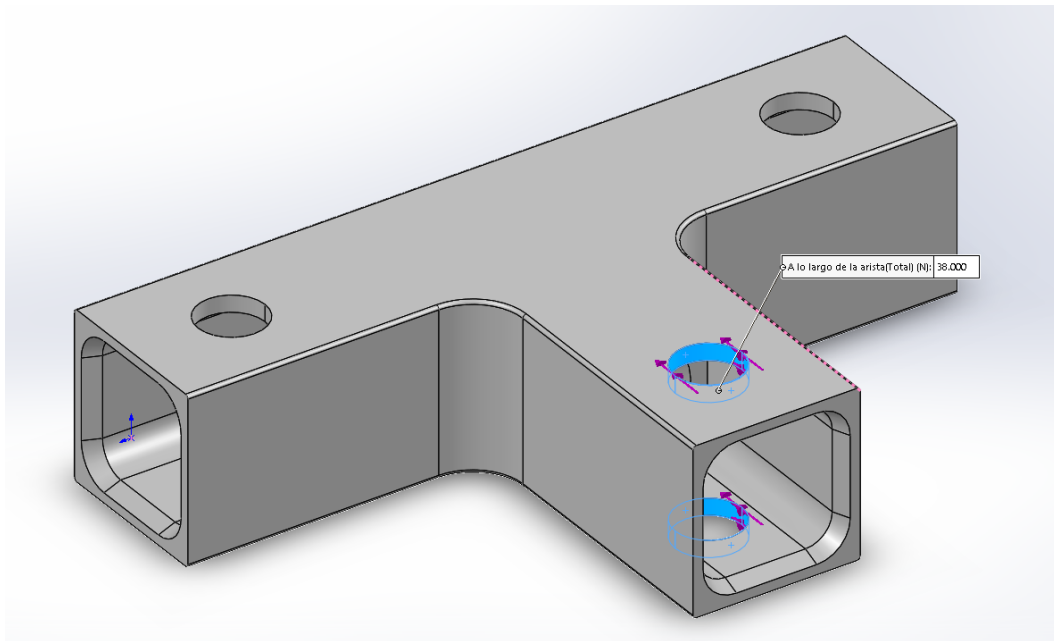


Ilustración 6.5: Carga aplicada al modelo.

6.3. Introducción del material.

La elección del material es una tarea crucial para la realización del proyecto, ya que debe cumplir unos requerimientos tanto de resistencia como de viabilidad para la impresión 3D. Es por ello que en un inicio disponemos de un abanico de materiales que iremos reduciendo poco a poco hasta llegar al idóneo o al más viable para este proyecto.

Los materiales que se van a tener en cuenta en un inicio son ABS, PLA, PET CF y Ultrafuse 316L, cuyas características se presentan a continuación. Para los tres plásticos se han utilizado los datos arrojados en la caracterización de los mismos hecha por la Universidad de Jaén y la de Málaga y publicados en el artículo *Experimental behaviour of 3D-printed T-Stub models* [17], el cual fue presentado en el XII Congreso de Construção Metálica e Mista realizado en noviembre de 2019 en Coimbra (Portugal).

- ABS: Es el material de menor límite elástico de todos los que tenemos, con un valor de 22,3MPa y un módulo elástico de 1885MPa.

- PLA: Su límite elástico es de 31,4MPa y su módulo de elasticidad es de 2853MPa.

		E (MPa)	σ_y (Mpa)	σ_t (MPa)	ε_u (%)
PLA	Experimental average	2853	31.4	43.1	3.2
	Standard Deviation	5.0%	7.6%	3.5%	12.5%
	Filament	4357	-	65.5	32.0
	Difference	-34.5%	-	-34.2%	-90.0%
ABS	Experimental average	1885	22.4	30.3	3.7
	Standard Deviation	2.2%	16.5%	1.3%	8.1%
	Filament	2300	-	45	55.0
	Difference	-18.0%	-	-32.7%	-93.3%

Ilustración 6.6: Propiedades mecánicas del ABS y del PLA [17].

- PET CF: Este material se trata de un compuesto de tereftalato de polietileno con un refuerzo de fibras de carbono, que hacen una mejora notable de su comportamiento obteniéndose, así, un límite elástico de 44,3MPa y un módulo elástico de 8008MPa.

PET CF	Experimental average	8008	44.3	65.5	2.6
	Standard Deviation	6.5%	6.8%	3.8%	19.2%
	Filament	9000	-	80	2.5
	Difference	-11.0%	-	-18.1%	4.0%

Ilustración 6.7: Propiedades mecánicas del PET CF [17].

En la ilustración 5.10 los encabezados de las columnas son iguales a los de la ilustración anterior.

- Ultrafuse 316L: Con este material se quiere estudiar la viabilidad de una impresión 3D de acero en este proyecto. Se trata de un acero inoxidable tipo 316L y sus características vienen dadas en la ilustración 5.11.

	¹ Specimen shape Form E2x6x20 according to DIN 50125 ² Undersized impact test specimen according to DIN EN ISO 148-1		
Print direction	Standard	XY	ZX
Orientation		Flat	Upright
Tensile strength	DIN EN ISO 6892-1 ¹	561 MPa	521 MPa
Yield Strength, $R_{p0.2}$	DIN EN ISO 6892-1 ¹	251 MPa	234 MPa
Elongation at Break	DIN EN ISO 6892-1 ¹	53 %	36 %
Impact Strength Charpy (notched)	DIN EN ISO 148:2017-05 ² (2mm V-notch)	111 J/cm ²	-
Vickers Hardness	DIN EN ISO 6507-1	128 HV10	128 HV10

Ilustración 6.8: Propiedades mecánicas del Ultrafuse 316L [18].

Al tener estos materiales unas propiedades procedentes de caracterizaciones experimentales se deben introducir en el software con los nuevos valores, ya que el mismo posee una amplia biblioteca de materiales pero que, en este caso, tienen unas propiedades estandarizadas y no las específicas que deseamos. En cualquier caso, las propiedades introducidas son iguales en todas las direcciones ya que el software no contempla la opción de asignar propiedades según las direcciones de los ejes.

6.4. Simulación.

Una vez se han determinado todos los parámetros anteriores y se ha introducido el material en el software se ejecuta el estudio. El tiempo de la simulación varía dependiendo de los valores de malla que se hayan establecido en el estudio de mallado. Tras varias simulaciones se obtienen los resultados para nuestros distintos materiales y para el diseño inicial de la unión.

6.5. Obtención de resultados.

Dado que las tensiones obtenidas son únicamente dependientes de las condiciones de contorno y de la geometría de nuestro modelo, pero no del material empleado, el campo de tensiones que arroja la simulación es el mismo para los distintos casos.

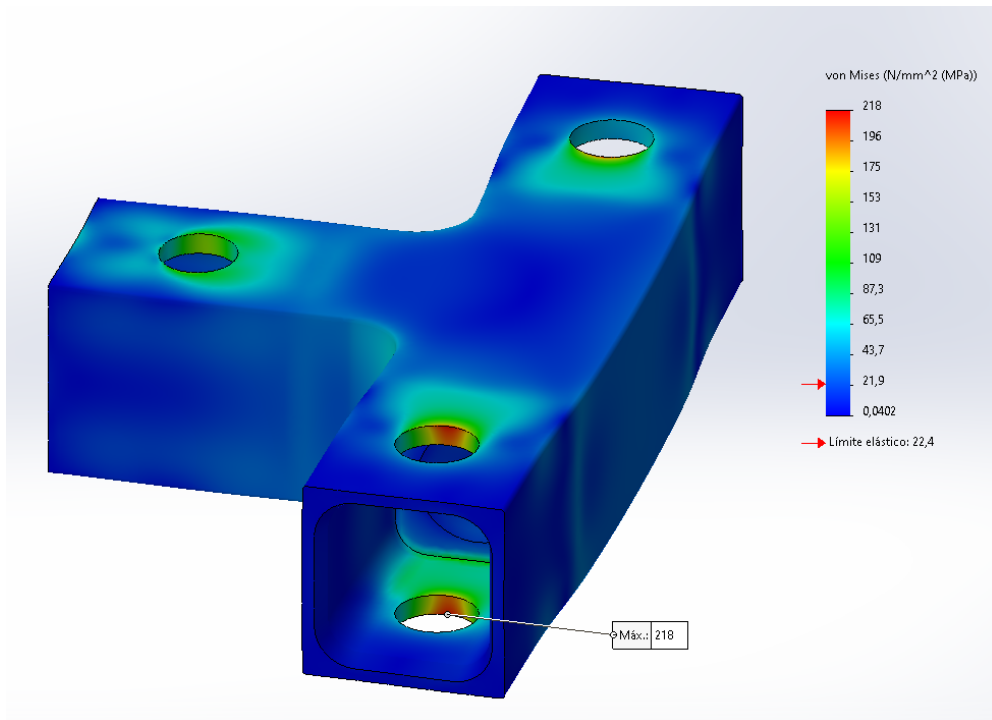


Ilustración 6.9: Campo de tensiones del primer modelo (el límite elástico mostrado es referente al ABS).

Como se observa en la ilustración 5.11, la tensión máxima se encuentra próxima a los taladros de los tornillos con un valor de 218MPa, y por cuestiones de simetría, es la misma en el lado opuesto.

En cuanto a las deformaciones y desplazamientos, cada material arroja unos resultados distintos. A continuación, se muestran los campos de desplazamiento vertical de las distintas simulaciones. Se ha elegido este parámetro como significativo ya que servirá para compararlo con los resultados que se obtengan en los ensayos de laboratorio y se procesen mediante el software de correlación digital de imágenes.

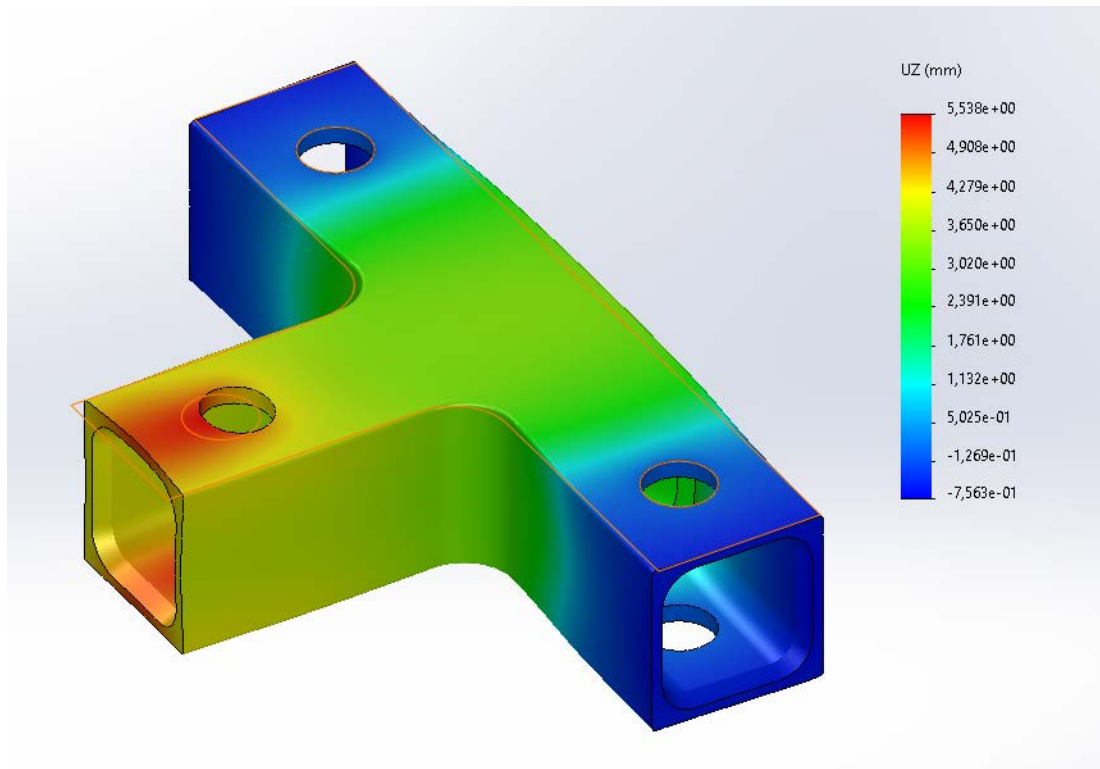


Ilustración 6.10: Campo de desplazamiento vertical (eje Z) del primer modelo en ABS.

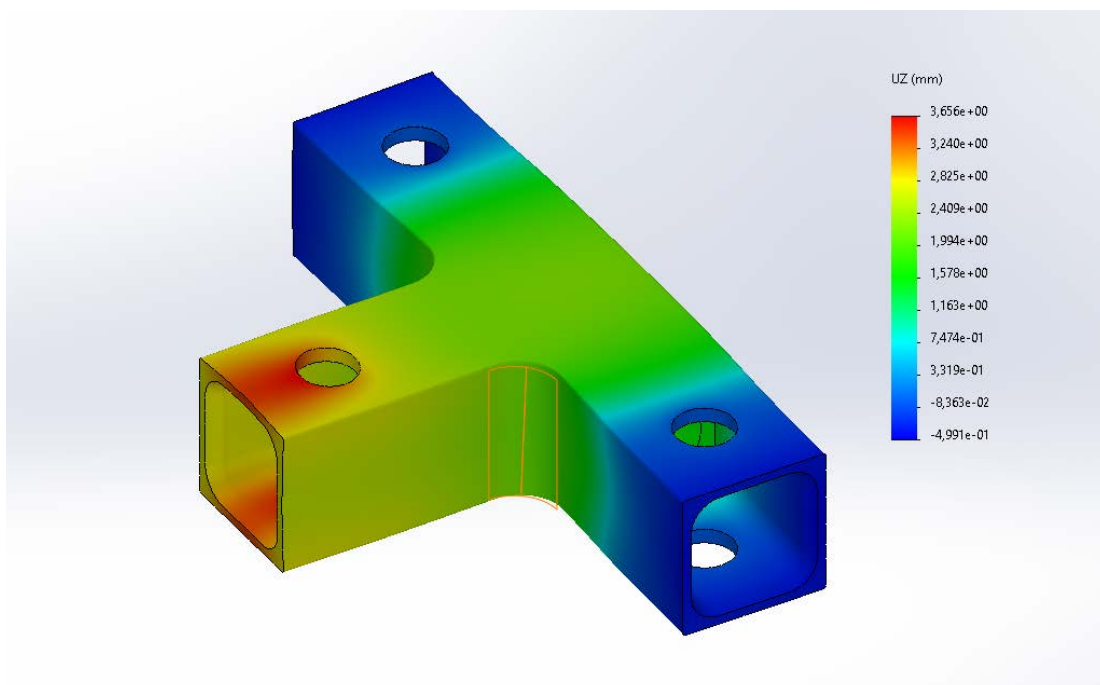


Ilustración 6.11: Campo de desplazamiento vertical (eje Z) del primer modelo en PLA.

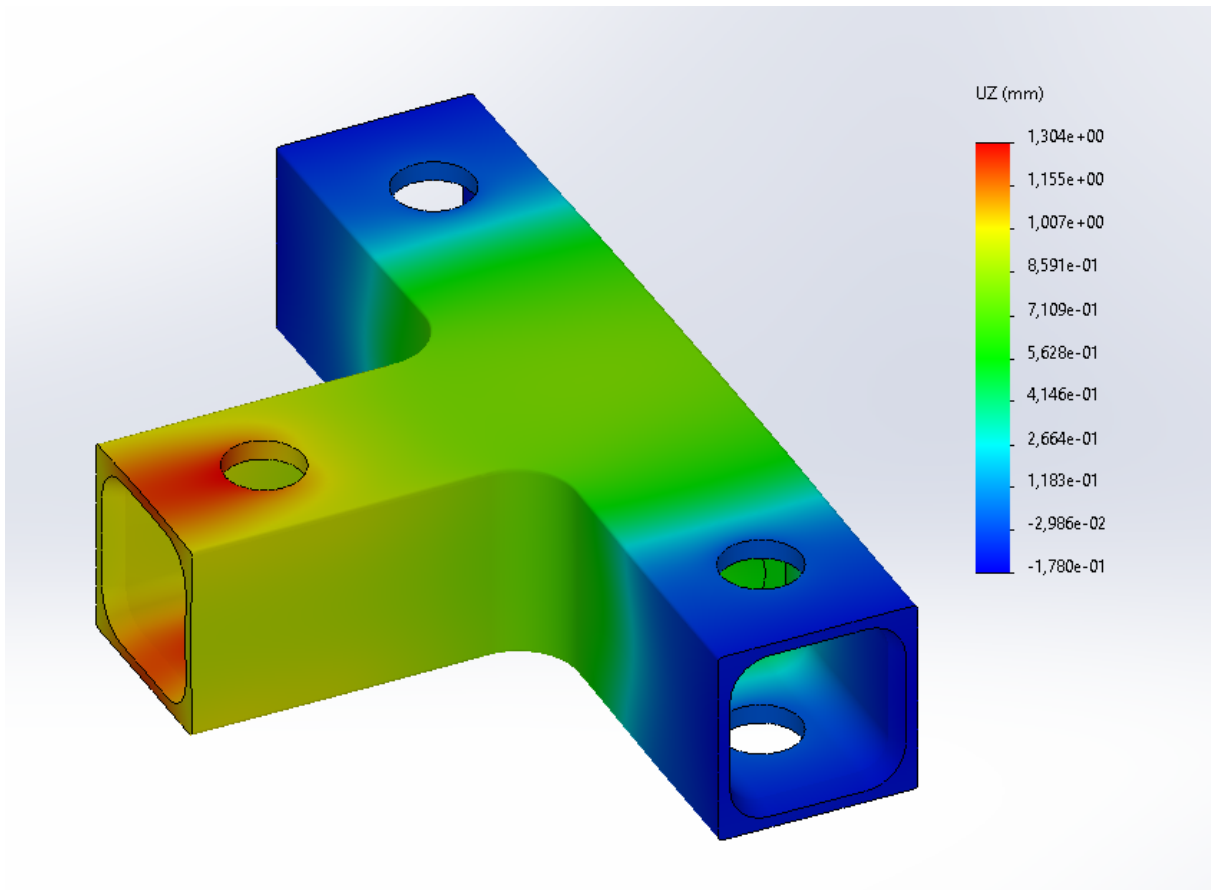


Ilustración 6.12: Campo de desplazamiento vertical (eje Z) del primer modelo en PET CF.

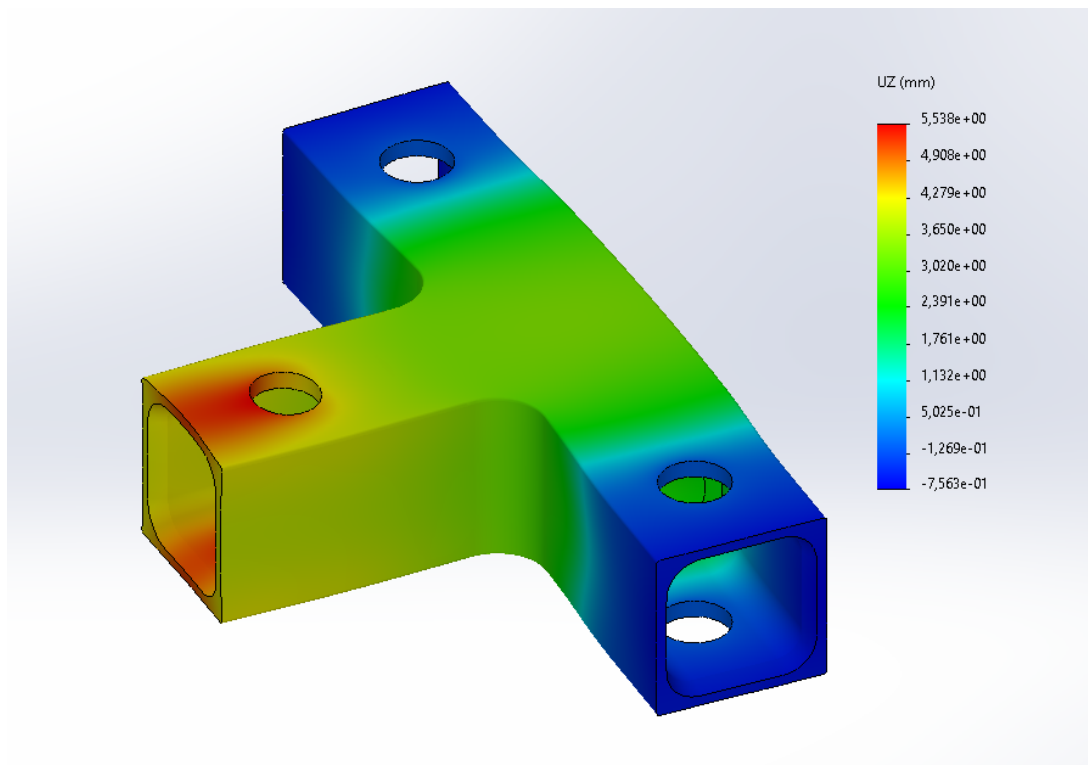


Ilustración 6.13: Campo de desplazamiento vertical (eje Z) del primer modelo en Ultrafuse.

Debido a que únicamente la pieza hecha en acero impreso sería la única de aguantar las cargas con este modelo, se somete dicha pieza a un proceso de evolución y mejora en el que se pretende asignar una geometría capaz de aguantar las cargas para cada material.

7. MEJORA DEL MODELO INICIAL.

Como se ha comentado, las tensiones resultantes sobre el modelo inicial eran excesivas para la mayoría de los materiales de nuestro abanico. Es por ello que se debe aumentar las dimensiones de la pieza u optar por distintas mejoras.

7.1. Mejora 1: Aumento de espesor.

La mejora inicial se plantea como un aumento en el espesor de la pieza, para así, aumentar el área de transmisión de las cargas y, por tanto, reducir las tensiones resultantes.

7.1.1. Mejora 1.1: Espesor 7,5mm.

Se aumenta el espesor de la pieza en 2,5mm, estableciéndose, así, en un total de 7,5mm. Dicha mejora reduce la tensión total hasta 138MPa, encontrándose nuevamente en una arista de los taladros. Es insuficiente, pues dista aún mucho de la resistencia de los plásticos impresos, pero se comprueba que es una buena línea de mejora.

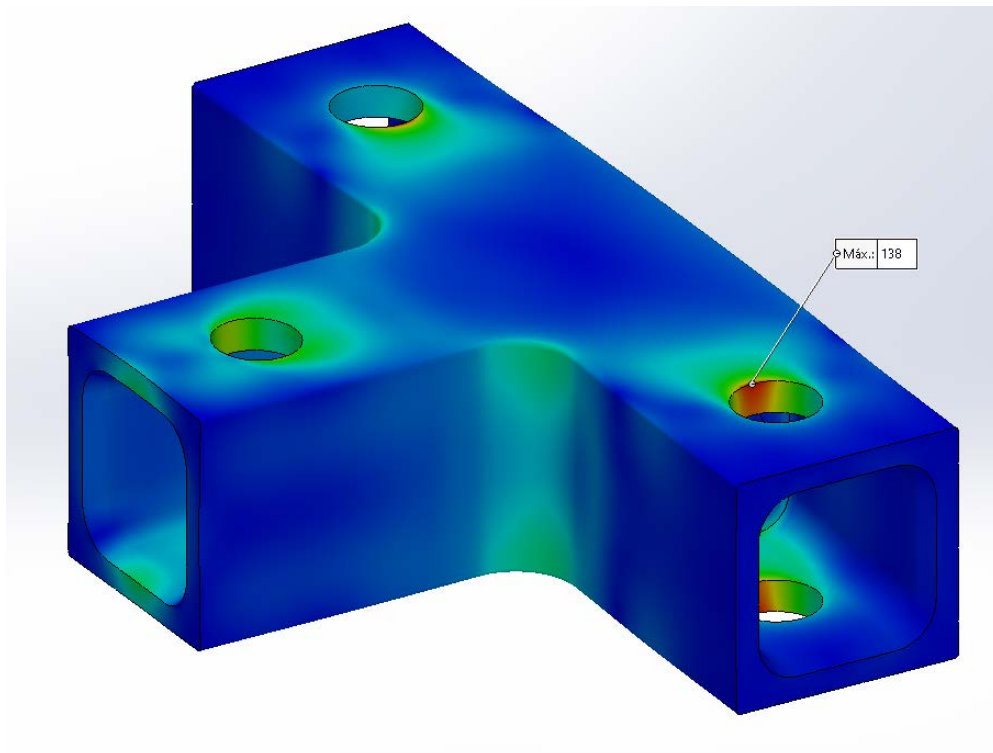


Ilustración 7.1: Campo de tensiones en la Mejora 1.1: 7mm de espesor.

7.1.2. Mejora 1.2: Espesor 10mm.

En esta ocasión el diseño consta con un espesor de pared de 10mm. La simulación arroja una tensión máxima de 99,4MPa en las mismas zonas anteriores.

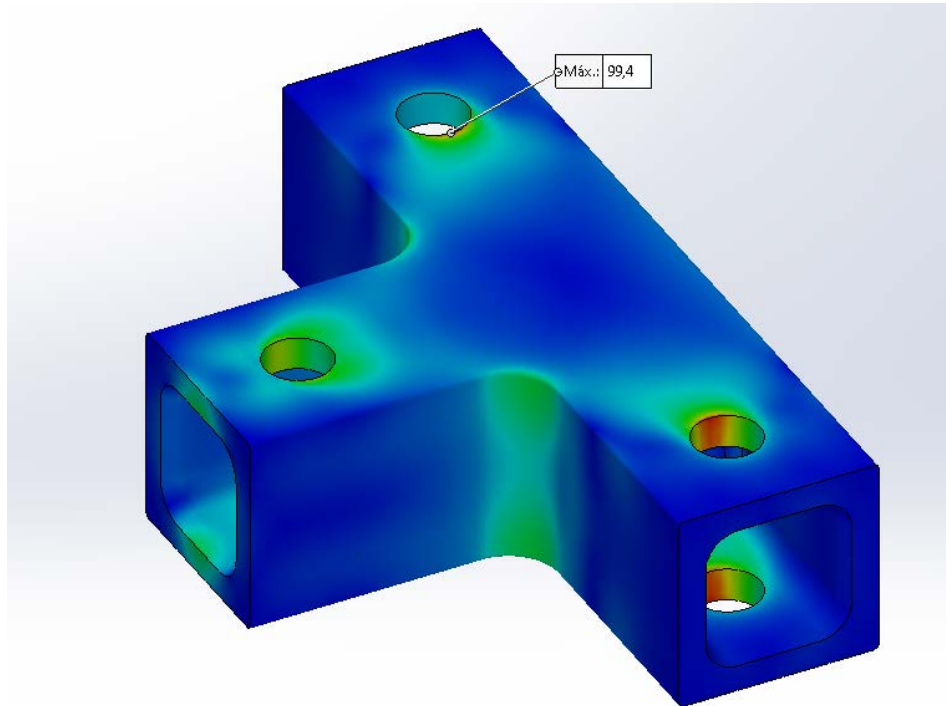


Ilustración 7.2: Campo de tensiones en la Mejora 1.2: 10mm de espesor.

7.2. Mejora 2: Salientes alrededor de los taladros.

Tras ver que las tensiones avanzan favorablemente con el aumento del espesor, pero observar que las zonas más problemáticas se concentran en las inmediaciones de los taladros y no en los radios de acuerdo de la pieza, se decide aumentar el espesor de manera más pronunciada en dichas zonas. La consiguiente línea de evolución se centra en la combinación de estas dos mejoras.

7.2.1. Mejora 2.1: Espesor máximo 15mm.

En esta serie de mejoras, cuando se habla de espesor máximo, va referido al espesor de los salientes alrededor de los taladros. En este caso, partimos del último espesor de 10mm en toda la pieza, añadiendo dichos salientes de 5mm de espesor cada uno, con 38mm de lado y con un redondeo de 4mm de radio en las esquinas.

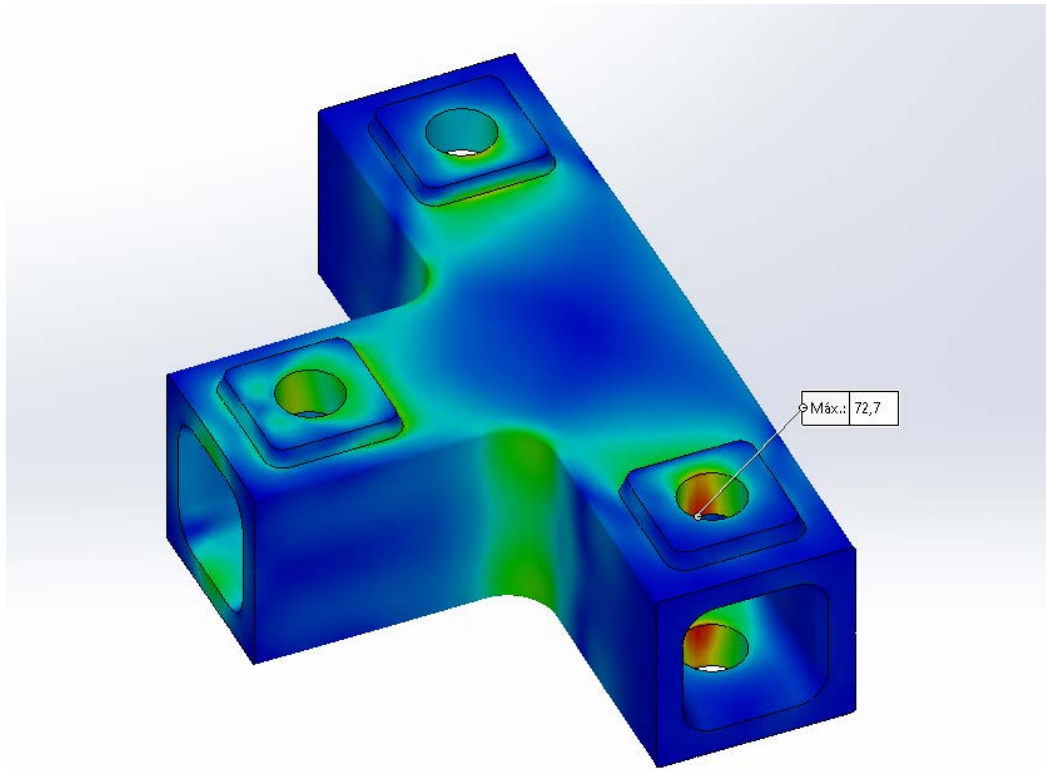


Ilustración 7.3: Campo de tensiones en la Mejora 2.1: Espesor máx. 15mm.

Sigue habiendo una reducción de la tensión máxima que se sitúa en 72,7MPa.

7.2.2. Mejora 2.2: Espesor máximo 20mm.

Se mantiene el espesor de 10mm en la pieza y se aumenta el grosor del saliente se 5mm a 10mm, situando el espesor máximo en 20mm. En este caso se ha hecho menos hincapié en la geometría del saliente, obviando el redondeo del mismo y con un lado de 30mm. La tensión máxima se reduce a 66,1MPa.

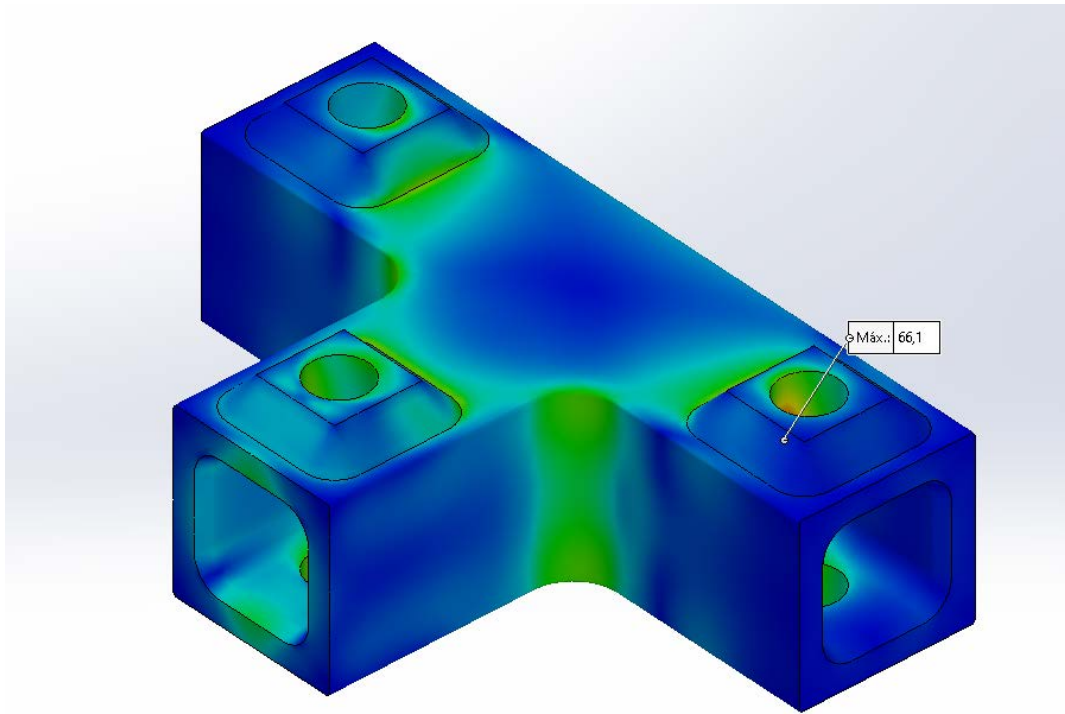


Ilustración 7.4: Campo de tensiones en la Mejora 2.2: Espesor máx. 20mm.

7.2.3. Mejora 2.3: Espesor máximo 25mm.

Como indica el título, este modelo de unión tiene un espesor máximo de 25mm en los salientes. Sin embargo, lo que se ha hecho ha sido aumentar el espesor general de la pieza, hasta los 15mm, y se han mantenido los 10mm en el saliente. La pieza empieza a tener un grosor y dimensiones considerables, pero es la única manera viable de aumentar su resistencia. La tensión máxima es de 46,3MPa, lo que nos indica que está cerca de los límites elásticos de nuestros materiales.

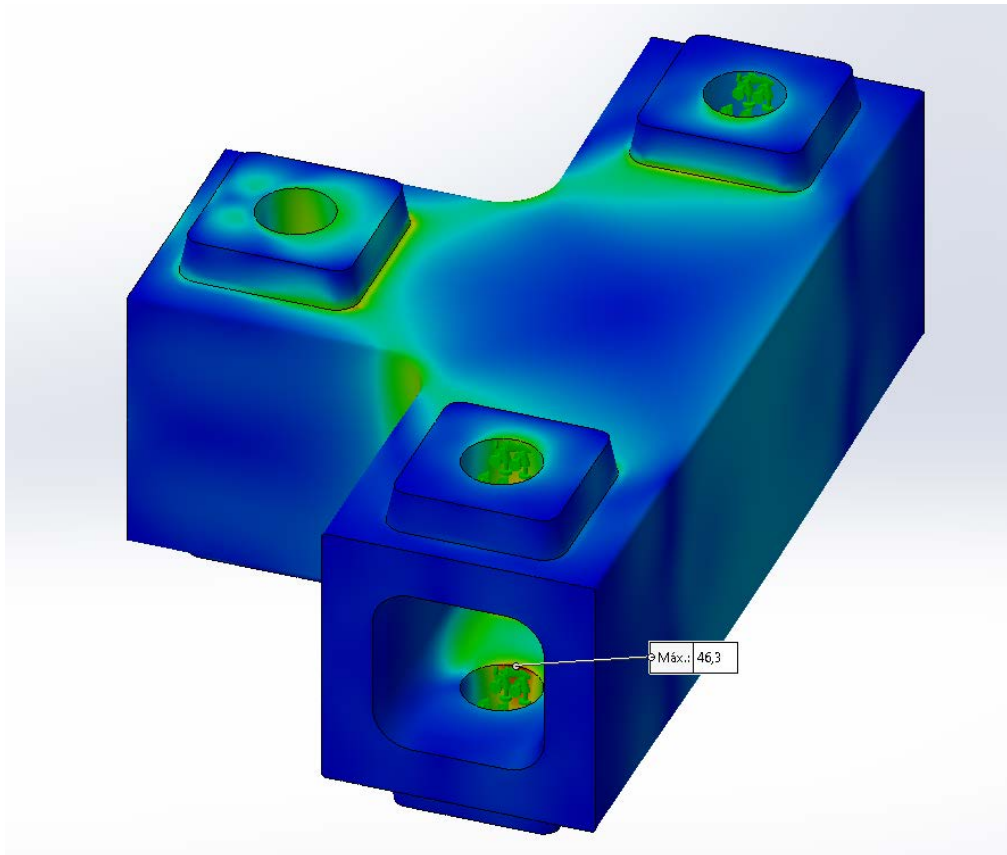


Ilustración 7.5: Campo de tensiones en la Mejora 2.3: Espesor máx. 25mm.

7.2.4. Mejora 2.4: Espesor máximo 30mm.

A partir de este modelo las dimensiones de la superficie externa de los salientes es de 42x42mm, ya que para el tornillo correspondiente a los taladros se necesita una arandela cuyo diámetro exterior es de 39mm, y, a pesar de que los tornillos no son competencia de este TFG, se quiere hacer un modelo que permita continuar el estudio en futuros trabajos. Es por ello que las dimensiones se realizan de manera que asiente bien la arandela y la cabeza del tornillo sobre los salientes, sin que sobresalgan por los laterales. Bajo esta premisa, se aumenta el espesor general de la pieza hasta los 20mm y se sigue dejando constante el de los salientes.

La tensión máxima que da la simulación es de 33,7MPa. Esta tensión está por debajo del límite elástico del PET CF, y, por tanto, asignamos este modelo como válido para dicho material. Sin embargo, se ha de seguir para averiguar un diseño que sea capaz de resistir el ABS y el PLA.

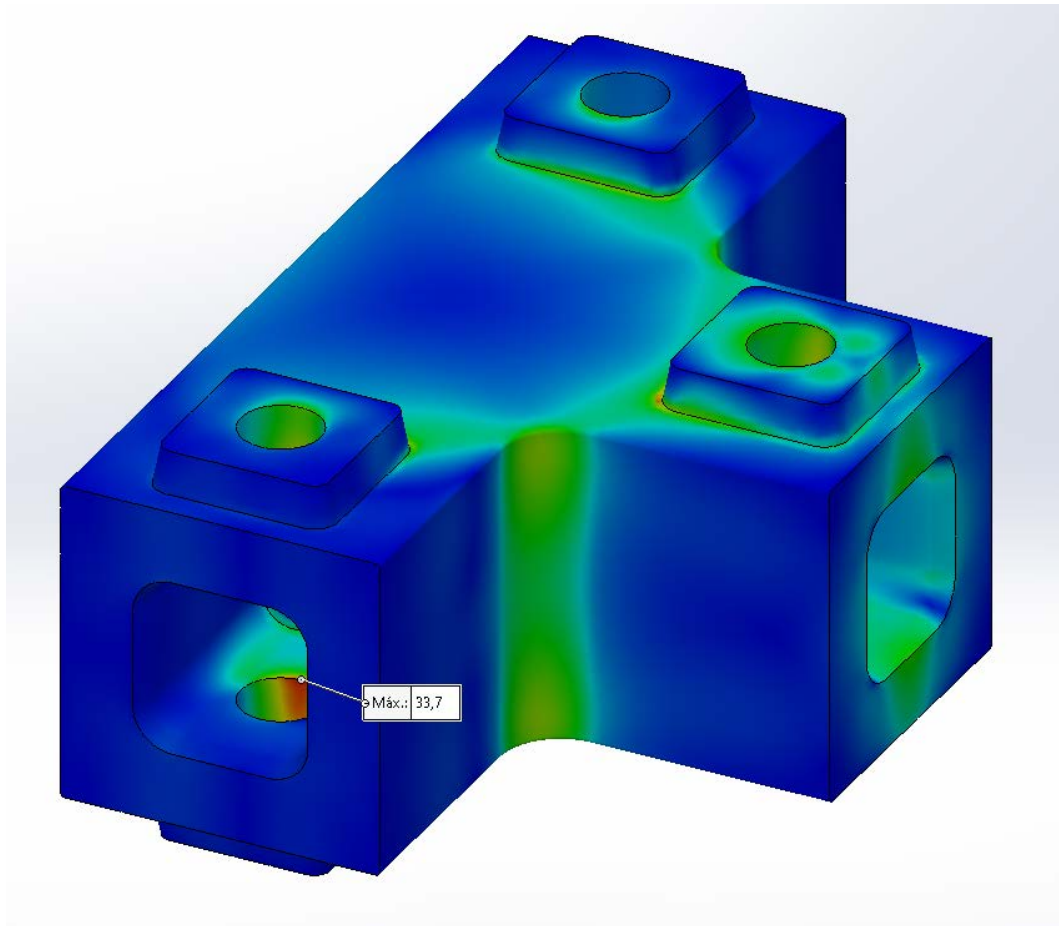


Ilustración 7.6: Campo de tensiones en la Mejora 2.4: Espesor máx. 30mm.

7.2.5. Mejora 2.5: Espesor máximo 35mm.

En esta ocasión el aumento de espesor viene tanto en el general como en el del saliente. Se ha añadido 2,5mm a cada uno, quedando, así, en 22,5mm el general y en 12,5mm en los salientes. Los salientes ahora disponen de un radio de acuerdo con la pieza, para facilitar la impresión y reducir las concentraciones de tensiones. La tensión máxima es de 28,5MPa, valor inferior a los 31,4MPa del límite elástico del PLA. Por ello, asignamos este modelo a dicho material. Como observación, se pueden apreciar tensiones elevadas en el radio de acuerdo anteriormente comentado. A pesar de ello, la tensión máxima sigue apareciendo en los taladros, como en el resto de ocasiones.

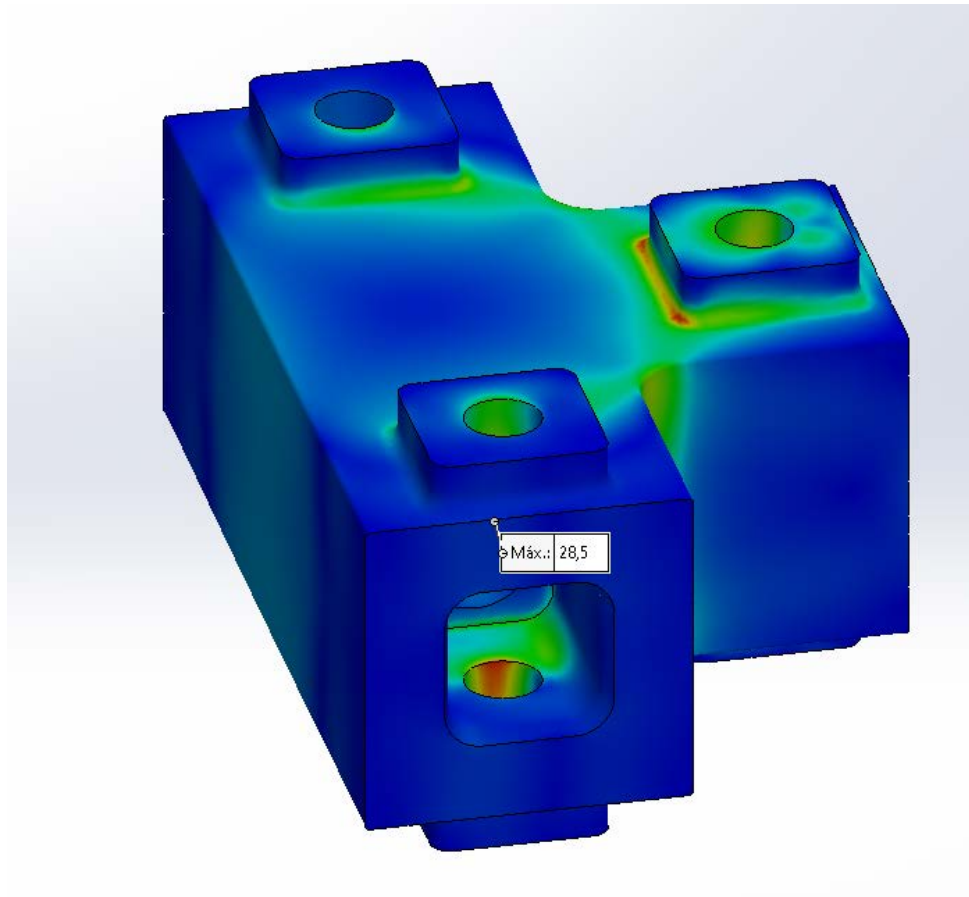


Ilustración 7.7: Campo de tensiones en la Mejora 2.5: Espesor máx. 35mm.

7.2.6. Mejora 2.6: Espesor máximo 37,5mm

Para este modelo se ha aumentado el espesor en 2,5mm en toda la pieza, situándose en 25mm de espesor. Las dimensiones de los salientes se mantienen constantes. La tensión máxima en la simulación es de 24,2MPa. Dicha tensión sigue siendo superior al límite elástico del ABS. Se considera que el espesor necesario para este material es excesivo y se descarta por ello su viabilidad, y con ello el ABS para este proyecto.

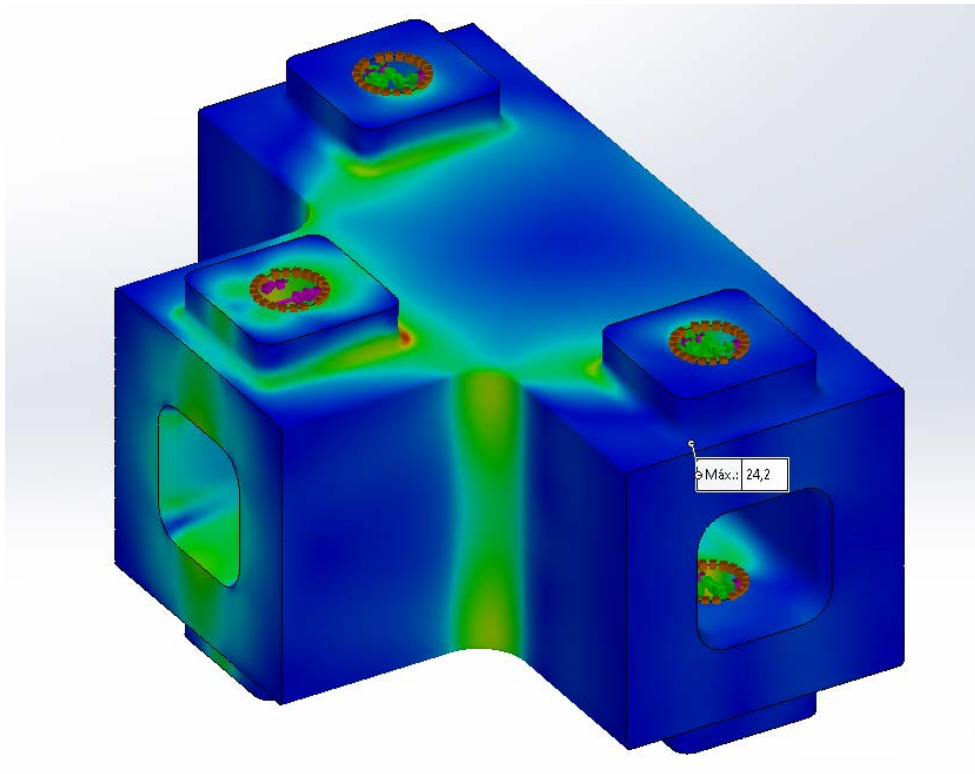


Ilustración 7.8: Campo de tensiones en la Mejora 2.6: Espesor máx. 37,5mm.

7.3. Resumen de modelos según el material.

Como se ha visto, al final se ha llegado a un modelo distinto con diferentes espesores en función de la resistencia de los materiales de nuestro abanico. Como resumen, tenemos los siguientes.

- Ultrafuse: Modelo inicial. Para este material se ha comprobado que el modelo del que partíamos inicialmente es lo suficientemente grueso para resistir las cargas sin problema.

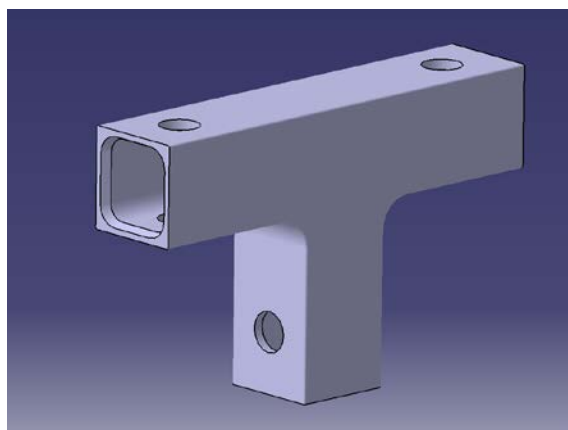


Ilustración 7.9: Modelo asignado al Ultrafuse.

- PLA: Mejora 2.5: Espesor máximo de 35mm. Esta mejora cumple la condición de tensión para el material y es por ello por lo que se le asigna.

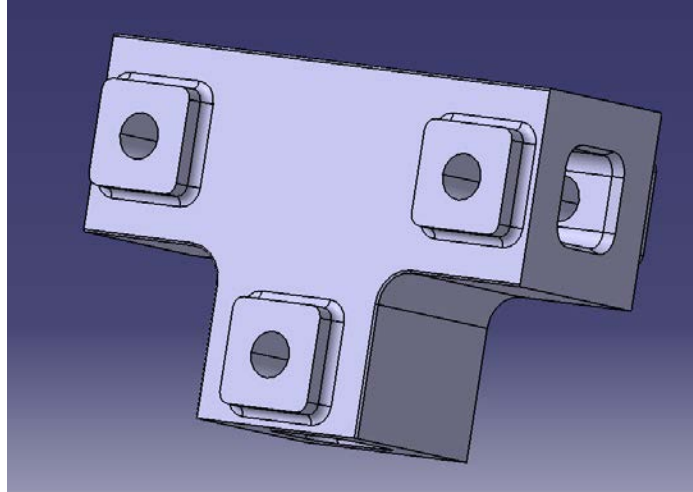


Ilustración 7.10: Modelo asignado al PLA.

- PET CF: Mejora 2.4: Espesor máximo 30mm. Con dicho espesor obtenemos una tensión máxima de 33,7MPa, frente a los 44,3MPa de límite elástico del material.

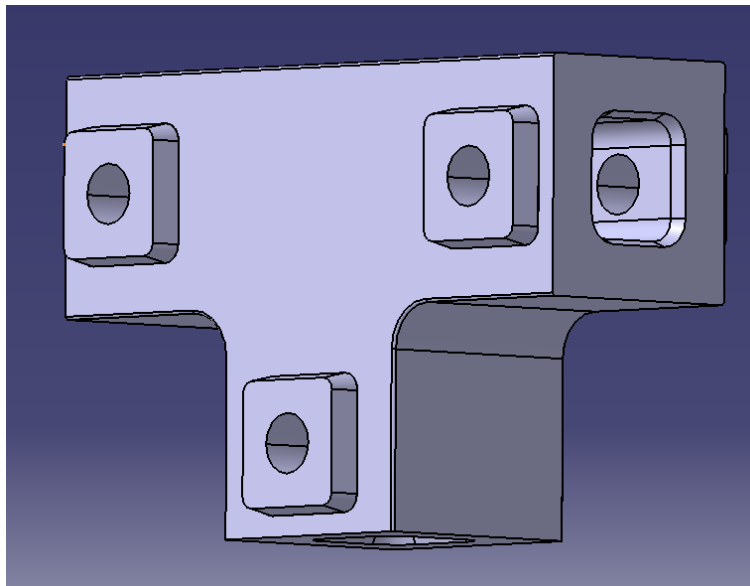


Ilustración 7.11: Modelo asignado al PET CF.

Estos tres modelos son de los que partimos para llevar a cabo la verificación experimental. Más adelante se estudiará la viabilidad a la hora de imprimir y ensayar de cada uno de ellos.

7.4. Evoluciones del modelo fallidas.

Aquí se presentan las capturas de varios intentos de mejorar el comportamiento del modelo frente a las cargas pero que no fueron efectivas.

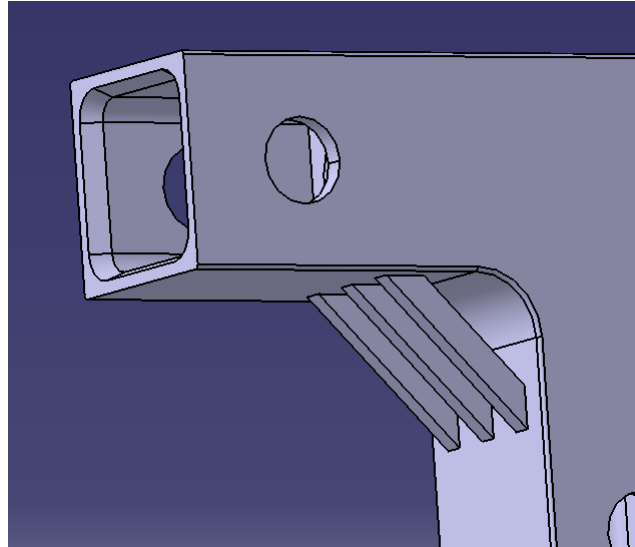


Ilustración 7.12: Mejora fallida número 1.

Como mejora alternativa se plantearon distintos casos donde se intentaban aliviar las tensiones en el radio de acuerdo mediante unos nervios diagonales tal y como se muestran en las ilustraciones. Sin embargo, como hemos visto anteriormente, el problema eran las inmediaciones de los taladros y no los radios de acuerdo de las piezas.

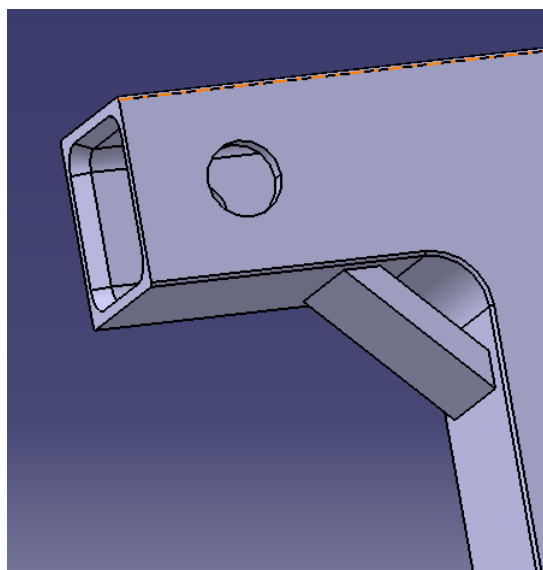


Ilustración 7.13: Mejora fallida número 2.

8. VALIDACIÓN EXPERIMENTAL.

8.1. Obtención de los prototipos.

El proceso de la verificación experimental cobra comienzo con la obtención de los prototipos para ensayarlos posteriormente.

A estas alturas se tienen tres modelos diferentes para los tres materiales de los que se dispone. Sin embargo, la universidad no dispone de los medios necesarios para imprimir estos prototipos y es por ello que se deben imprimir en empresas externas.

Tras ver los resultados arrojados por las simulaciones se plantea la posibilidad de imprimir los prototipos con un relleno por debajo del 100% en la zona del centro, ya que las tensiones en dicha zona son menores y por tanto podría reducirse el empleo de material y de tiempo, con el consiguiente ahorro que supondría para el coste de la pieza. A pesar de ello, el software de simulación (SolidWorks) no permite variar la densidad en una región concreta y, a pesar de que el software de impresión 3D (CURA) sí lo permite, las geometrías que ofrece no coinciden con nuestros intereses para ese caso. Es por ello que se decide hacer maciza en el centro como se había planeado en un inicio.

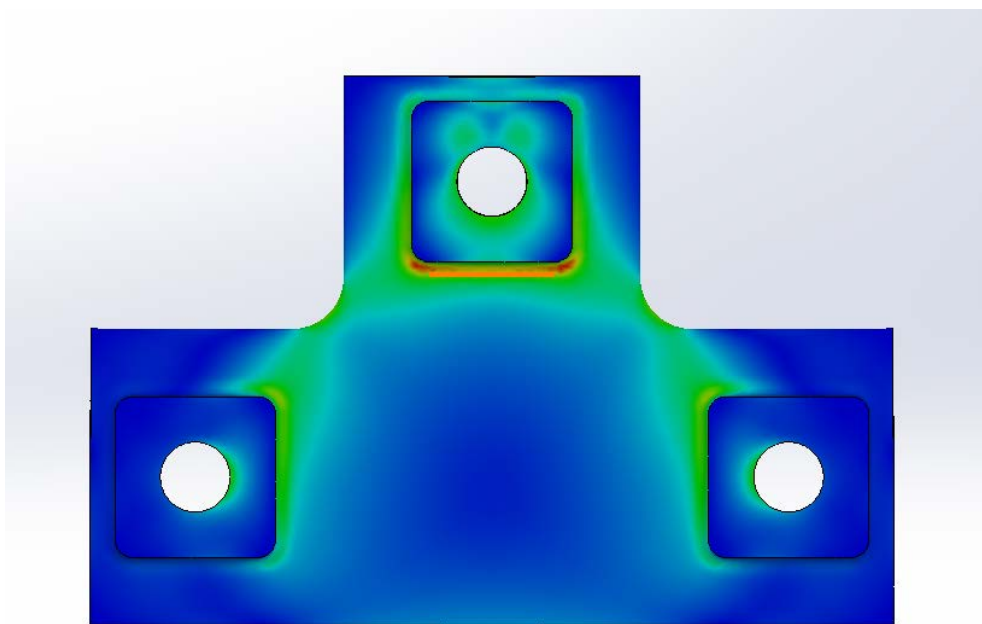


Ilustración 8.1: Campo de tensiones en el modelo de PLA, donde se observa una tensión menor en el área central.

Para la impresión de ultrafuse se contacta con la única empresa que hace este tipo de encargos cerca, pero, debido a que el tamaño de la pieza es mayor a las dimensiones del horno de curado, se prescinde de esta opción en el proyecto.

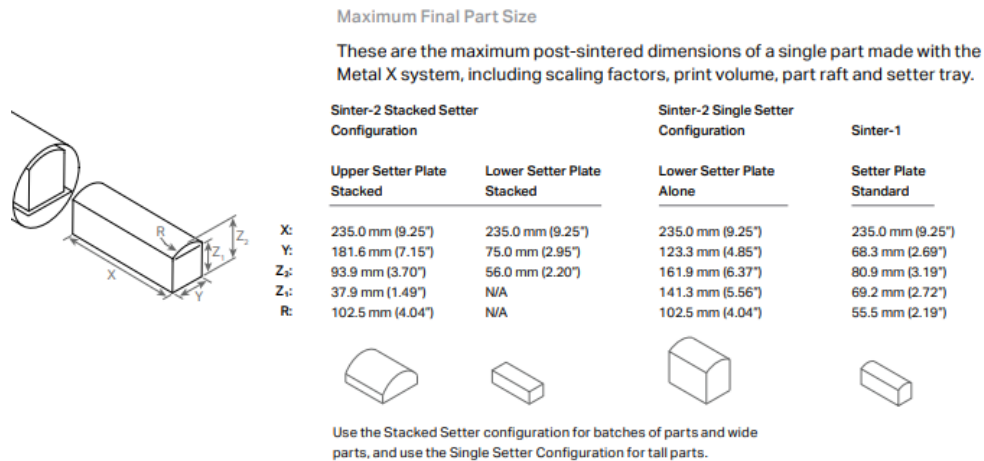


Ilustración 8.2: Medidas del horno de curado de Ultrafuse ofrecidas por la empresa.

Las piezas impresas en plástico se encargan a la empresa Smart Materials 3D, situada en Alcalá la Real (Jaén), que es colaboradora habitual con la Universidad de Jaén y que ha cedido los prototipos para este proyecto debido al interés que genera en la propia empresa, pues los resultados de los ensayos son útiles para verificar las propiedades de su filamento en este tipo de aplicaciones. Se imprimen 3 prototipos en PLA de color negro. El formato es con rejilla a 45° y tienen un peso de 2Kg aproximadamente.

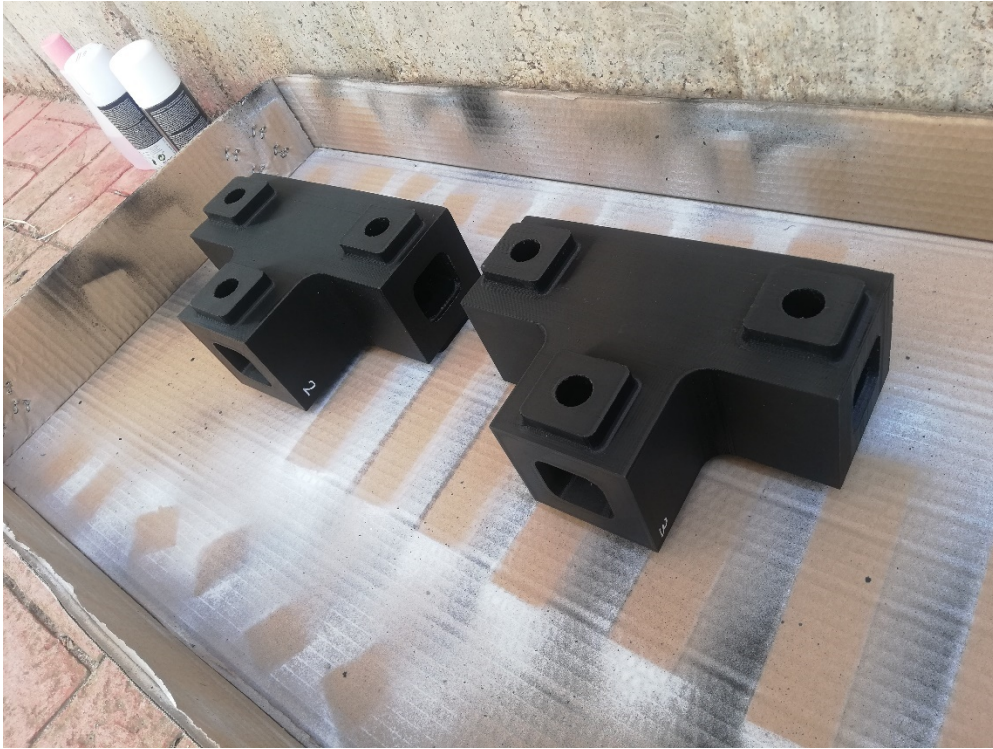


Ilustración 8.3: Imagen de los prototipos 2 y 3 previa a ser pintados.

En el caso del PET CF hubo un problema en cuanto al peso, pues el filamento se fabrica en bobinas de 1Kg y el prototipo tiene un peso de en torno a los 1,73Kg. Es por ello que resulta imposible imprimirlo con la empresa y por tanto se prescinde de este material, resultando finalmente, tres probetas en PLA que serán suficientes para hacer distintos ensayos y sacar resultados del comportamiento de la unión.

PLA

TECHNICAL DATA SHEET VERSION 1.1



PLA

Biodegradable filament and ok for all 3d printers. It is very easy to print as it has no contractions so you can make really big pieces. With our PLA filament you can achieve a fantastic finish and lively colours in all your pieces.

Recyclable
recyclable
recyclableApto para contacto
con alimentos
Food Approved
Aliments approvedBiocompostable
Biocompostable
Biocompostable

		TIPICAL VALUE	UNITS	TEST METHOD	
PHYSICAL PROPERTIES					
Chemical Name		Poly(lactic Acid)			
Material Density		1.24	g/cm ³	ISO 1183	
Glass Transition Temperature		60	°C	D3418	
MECHANICAL PROPERTIES					
Tensile Strength at Break		50	MPa	D882	
Tensile Yield Strength		60	MPa	D882	
Tensile Modulus		3.5	GPa	D882	
Tensile Elongation		6	%	D882	
Notched Charpy Impact		5	KJ/m2	ISO-179-1eA	
Flexural Strength		83	MPa	D790	
Flexural Modulus		3.8	GPa	D790	
THERMAL PROPERTIES					
Heat Distorsion Temperature (0.45 MPa)		55	°C	E2092	
PRINTING PROPERTIES					
Print Temperature		200-240	°C		
Hot Pad		0-60	°C		
Fan Layer		ON (100)	%		
SIZE	NET W.	GROSS W.	DIAMETERS	COLOR	PACKAGING
S	330 g	475 g	1.75 mm	Various colors	SmartBag, security seal, desiccant bag
M	750 g	975 g	1.75 mm/2.85 mm	Various colors	
L	1000 g	1256 g	1.75 mm/2.85 mm	Various colors	

Ilustración 8.4: Características del filamento de PLA de Smart Materials 3D [19]

8.2. Diseño de los útiles de ensayo.

Los ensayos se van a realizar en un banco de tracción-compresión y, dado que las probetas no son normalizadas, sino que son prototipos reales, se deben diseñar los útiles de manera que los ensayos representen con la mayor precisión posible la situación real que queremos simular.

Para el diseño de dichos útiles se parte de las medidas cogidas del propio banco de ensayo, el cual tiene unas mordazas con una apertura máxima de tres cuartos de pulgada (19,05mm). Sin embargo, las medidas que se tomaron fueron erróneas, pues no estaban las mordazas adecuadas instaladas en ese instante y se tomaron 20mm como medida a utilizar para el diseño de los útiles.

En cuanto a geometría se establece una solución con tres útiles: dos de ellos atornillados entre sí (ÚTIL 1 Y ÚTIL 2), y un tercero (ÚTIL 3) en el otro extremo, de manera que el útil que está solo es mordido por una de las mordazas y los otros por son mordidos por la otra mordaza. Cada extremo de los útiles tiene la geometría del tubo estructural para el que está hecha la unión, sin embargo, las medidas son menores, dejando 1mm de margen a cada lado para la correcta inserción en el prototipo, ya que al estar impresa en 3D tiene una rugosidad que podría dificultar un correcto montaje.

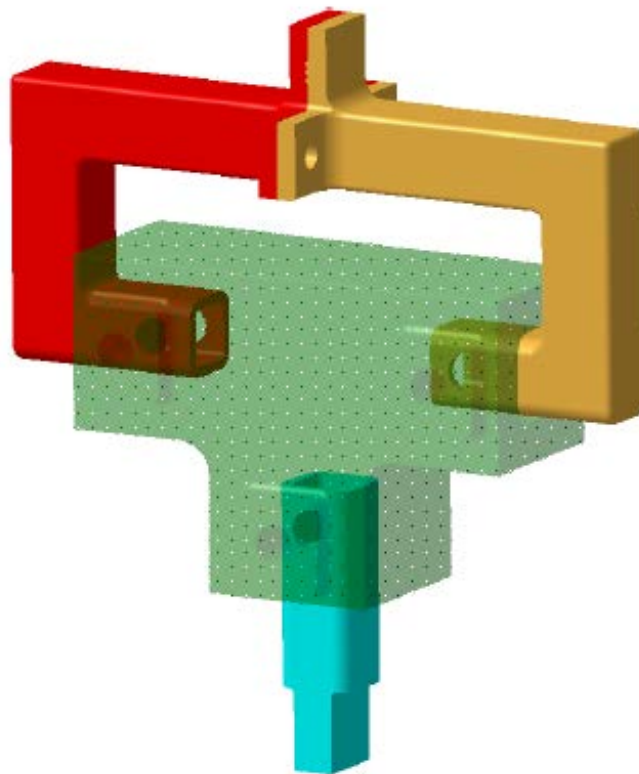


Ilustración 8.5: Vista de la disposición entre el prototipo y los útiles de ensayo.

Los útiles 1 y 2 son mordidos en la zona de unión entre sí por la mordaza. Además, tienen dos pletinas laterales con los taladros necesarios para la fijación. Uno de los requisitos de estos dos útiles era que no deslizasen entre sí y que

conservasen su simetría para que no se produjesen tensiones no deseadas. Para lograrlo se hace un dentado en forma de V invertida, de tal manera que se restringe tanto el deslizamiento vertical como el horizontal. Una de las piezas se realiza con el dentado hacia fuera y la otra con el dentado hacia adentro, de manera que el ajuste sea máximo.

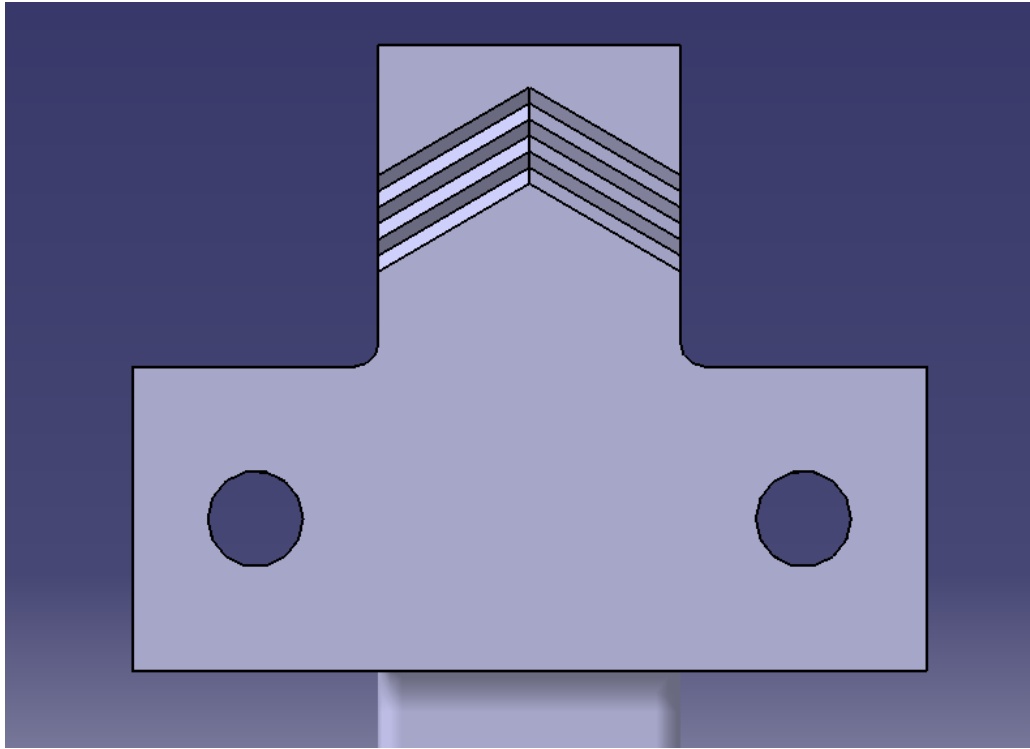


Ilustración 8.6: Detalle de la solución dentada para evitar el deslizamiento.

El útil 3 tiene un ancho de 20mm en la zona de la mordida (debido al error de medida citado anteriormente) y los útiles 1 y 2 disponen de 10mm cada uno, de manera que la suma de ambos es también 20mm.

En cuanto al interior de los útiles cabe destacar que, exceptuando una longitud de 32mm, son de acero macizo en su totalidad, para asegurar una rigidez mucho mayor a la de la pieza a ensayar y, así, aplicar las cargas con mayor precisión sin que se produzcan deformaciones en los útiles que introduzcan ruido a los resultados. La zona hueca se sitúa desde un poco antes de los taladros para introducir los tornillos del prototipo hasta el extremo, como se puede observar en la ilustración 7.6.

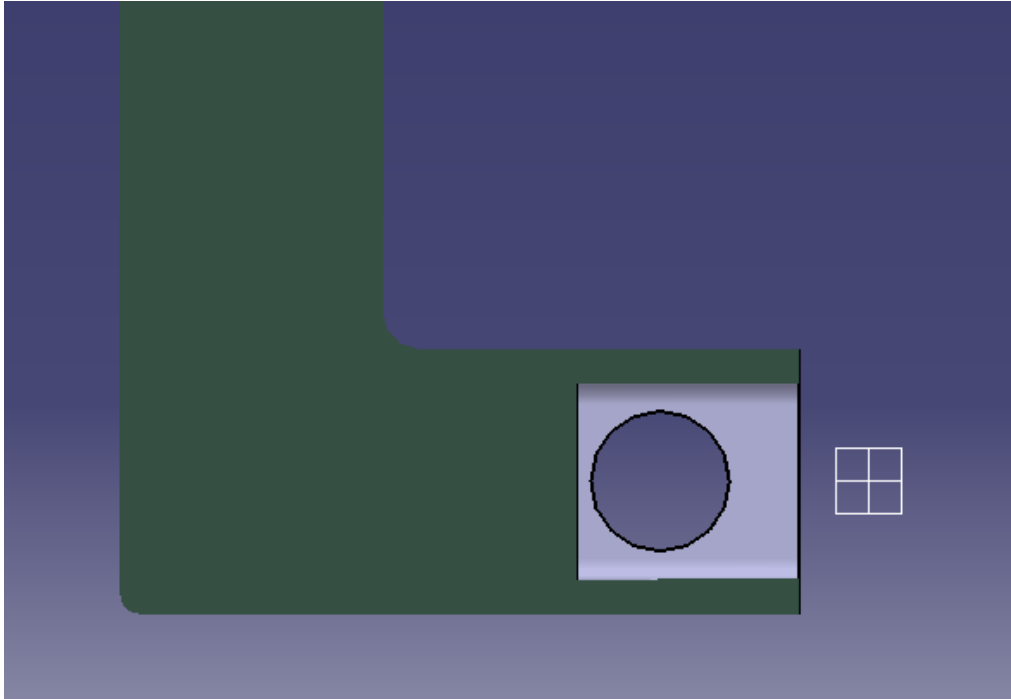


Ilustración 8.7: Detalle de la zona hueca en los útiles.

El útil 3 tiene una geometría similar, simulando las barras en un extremo, y con una zona plana para poder ser mordida.

Los útiles tienen un margen en el interior de la pieza, de manera que no se introducen hasta el fondo del prototipo y, así, crear una holgura que permita centrar de manera sencilla los agujeros para los tornillos que unen la pieza y los útiles.

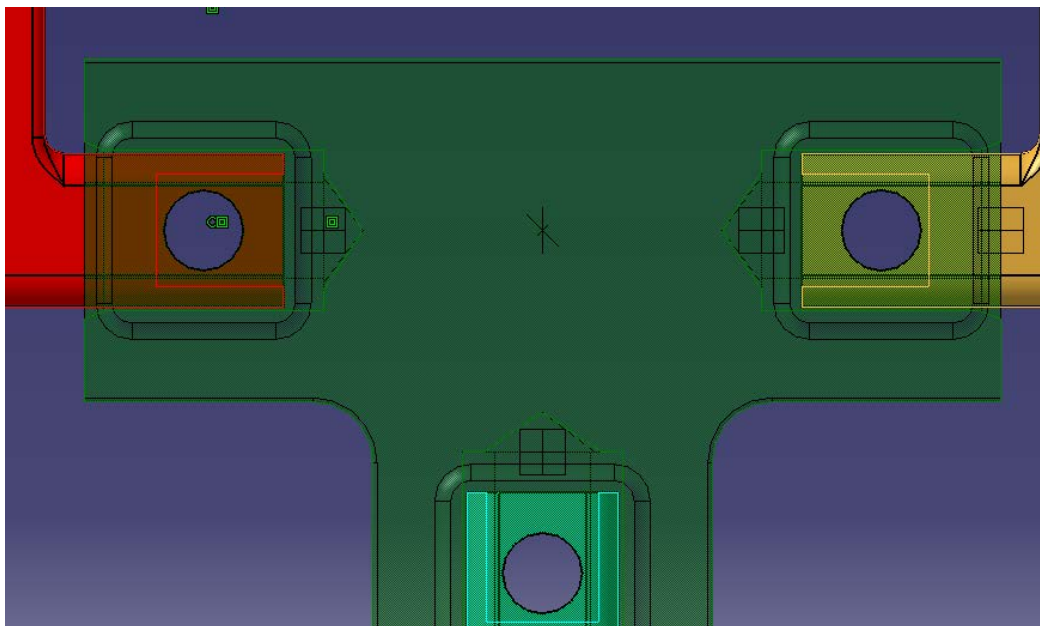


Ilustración 8.8: Detalle holgura de los útiles.

Los útiles se fabrican en la empresa Ingeniería Maquinaria y Control, S.L. situada en Albolote (Granada). Son de acero y se someten a un fresado mediante CNC y las pletinas que sirven para los tornillos de unión entre los útiles se sueldan posteriormente.



Ilustración 8.9: Útil 1 mecanizado.

El útil 3 es más simple y se puede realizar en su totalidad mecanizado con el CNC. La disposición de los mismos puede verse en la ilustración 7.9.



Ilustración 8.10: Útiles acabados y en disposición similar a la de trabajo.

8.3. Preparación de los prototipos y montaje en el banco.

Antes de realizar los ensayos es preciso realizar una serie de pasos previos. En primer lugar, se hace una medición de los prototipos, por si hubiese ligeras variaciones con respecto a los modelos CAD, en cuyo caso nos permitiría establecer una relación entre dicha variación y un posible desajuste entre los resultados de las simulaciones y los obtenidos en el banco de ensayo.

Una vez medidos los prototipos, se procede a pintarlos con una pintura que contraste con su color (en este caso, como son negros, se pintan de blanco).

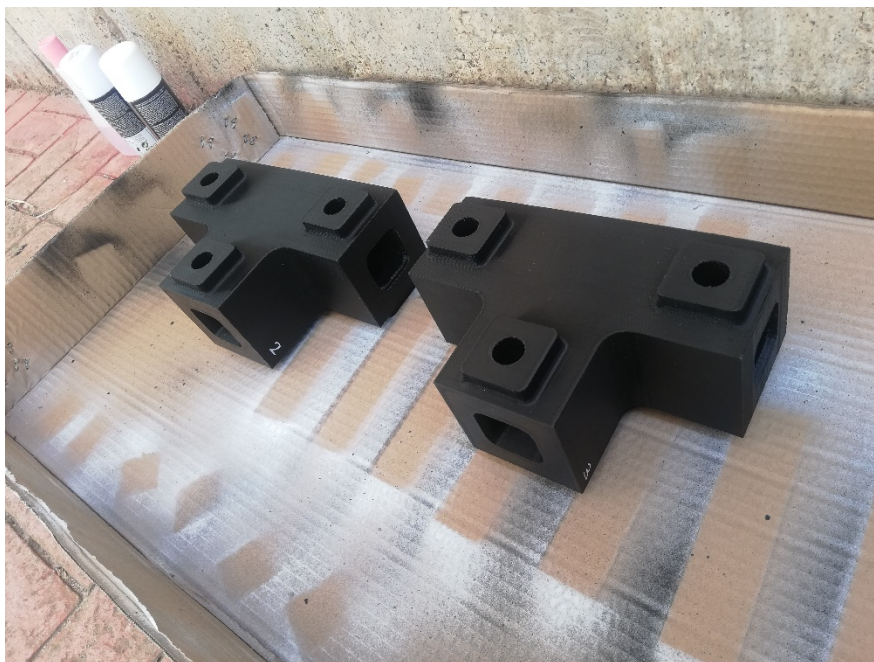


Ilustración 8.11: Prototipos 2 y 3 previos a ser pintados.

El acabado que debemos conseguir es un moteado fino para que a la hora de procesar los resultados mediante la correlación digital de imágenes tengamos un contraste alto entre píxeles colindantes.



Ilustración 8.12: Prototipo tras el moteado.

El tiempo ideal entre el pintado y el ensayo es de unos 20 minutos, ya que con la pintura demasiado fresca podrían surgir brillos innecesarios en el DIC y complicar el postprocesado y con una espera excesiva podría perderse el contraste que ofrece la pintura cuando aún no está muy seca.

Mientras la pieza se seca, se prepara el banco de ensayo y se coloca la cámara que obtendrá las fotografías que posteriormente se procesen. Dichas imágenes se obtienen mediante el software Basler y se programa para hacer una captura por segundo y así poder trabajar con las imágenes de manera más precisa. Para la preparación del banco se colocan las mordazas óptimas (las de mayor tamaño en este caso). Como ya se comentó anteriormente, la medida que se tomó de las mismas fue errónea y por tanto los útiles no caben en el hueco de las mordazas. Llegado a este punto, se llevan los útiles al taller de mecanizado de la Escuela y se rebajan los bordes 1mm por cada lado, para mantener la simetría. En total, el grosor pasa de 20mm a 18mm, estando así, por debajo de los 19mm que ofrecen las mandíbulas de apertura máxima.

Para el acople de la pieza a los útiles y al banco se utilizan tornillos M16 de acero de alta resistencia, para evitar la flexión de los mismos y garantizar la rigidez a

la hora de la transmisión de esfuerzos, evitando errores en la obtención de resultados.

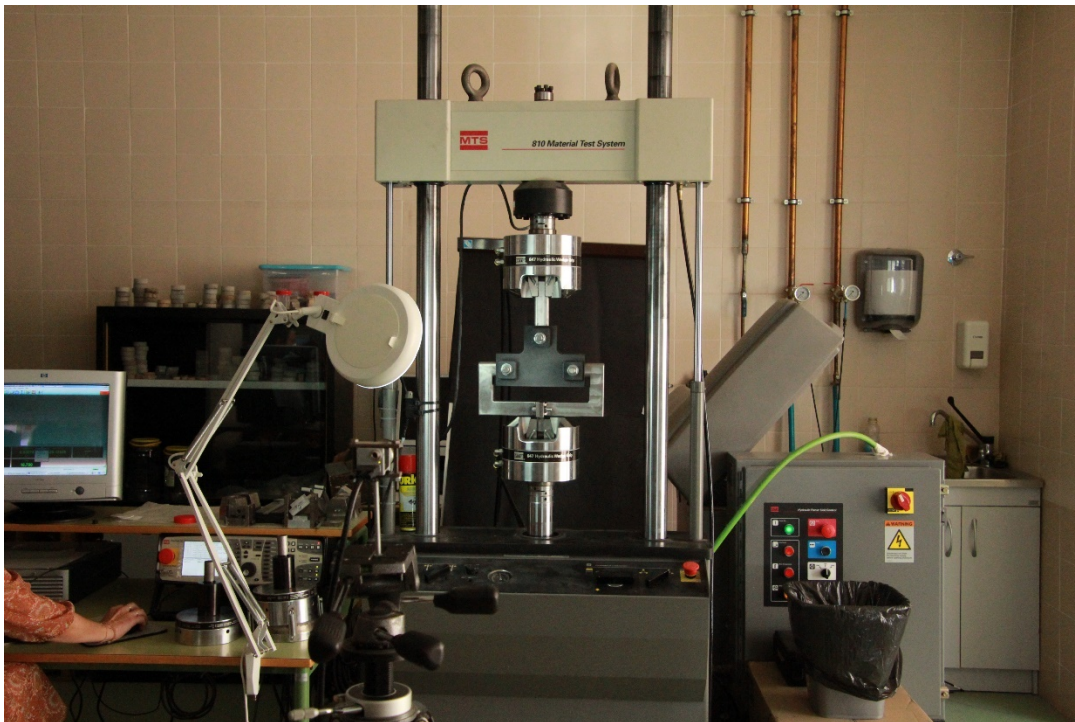


Ilustración 8.13: Vista general del equipo de ensayo, incluyendo el banco de ensayo, la cámara de alta resolución y el prototipo colocado para ser ensayado.

En cuanto al banco de ensayo, se dispone de un 810 Material Test System, capaz de alcanzar una carga de 100KN gracias a su sistema hidráulico.

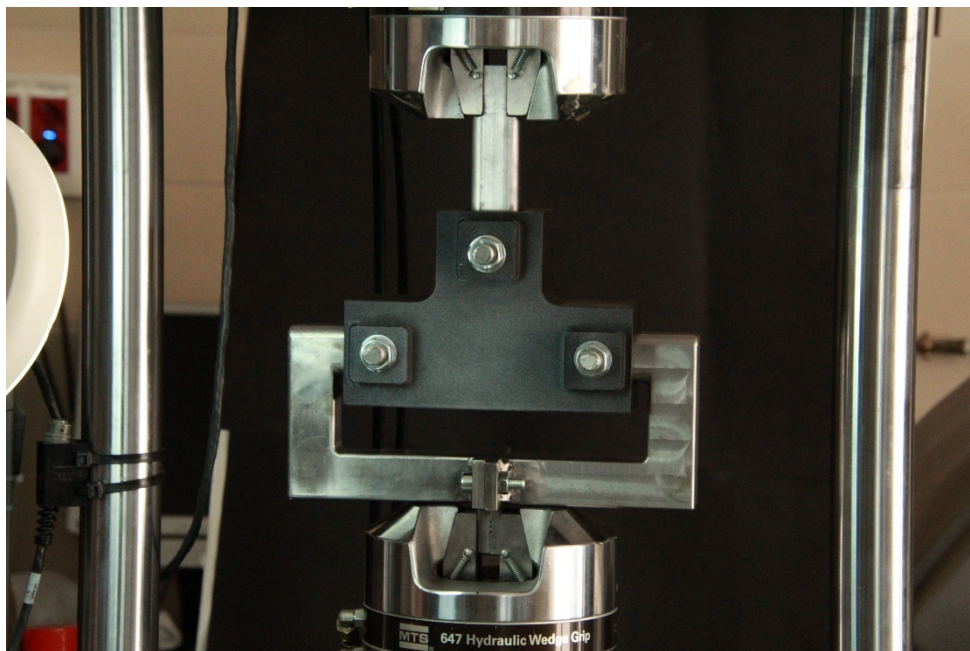


Ilustración 8.14: Detalle del prototipo y los útiles montados en el banco de ensayo.

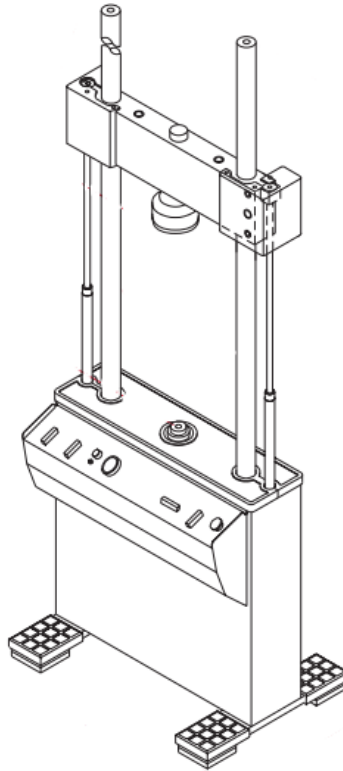


Ilustración 8.15: Esquema del banco de ensayo [20].

8.4. Ensayo de los prototipos.

Tras los procedimientos previos realizados y todo preparado para los ensayos, se procede a hacer las pruebas a las probetas a distinto régimen de carga.



Ilustración 8.16: Ajuste de los tornillos de la pieza a los útiles.

8.4.1. Prototipo 1: Ensayo elástico a compresión.

Como partida se hace un ensayo no destructivo y en régimen elástico a la probeta. Se establece un máximo de carga en torno a los 15KN, que supone algo más de la tercera parte de los 38KN de carga que se espera que resista el prototipo. La aplicación de la carga se hace mediante el desplazamiento del puente a razón de 1mm/min y los datos son tomados cada segundo.

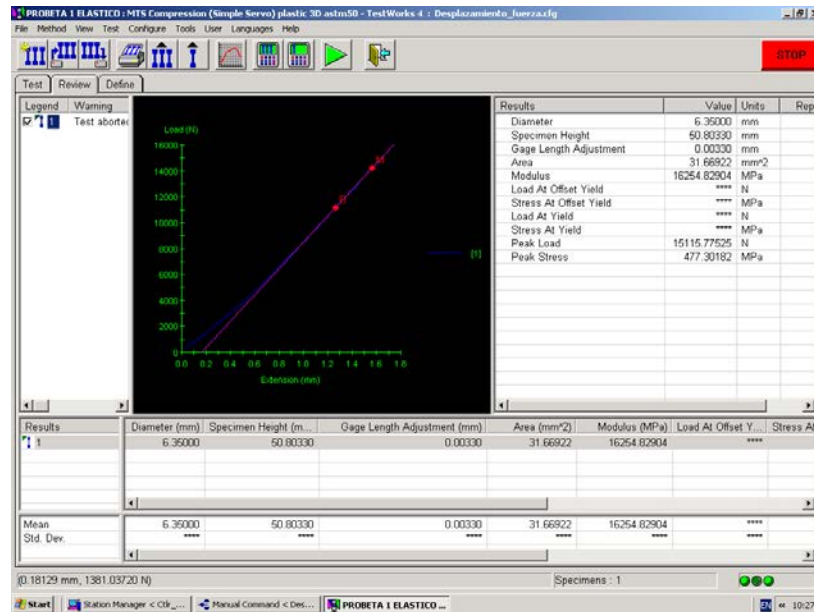


Ilustración 8.17: Gráfica y datos obtenidos del software del banco de ensayo para Prototipo 1: Ensayo elástico a compresión.

8.4.2. Prototipo 1: Ensayo a rotura por compresión.

En este ensayo la pieza se carga con las mismas características que el ensayo anterior, pero sin parar hasta la rotura del prototipo. La carga máxima registrada es de 40582N, carga que está ligeramente por encima de la carga de diseño. La pieza falla por separación en las capas de impresión, que son perpendiculares a la carga.

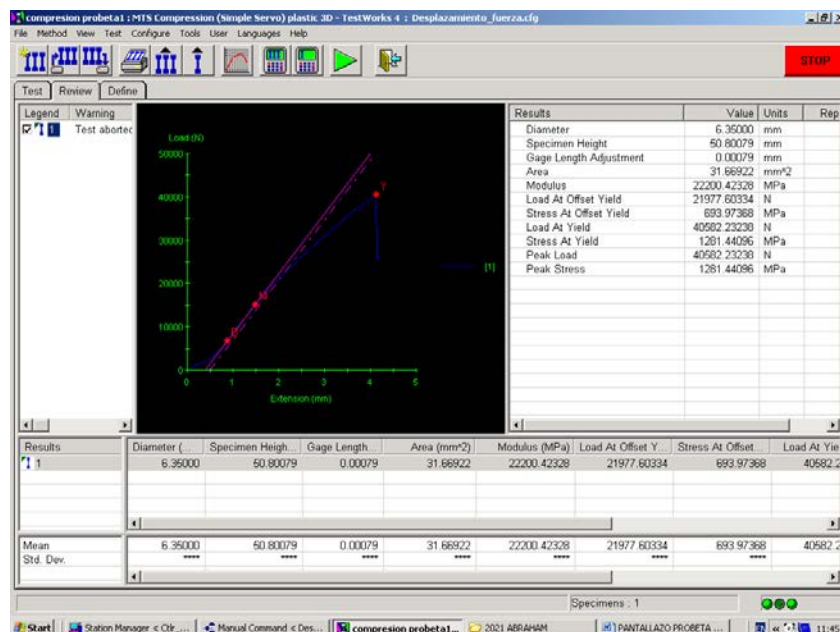


Ilustración 8.18: Gráfica y datos obtenidos del software del banco de ensayo para Prototipo 1: Ensayo a rotura por compresión.

8.4.3. Prototipo 2: Ensayo elástico a compresión.

Este ensayo es similar al ensayo elástico del primer prototipo. Se realiza para tener datos concluyentes sobre la rigidez de los prototipos. En la gráfica del software se puede apreciar un escalón. Esto se puede deber al asentamiento de los útiles y la pieza además de a un asentamiento entre las capas de impresión.

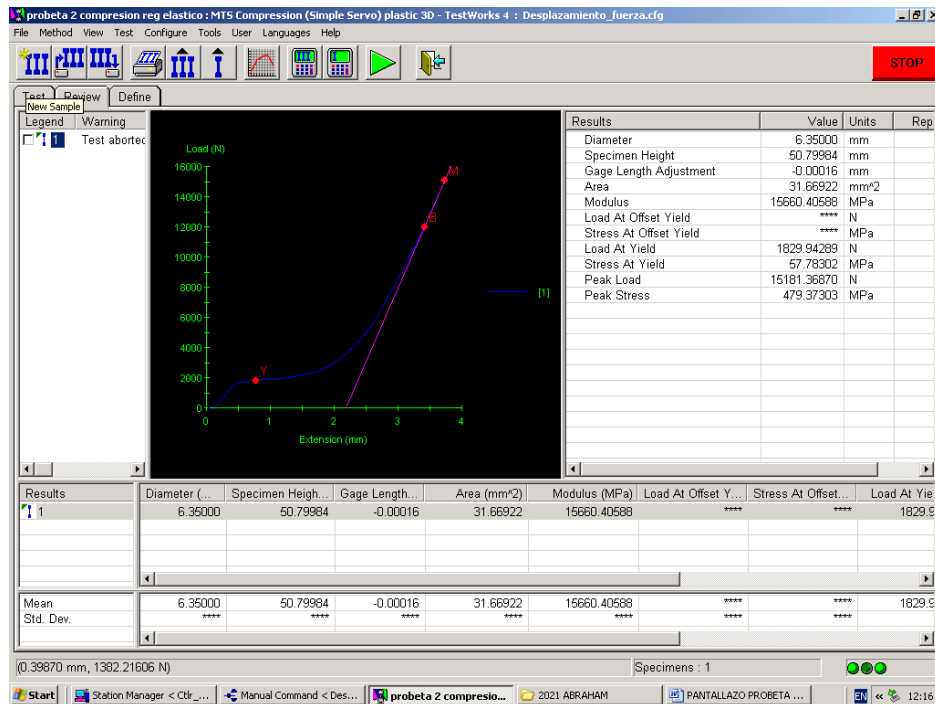


Ilustración 8.19: Gráfica y datos obtenidos del software del banco de ensayo para Prototipo 2: Ensayo elástico a compresión.

8.4.4. Prototipo 2: Ensayo elástico a tracción.

A esta segunda pieza se le hace un ensayo elástico a tracción para determinar su comportamiento. En este caso, la carga máxima aplicada es de unos 10KN debido al mal comportamiento a tracción que presentan las piezas impresas con las capas en dirección perpendicular a la carga, ya que éstas podrían separarse súbitamente y provocar la rotura de la pieza. Las condiciones de carga vuelven a ser similares.

8.4.5. Prototipo 2: Ensayo a rotura por tracción.

Visto el buen resultado obtenido en la anterior probeta, se plantea un ensayo a rotura por tracción, ya que los resultados podrían ser de utilidad. El prototipo se rompe a los 20539N, menos de la mitad que en el ensayo a compresión. Sin embargo, no es de extrañar, ya que anteriormente se ha mencionado el mal

comportamiento a tracción en las piezas de estas características de impresión. La pieza colapsa, como estaba previsto, en la zona de menor sección, que se encuentra en uno de los taladros.

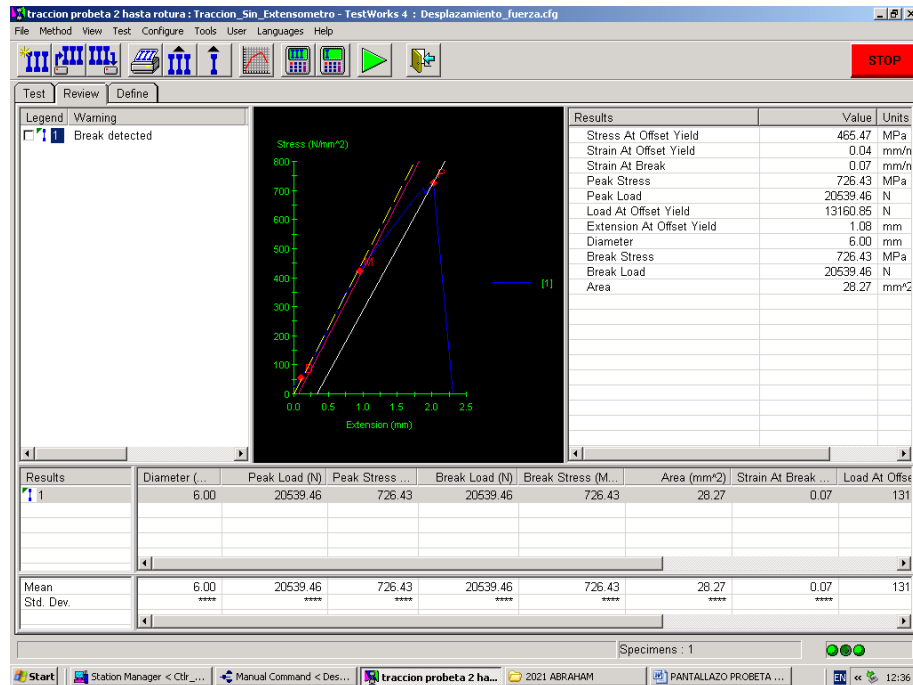


Ilustración 8.20: Gráfica y datos obtenidos del software del banco de ensayo para Prototipo 2: Ensayo a rotura por tracción.

El prototipo 3 se considera que es de interés mantenerlo íntegro para futuras investigaciones, ya que en un principio se contaba sólo con 1 y se han realizado los ensayos necesarios para obtener los datos oportunos.

8.5. Postprocesado de imágenes.

Tras finalizar los ensayos se dispone, por un lado, un archivo de texto extraído del software del banco de ensayo que arroja los datos de carga, tiempo, o desplazamiento del puente, entre otros; y, por otro lado, se dispone de una serie de imágenes que se han ido capturando con la cámara de alta resolución.

El siguiente paso que se debe hacer es procesar dichas fotos con el programa de correlación digital de imágenes VIC 2D. De éste se van a extraer los datos necesarios para poder comparar el comportamiento en los ensayos con el de las simulaciones previas, además de obtener la rigidez de los modelos.

Para ello, en primer lugar, se delimita la región que se va a estudiar; en este caso, la parte maciza de la pieza en su zona central. Los datos a comparar serán el desplazamiento vertical del punto central inferior de la región.

Una vez introducidas las imágenes y procesadas con el software se obtiene el mapa de desplazamientos verticales, así como una gráfica del desplazamiento vertical del punto central inferior respecto al paso de las imágenes, que corresponden a una por segundo, y de la que se extraerá un archivo de datos.

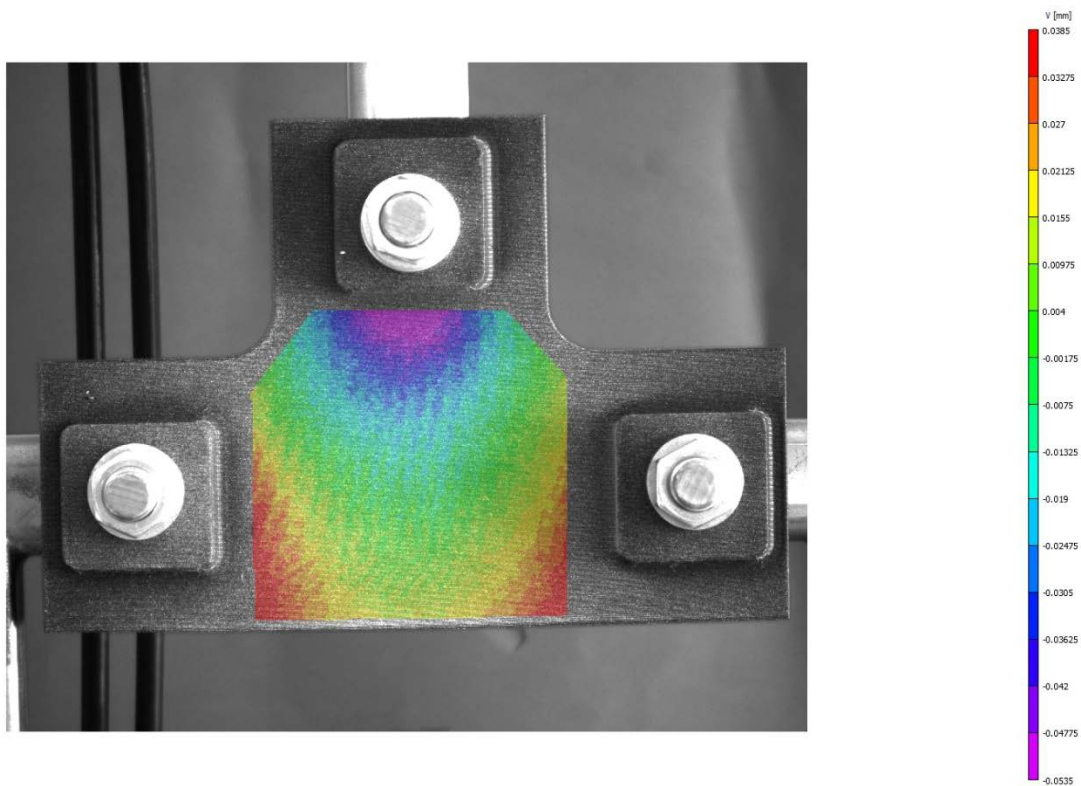


Ilustración 8.21: Mapa de desplazamiento vertical en Prototipo 1: Ensayo elástico a compresión.

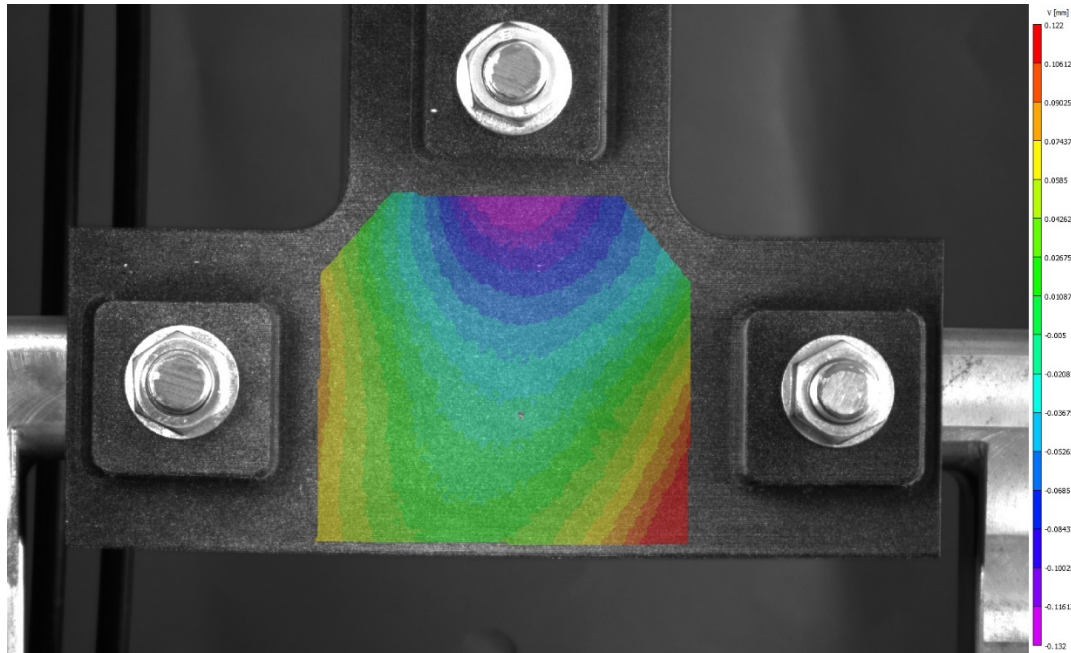


Ilustración 8.22: Mapa de desplazamiento vertical en Prototipo 1: Ensayo a rotura por compresión (justo antes de romper).

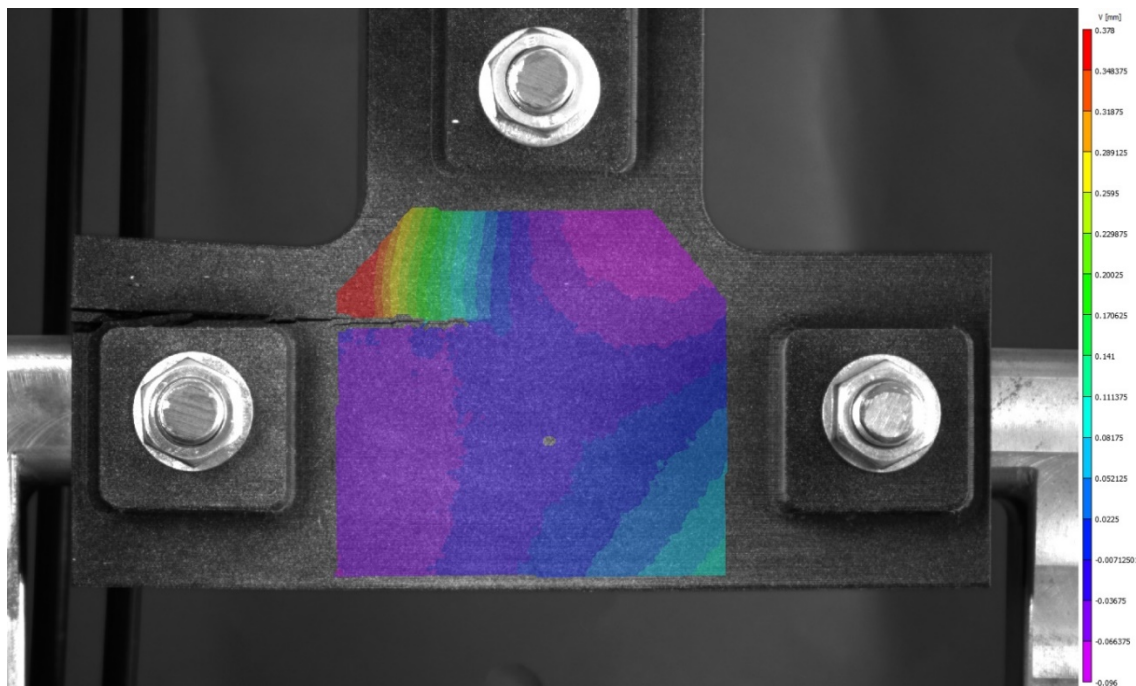


Ilustración 8.23: Mapa de desplazamiento vertical en Prototipo 1: Ensayo a rotura por compresión.

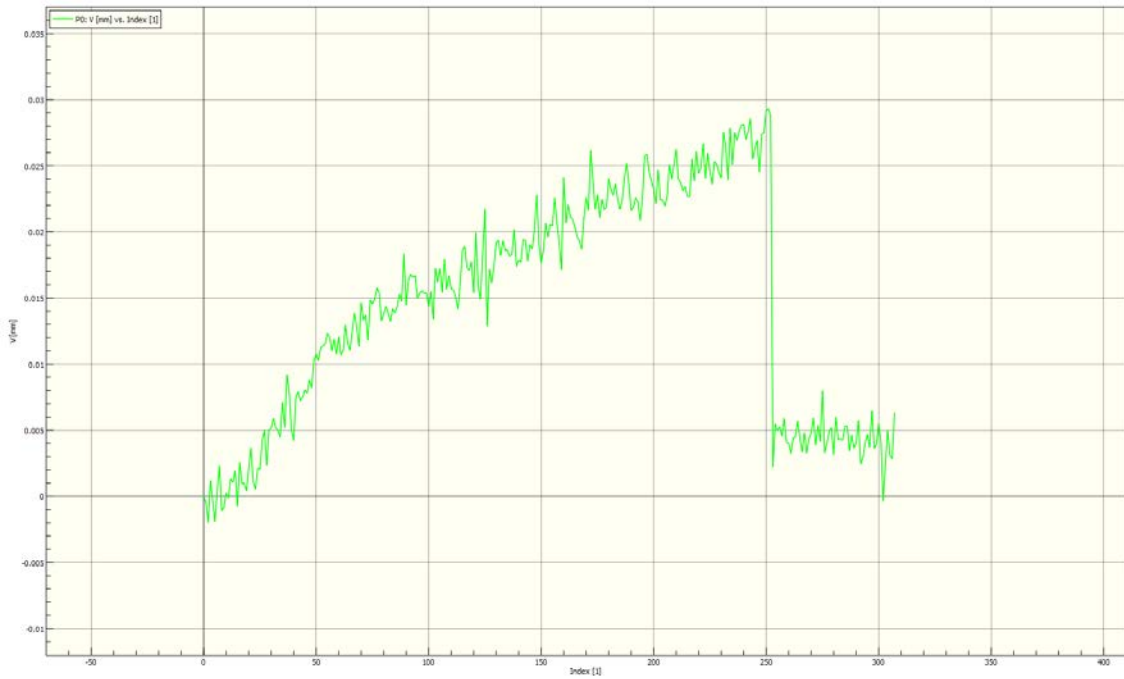


Ilustración 8.24: Gráfica de desplazamiento vertical frente a imágenes en Prototipo 1: Ensayo a rotura por compresión.

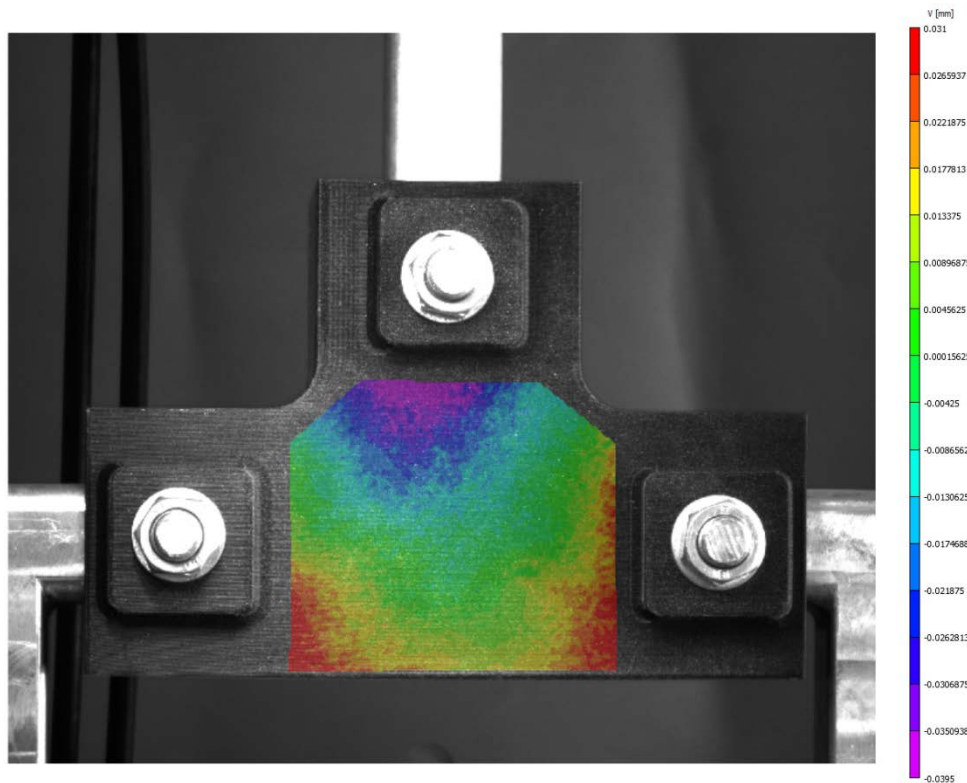


Ilustración 8.25: Mapa de desplazamiento vertical en Prototipo 2: Ensayo elástico a compresión.

Del ensayo a tracción elástico del prototipo 2 se obtienen unos datos con mucho ruido, pero gracias al postprocesado se consigue un refinamiento notable de esos datos.

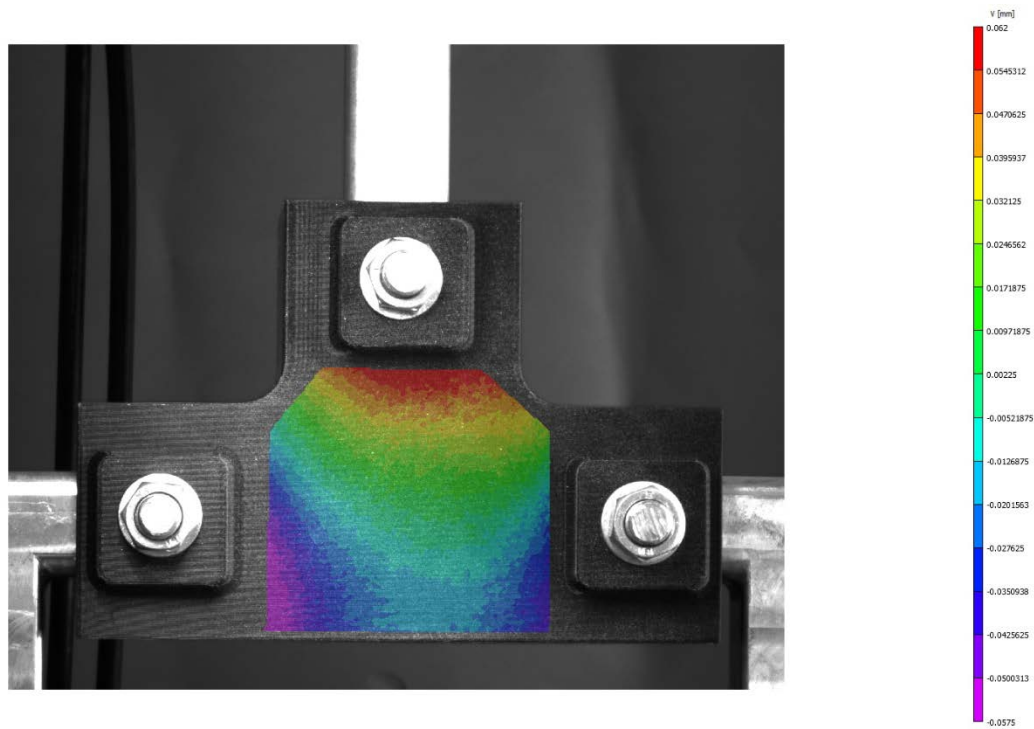


Ilustración 8.26: Mapa de desplazamiento vertical en Prototipo 2: Ensayo elástico a tracción.



Ilustración 8.27: Gráfica de desplazamiento vertical frente a imágenes en Prototipo 2: Ensayo elástico a tracción. En verde los datos sin refinar. En rojo los datos tras el postprocesado.

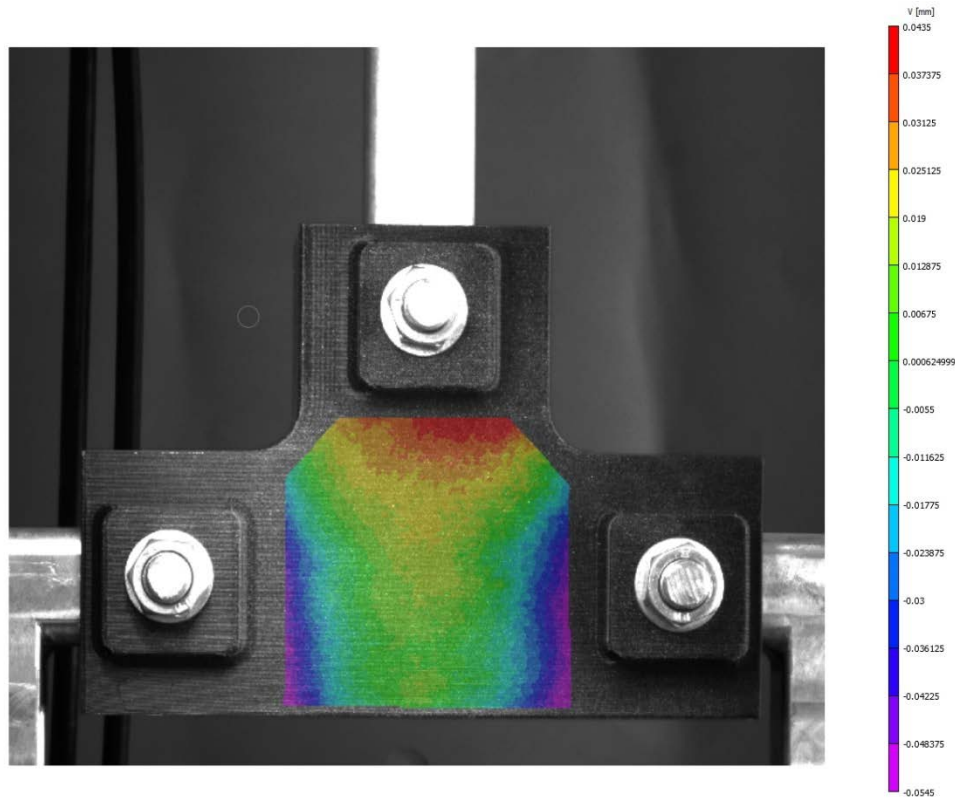


Ilustración 8.28: Mapa de desplazamiento vertical en Prototipo 2: Ensayo a rotura por tracción (justo antes de romper).



Ilustración 8.29: Gráfica de desplazamiento vertical frente a imágenes en Prototipo 2: Ensayo a rotura por tracción.

9. EXTRACCIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.

En este apartado se van a poner los resultados extraídos de las anteriores gráficas, así como comparativas entre las simulaciones y los ensayos.

9.1. Comparativa de los mapas de desplazamiento.

Para una comparativa más visual, se pueden observar las imágenes del campo de desplazamiento vertical, tanto en la simulación como en el postprocesado experimental. A continuación, se muestran una serie de comparativas entre los mapas de desplazamiento obtenidos mediante DIC en los ensayos y su respectiva simulación en SolidWorks.

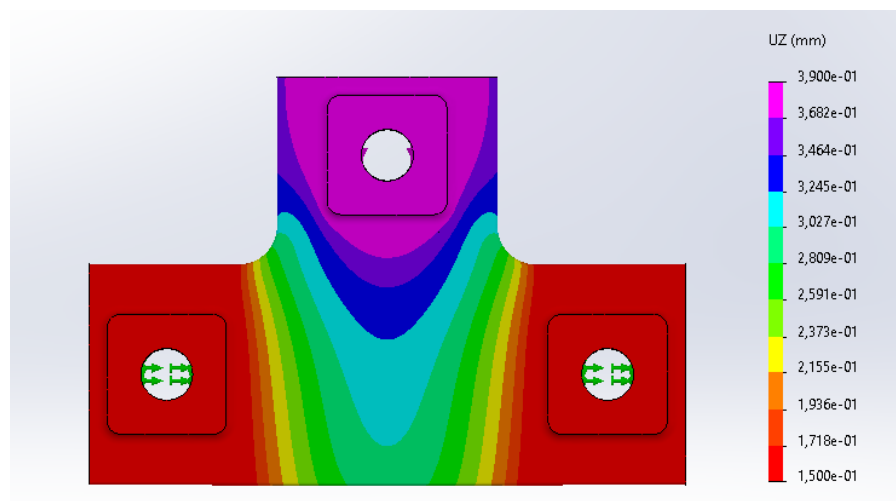


Ilustración 9.1: Mapa de desplazamiento vertical extraído de SolidWorks para 41,75KN a compresión.

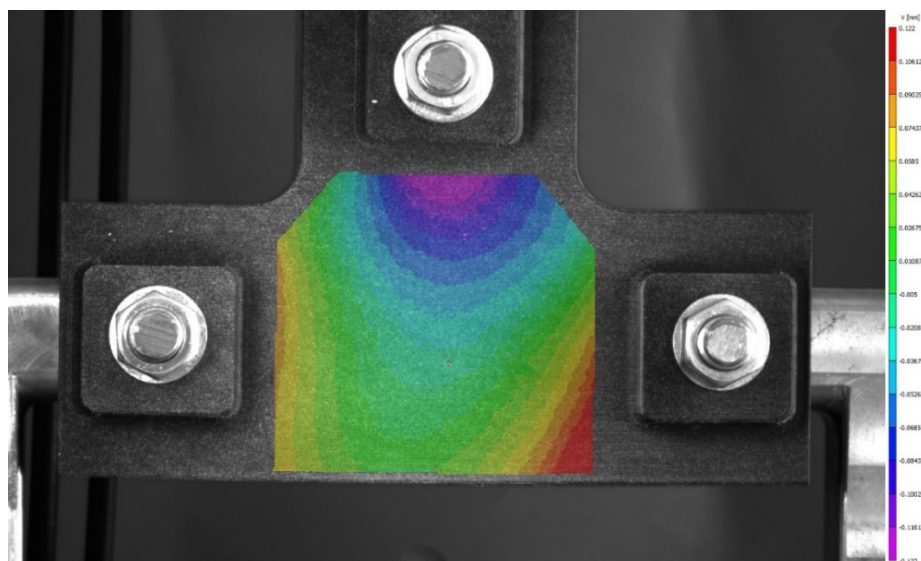


Ilustración 9.2: Mapa de desplazamiento vertical en Prototipo 1: Ensayo a rotura por compresión (justo antes de romper).

Se puede observar que la diferencia entre el desplazamiento máximo y mínimo registrados en la zona a comparar, que queda delimitada por el mapa obtenido en el DIC, ronda los 0,25mm en ambos casos.

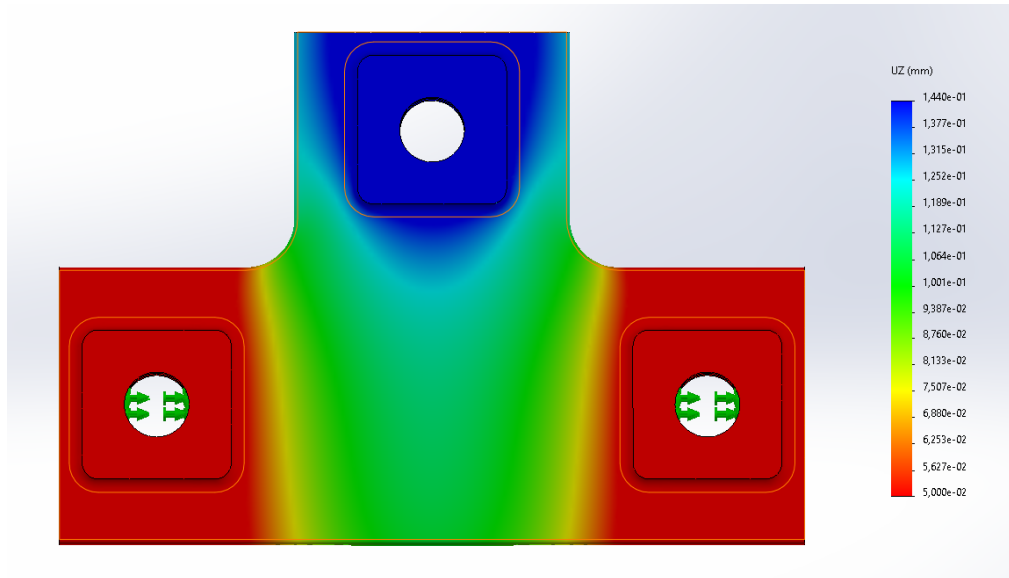


Ilustración 9.3: Mapa de desplazamiento vertical extraído de SolidWorks para 15KN a compresión.

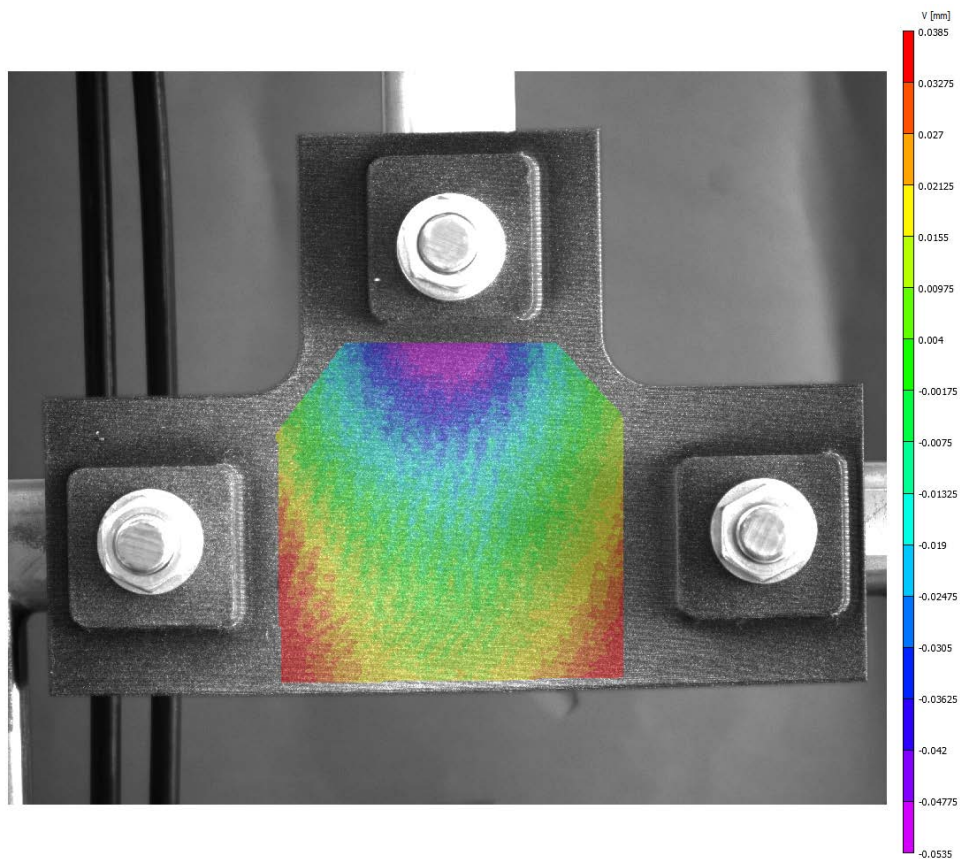


Ilustración 9.4: Mapa de desplazamiento vertical en Prototipo 1: Ensayo elástico a compresión.

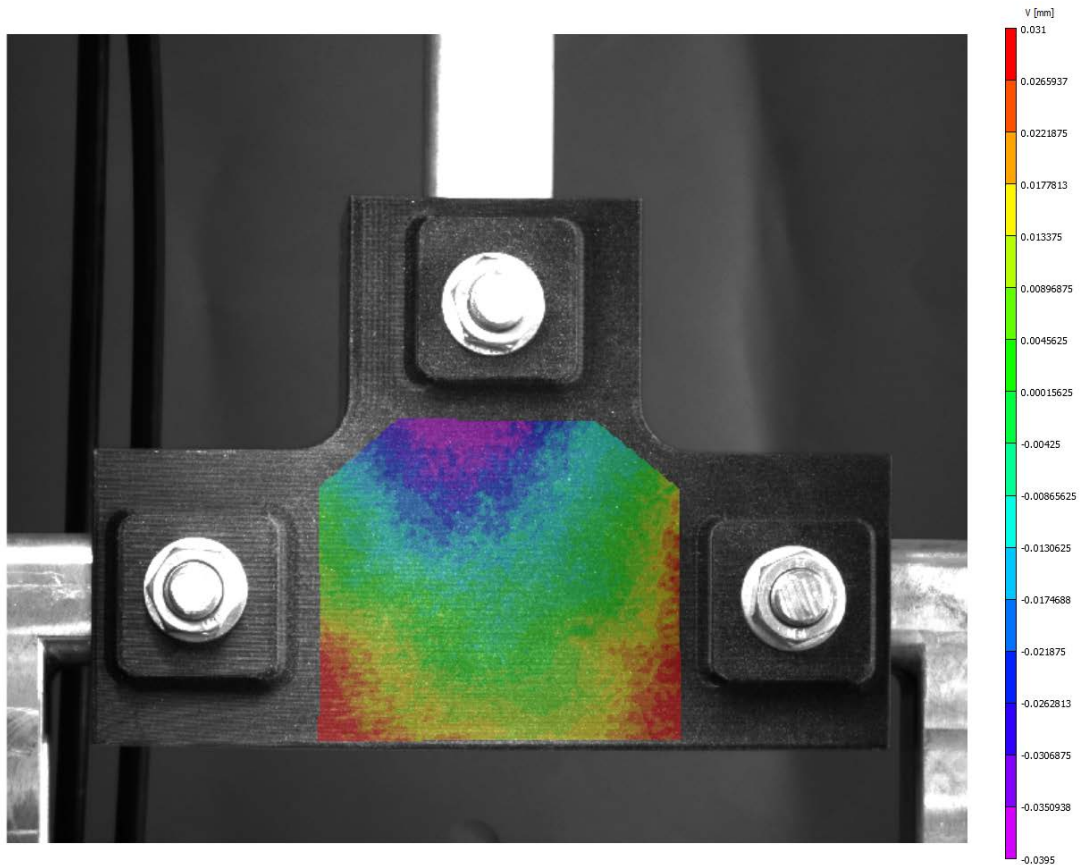


Ilustración 9.5: Mapa de desplazamiento vertical en Prototipo 2: Ensayo elástico a compresión.

Si comparamos estos mapas, observamos nuevamente una diferencia similar entre los valores máximos y mínimos en los desplazamientos de la región (en torno a los 0,09mm). En este caso, los valores máximos y mínimos mostrados en la leyenda de la simulación, se encuentran en puntos en el exterior de la región a comparar y es por ello que hay que fijarse en qué valores tomar. Los valores del prototipo 2 son algo distintos a los del prototipo 1, resultando en una menor diferencia de valores máximo y mínimo en torno a 0,07mm), pero rondando, aun así, valores cercanos.

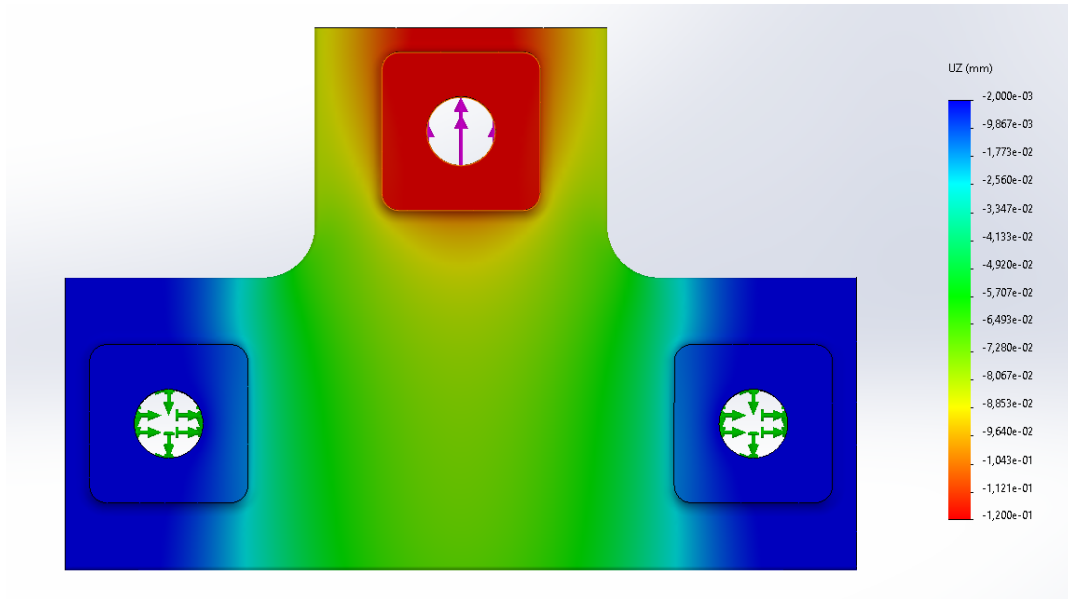


Ilustración 9.6: Mapa de desplazamiento vertical extraído de SolidWorks para 10KN a tracción.

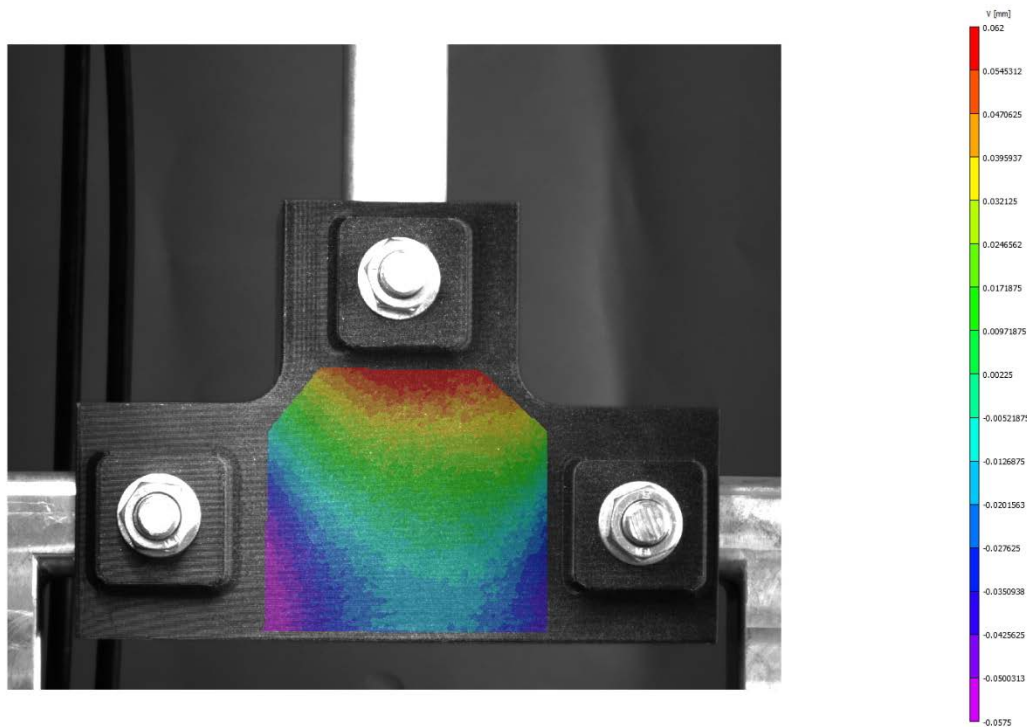


Ilustración 9.7: Mapa de desplazamiento vertical en Prototipo 2: Ensayo elástico a tracción.

En esta comparación se vuelve a observar una similitud entre la diferencia de valores máximos y mínimos que se presentan dentro de la región (0,12mm aproximadamente).

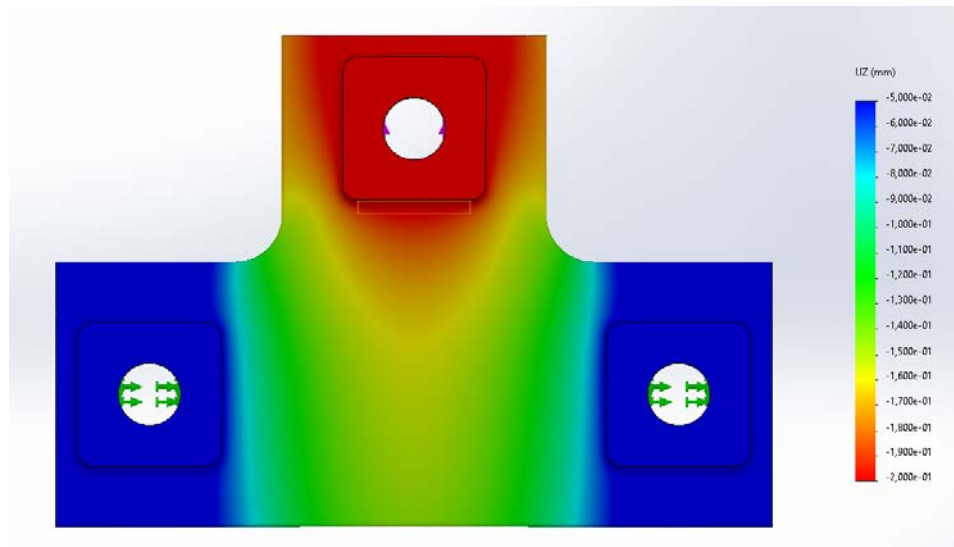


Ilustración 9.8: Mapa de desplazamiento vertical extraído de SolidWorks para 20,5KN a tracción.

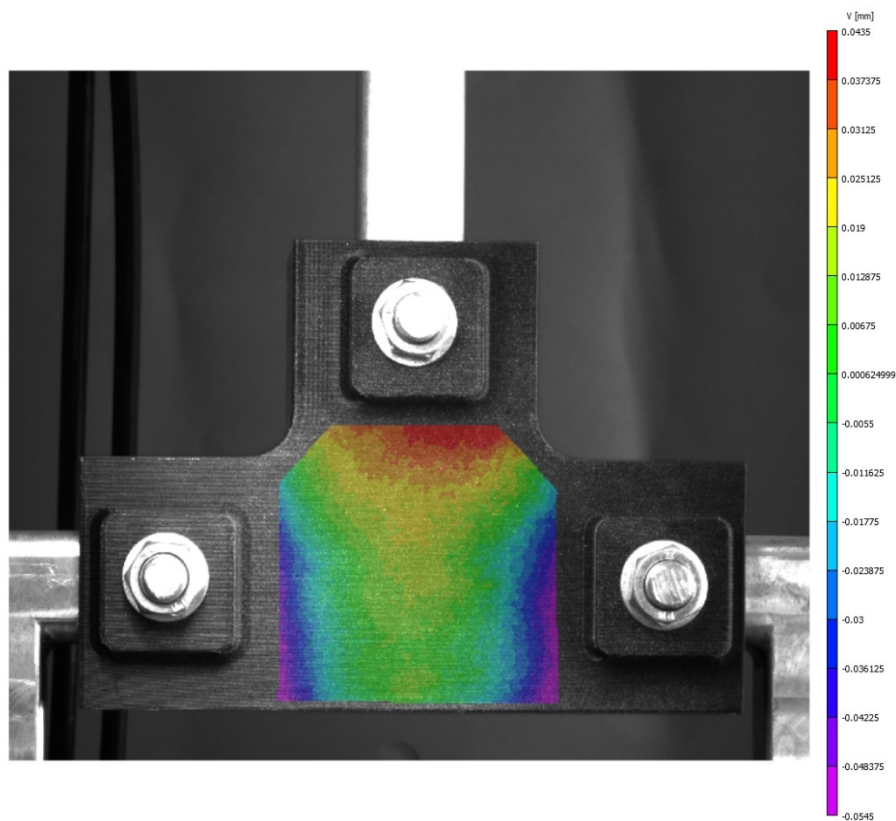


Ilustración 9.9: Mapa de desplazamiento vertical en Prototipo 2: Ensayo a rotura por tracción.

Para finalizar estas comparativas, volvemos a encontrar relación entre los valores que estamos comparando, resultando en una diferencia de 0,09mm entre valores extremos en la zona de estudio.

Por último, en todas ellas se observa la forma de las líneas de isodesplazamiento, las cuales son simétricas respecto al eje Z (eje vertical), tal y como se había previsto antes de los ensayos y simulaciones, ya que al tener el modelo una geometría simétrica en dicho eje y, a su vez, aplicar cargas simétricas sobre tal mismo eje, se esperaba un comportamiento simétrico.

9.2. Resistencia.

Referido a las cargas, el modelo se diseñó para una carga de 38KN, y se ha verificado que cumple con dicho requisito al obtener una carga máxima a compresión en el ensayo de 40582N. Atendiendo a la comparativa omitida en cuanto al ensayo de rotura por tracción, no se ha visto de utilidad debido a la naturaleza débil que presentan las probetas impresas en 3D con las capas perpendiculares a la aplicación de la carga. Dicha característica se manifiesta en los datos de carga obtenidos en el ensayo, con un máximo de 20539N, que resulta muy por debajo de la carga que presenta el prototipo en el ensayo a compresión.

Se ha hablado de la carga de diseño, pero hasta ahora no se había expuesto la carga máxima ofrecida por la simulación, ya que el límite elástico del material quedaba ligeramente por encima de la tensión máxima registrada en las simulaciones a 38KN. En una serie de simulaciones realizadas por tanteo (ya que es la única posibilidad que ofrece el software para este fin), se concluye que la carga máxima del modelo es de 41,75KN, carga que se aproxima mucho a la obtenida en el ensayo de rotura por compresión. En la ilustración 8.10 se puede observar cómo la tensión máxima coincide con el límite elástico del material, concluyéndose, así, que la pieza en la simulación resiste una carga de 41,75KN.

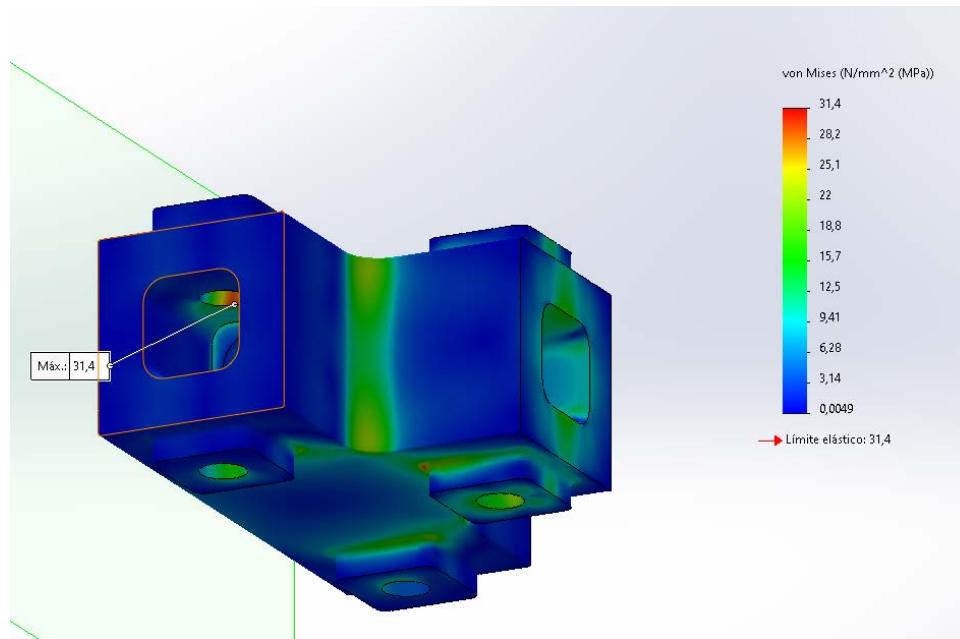


Ilustración 9.10: Mapa de tensiones en el modelo para una carga de 41,75KN.

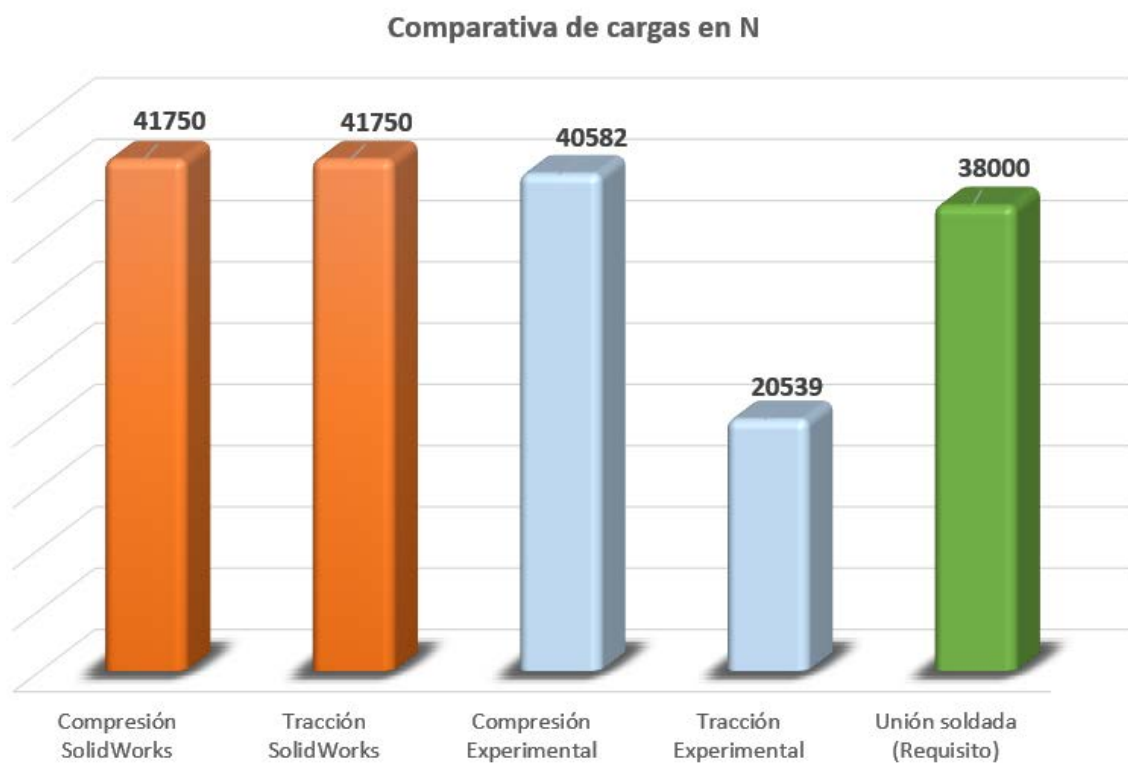


Ilustración 9.11: Gráfico comparativo de las distintas cargas.

9.3. Obtención de los valores de rigidez.

Los valores de rigidez pueden obtenerse a partir de los datos experimentales y del postprocesado. Para ello se ha de unir en una misma gráfica los valores de fuerza extraídos del software del banco de ensayo con los datos de desplazamiento vertical obtenidos del postprocesado en VIC 2D.

Tras procesar los datos y obtener las gráficas, mediante una línea de tendencia en la parte lineal se puede obtener el valor de la rigidez con la ecuación de la recta, ya que la rigidez representa la pendiente de dicha recta.

Las gráficas de los distintos ensayos son las que se muestran a continuación.

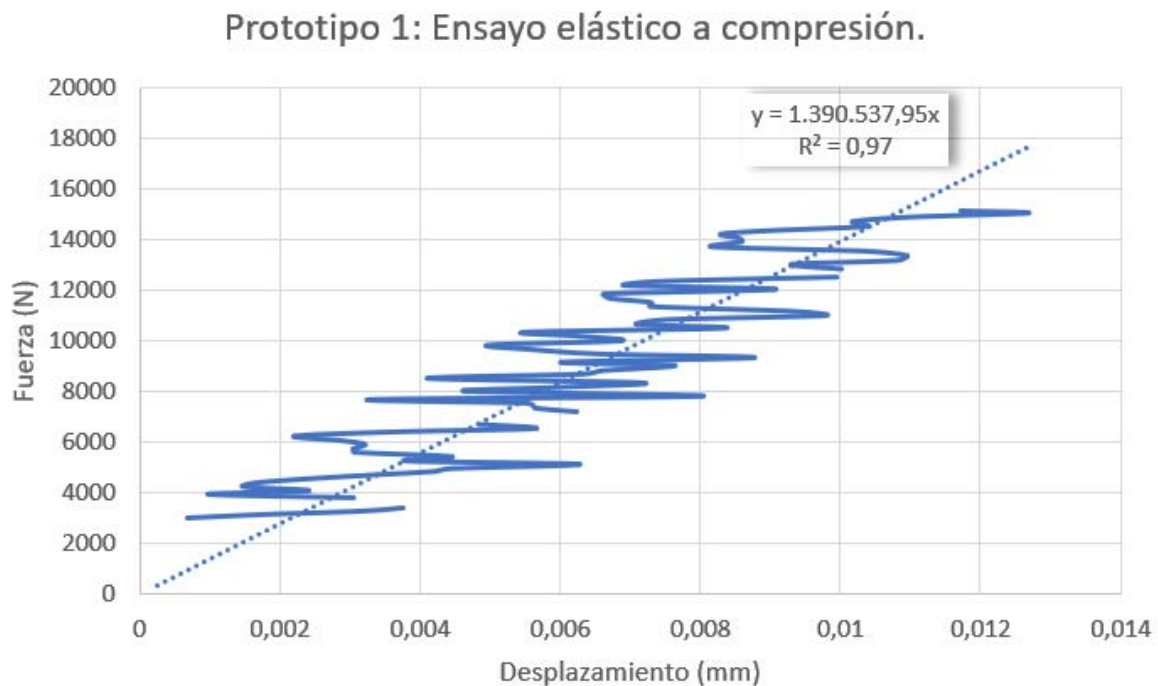


Ilustración 9.12: Gráfica Fuerza-Desplazamiento del ensayo Prototipo 1: Ensayo elástico a compresión.

En el ensayo a rotura por compresión del primer prototipo se observa una zona de ruido inicial antes de iniciar la parte elástica lineal. Es por ello que la rigidez se extrae de dicha parte lineal de la gráfica del ensayo.

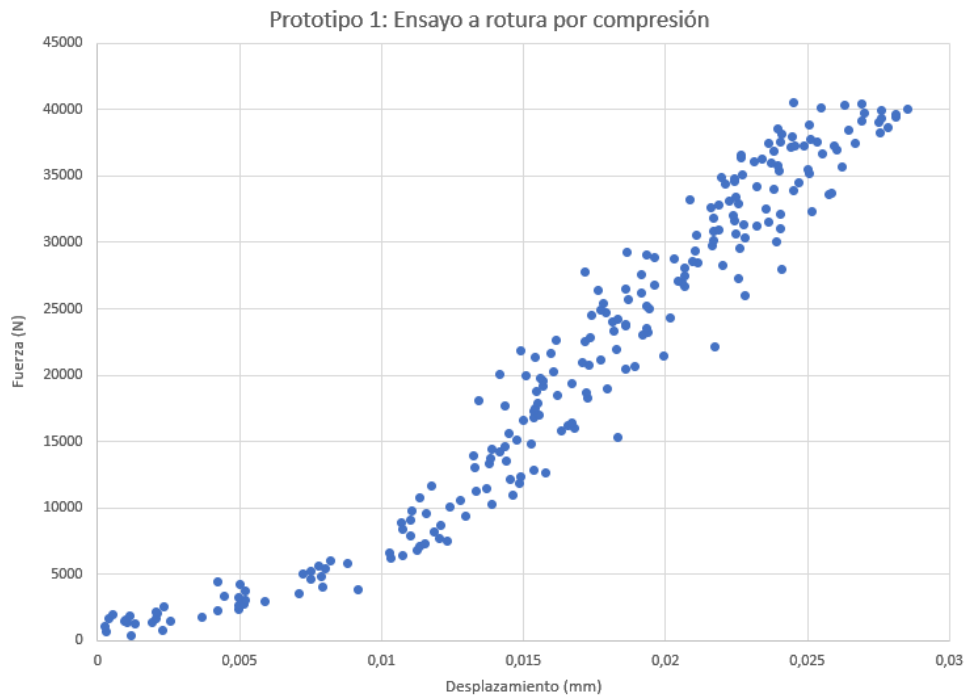


Ilustración 9.13: Gráfica Fuerza-Desplazamiento del ensayo Prototipo 1: Ensayo a rotura por compresión (completo).

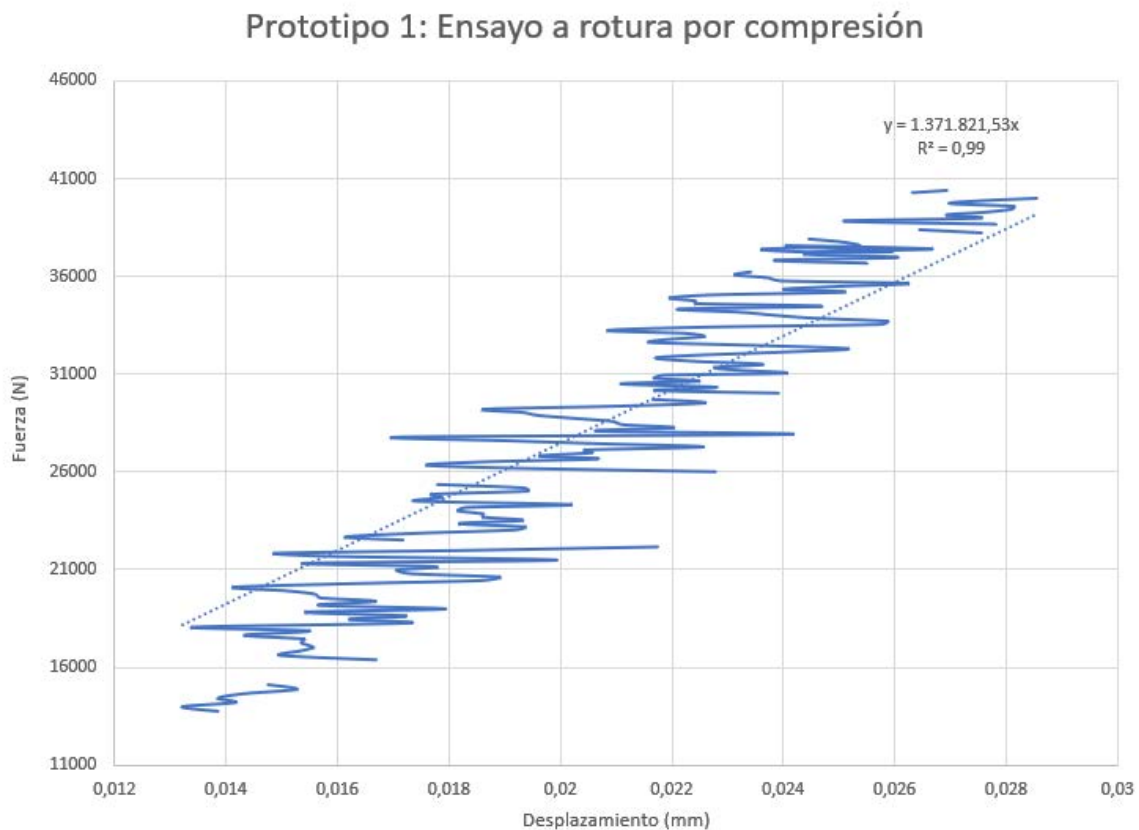


Ilustración 9.14: Gráfica Fuerza-Desplazamiento del ensayo Prototipo 1: Ensayo a rotura por compresión (parte lineal).

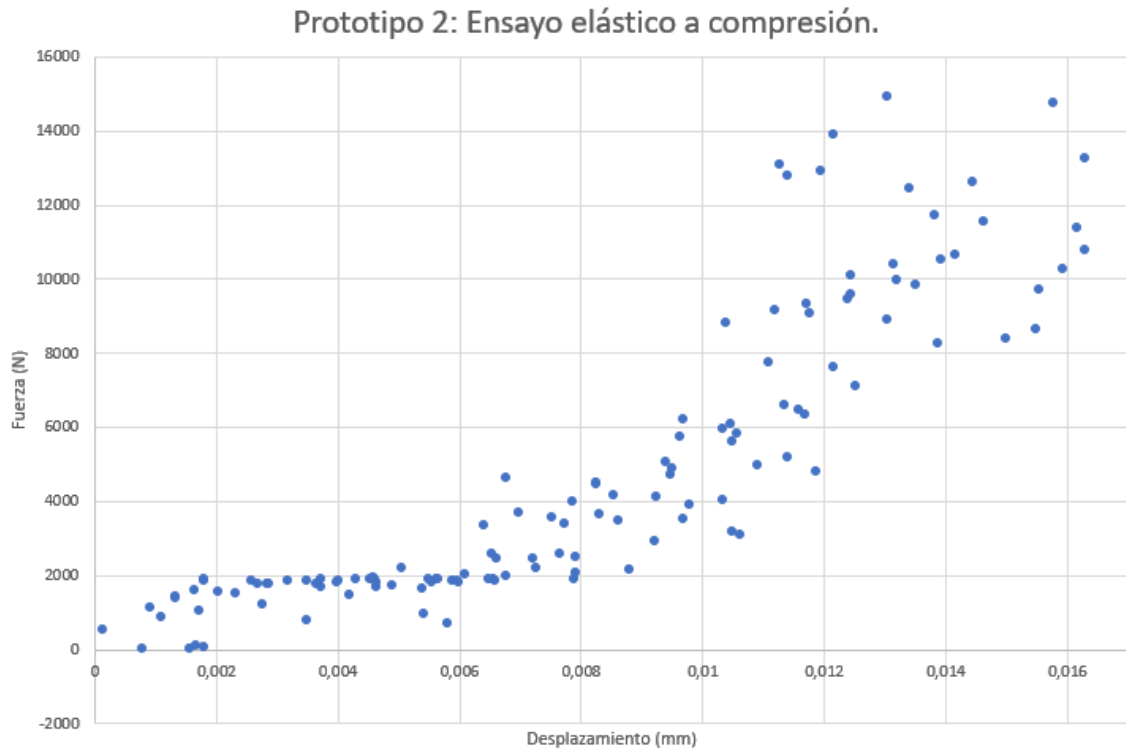


Ilustración 9.15: Gráfica Fuerza-Desplazamiento del ensayo Prototipo 2: Ensayo elástico a compresión.

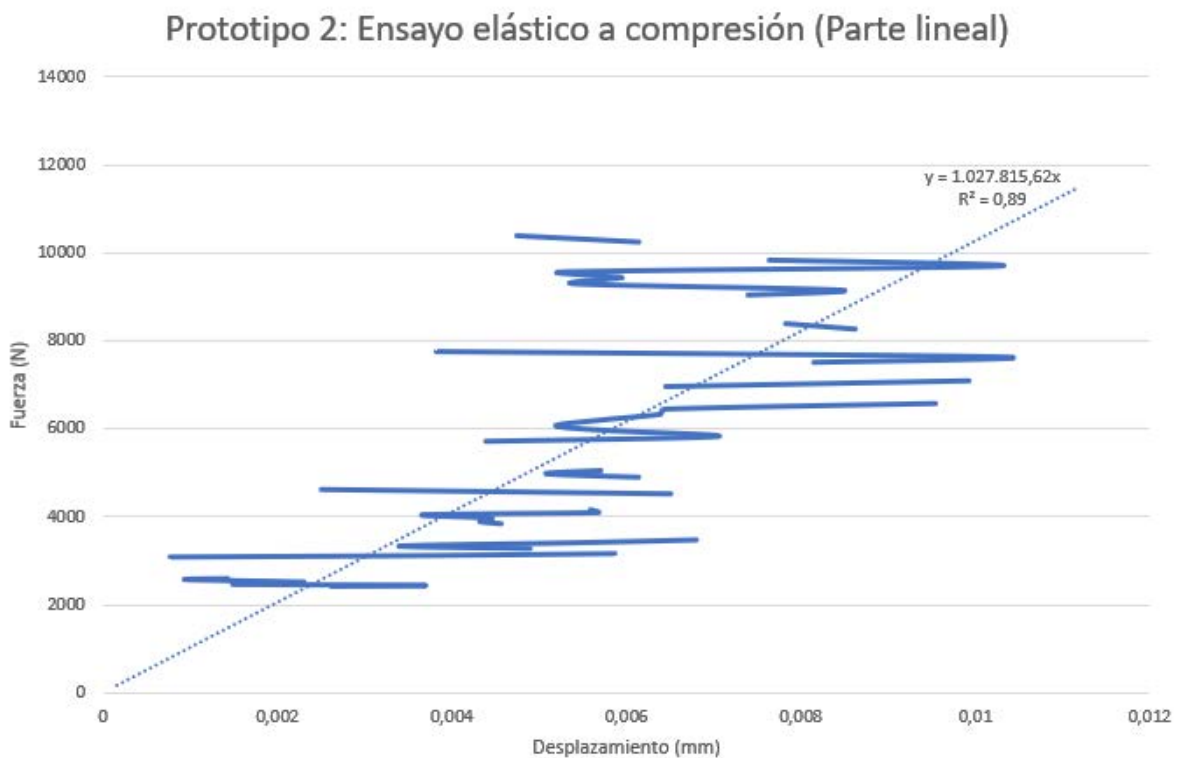


Ilustración 9.16: Gráfica Fuerza-Desplazamiento del ensayo Prototipo 2: Ensayo elástico a compresión (parte lineal, sin efecto talón).

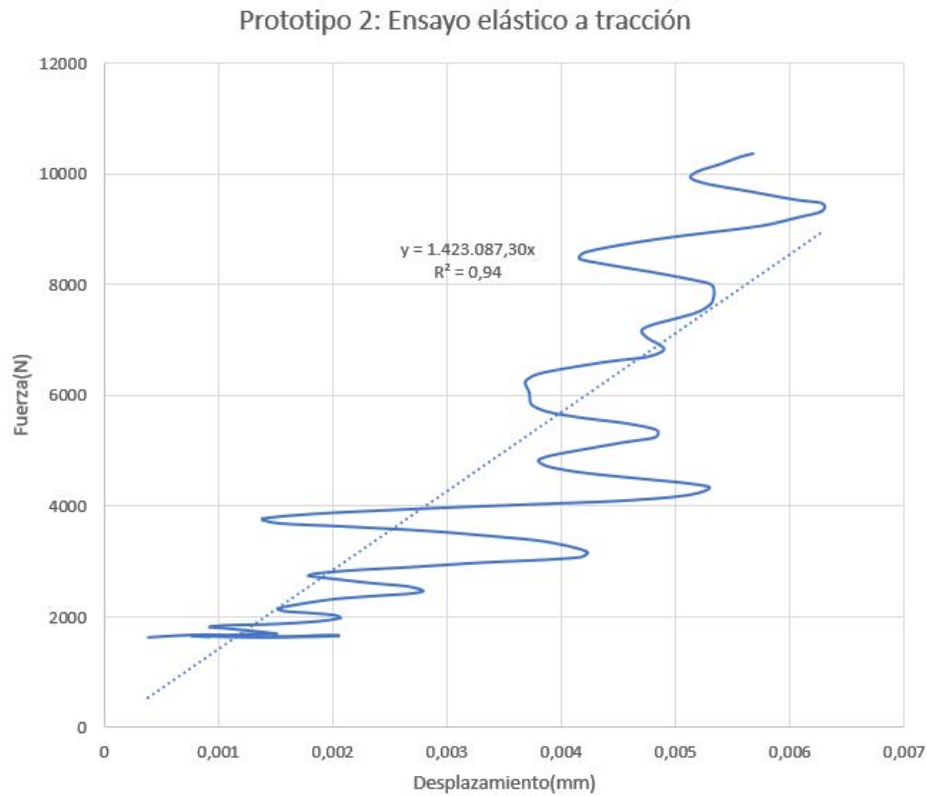


Ilustración 9.17: Gráfica Fuerza-Desplazamiento del ensayo Prototipo 2: Ensayo elástico a tracción (parte lineal, omitiendo ruido inicial).

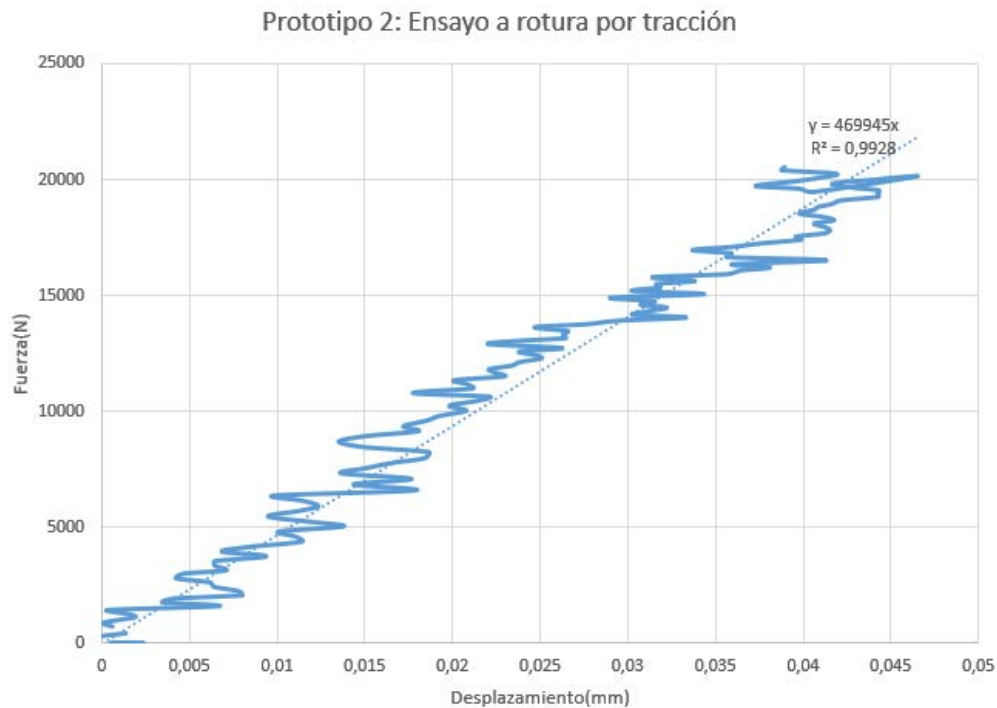


Ilustración 9.18: Gráfica Fuerza-Desplazamiento del ensayo Prototipo 2: Ensayo a rotura por tracción (completo).

Tras ver las ecuaciones de las líneas de tendencia se obtiene la siguiente tabla con la rigidez obtenida en los ensayos.

PROTOTIPO 1		PROTOTIPO 2		SOLIDWORKS	
Ensayo	Rigidez k (N/mm)	Ensayo	Rigidez k (N/mm)	Simulación	Rigidez k (N/mm)
Elástico Compresión	1.390.537	Elástico Compresión	1.027.815	Compresión	141.429
Rotura Compresión	1.371.821	Elástico Tracción	1.423.087	Tracción	141.966
		Rotura Tracción	469.945		

TABLA 1: RESUMEN DE LOS VALORES DE RIGIDEZ

Se puede observar una amplia variabilidad en cuanto a la rigidez de los distintos prototipos y ensayos. Dicha variabilidad puede verse afectada por el ruido durante el ensayo (por el acoplamiento de los útiles, por ejemplo) o por los propios prototipos en sí, ya que en el proceso de impresión influyen muchos factores, como pueden ser la temperatura y humedad en cada instante del proceso, y que pueden afectar a la rigidez y comportamiento de los mismos. Asimismo, el diseño de los útiles podría tener comportamiento ligeramente distinto en el ensayo a tracción y a compresión, añadiendo más ruido a los resultados experimentales obtenidos en el laboratorio.

Por otro lado, se observa una diferencia abismal entre la rigidez de los ensayos y la extraída del software de simulación. Dicha diferencia puede deberse a las condiciones de contorno con las que se simula el modelo, ya que los taladros están fijos y la geometría no puede rotar sobre ellos ni pueden separarse entre sí, lo que provoca una distorsión en el cálculo de la rigidez. Además, el software utilizado solo contempla la parte lineal de la curva de los materiales, pudiendo estudiar solamente el régimen elástico del caso, sin tener en cuenta las deformaciones producidas en el régimen plástico.

9.4. Modos de rotura.

La rotura en el ensayo de compresión se ha dado por la separación de capas producida en el modelo. Ésta rotura se debe a la flexión que sufre el modelo en la región, y que hace que, debido al bajo comportamiento plástico del material, se produzca dicha separación en las capas del prototipo.

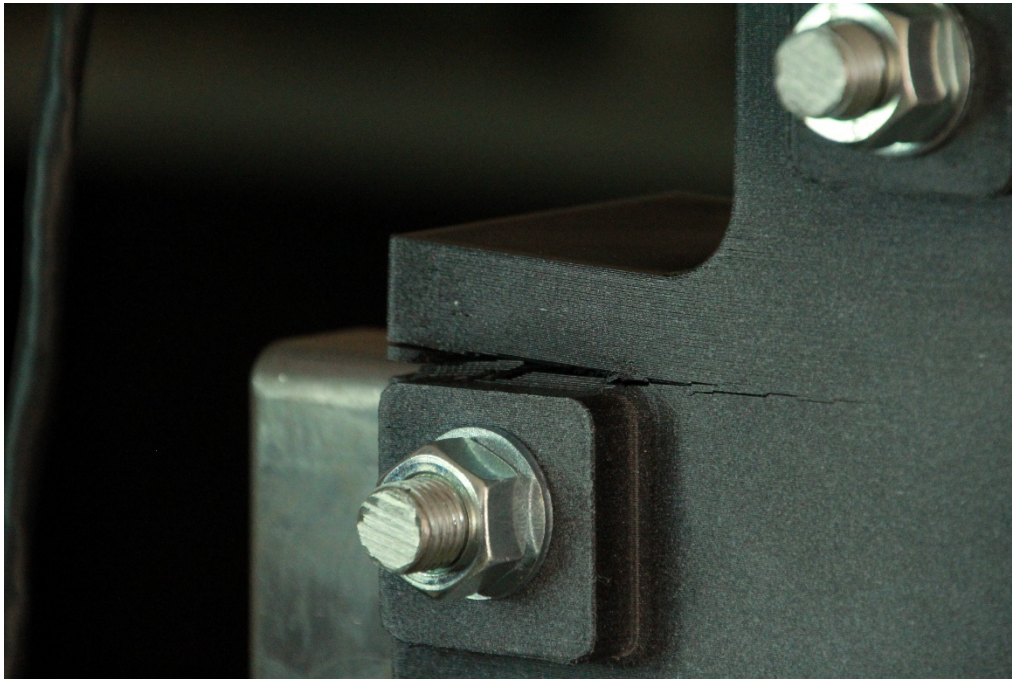


Ilustración 9.19: Detalle de rotura del Prototipo 1 a compresión.

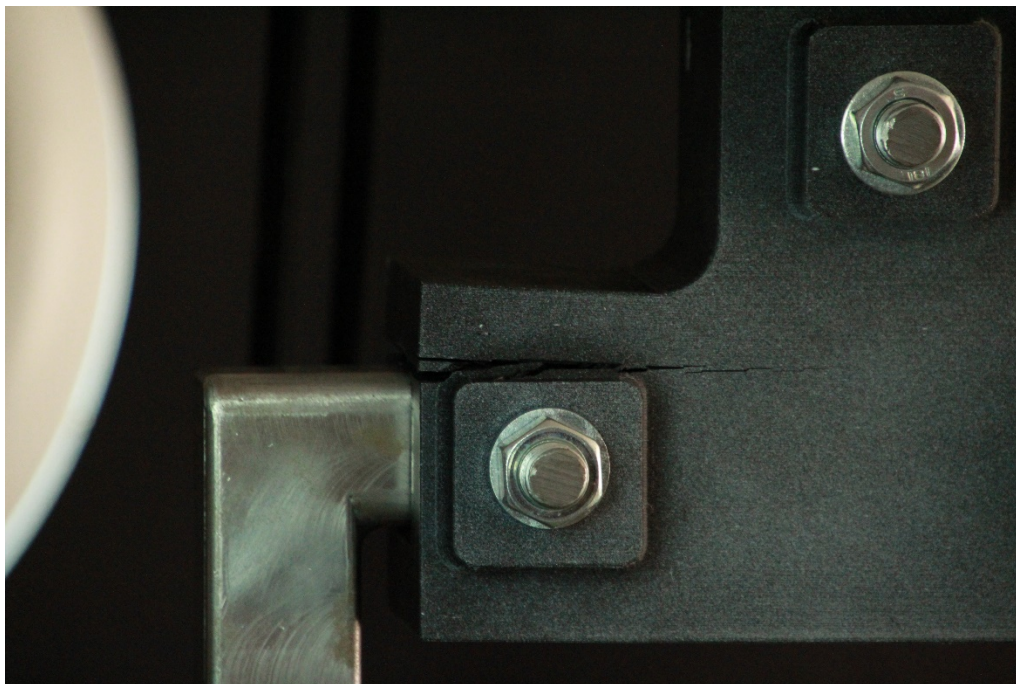


Ilustración 9.20: Detalle 2 de rotura del Prototipo 1 a compresión.

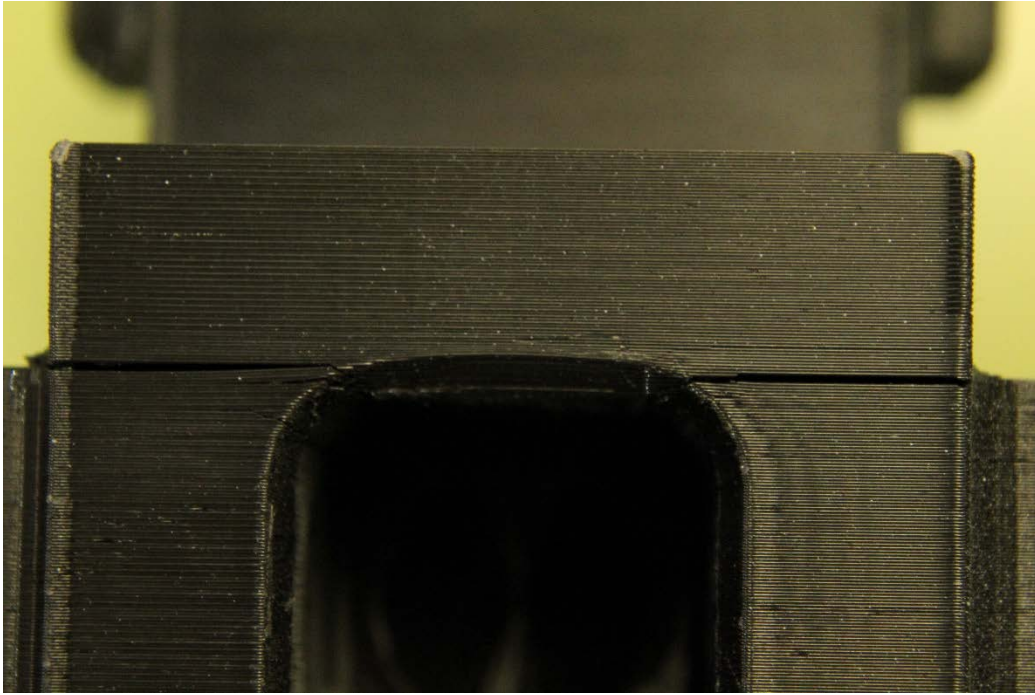


Ilustración 9.21: Detalle 3 de rotura del Prototipo 1 a compresión.

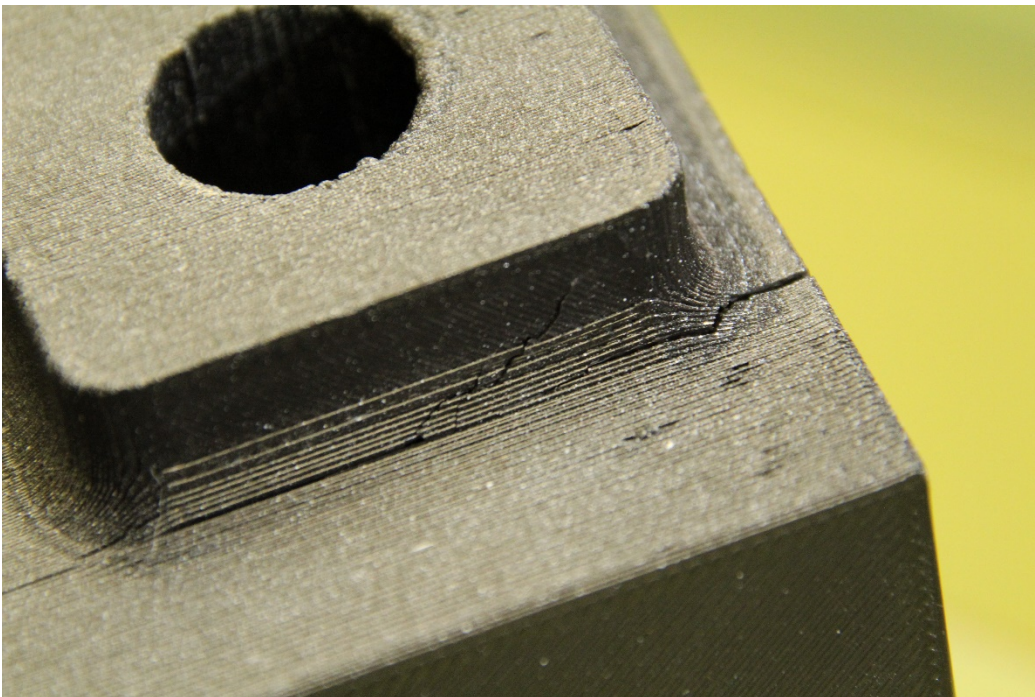


Ilustración 9.22: Detalle 4 de rotura del Prototipo 1 a compresión.

El ensayo del segundo prototipo a tracción también presenta una separación de capas aún más obvia si cabe. La rotura se produce en el taladro, que es la zona de menor sección, como era de esperar para este caso.

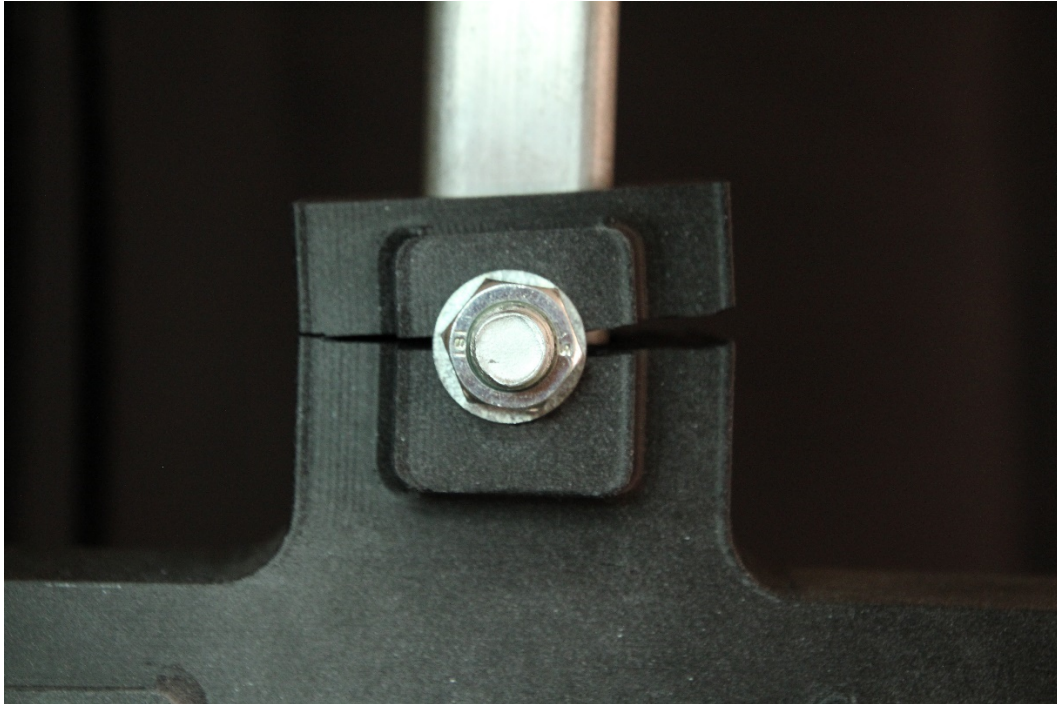


Ilustración 9.23: Detalle 1 de rotura del Prototipo 2 a tracción.



Ilustración 9.24: Detalle 2 de rotura del Prototipo 2 a tracción.

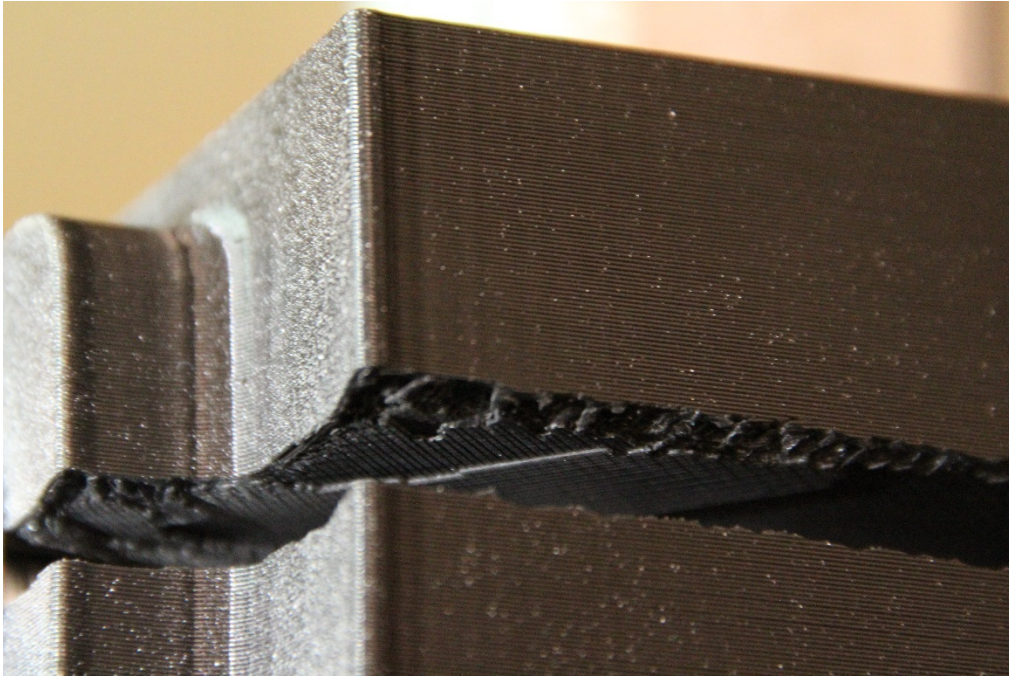


Ilustración 9.25: Detalle 3 de rotura del Prototipo 2 a tracción.

10. CONCLUSIONES.

Al inicio de este proyecto se tenían una serie de objetivos, tanto técnicos referidos a los prototipos, como didácticos en cuanto a lo que el alumno respecta.

El balance en cuestiones técnicas ha sido positivo, a pesar de haber encontrado dificultades durante todo el proyecto. Se han conseguido obtener unos prototipos que cumplan el objetivo de resistencia propuesto, que son fáciles de montar, puesto que son uniones atornilladas y el principal, que son impresas en 3D. En cuanto a los materiales, se han considerado varios en la fase de diseño, optándose por PLA para la verificación experimental de los prototipos. Los resultados experimentales obtenidos muestran que podrían diseñarse uniones similares con otros materiales, que presenten mejores propiedades para trabajar bajo distintas condiciones o requisitos.

En cuanto a los objetivos didácticos se han cumplido todos con creces, y el alumno ha sido capaz de entender mejor el ecosistema de la impresión 3D, cuál es su historia y hacia dónde evoluciona. Además, ha podido perfeccionar el manejo del software Catia V5, ha aprendido el módulo de simulación de SolidWorks, ha adquirido conocimientos en cuanto a la metodología a utilizar en un laboratorio, así como el funcionamiento de los aparatos utilizados, y ha aprendido a procesar los resultados con la tecnología DIC 2D.

El balance general de este Trabajo de Fin de Grado es satisfactorio para el alumno, y considera que le ha ocasionado una curiosidad por esta rama de la ingeniería que no conocía antes de iniciarse en él.

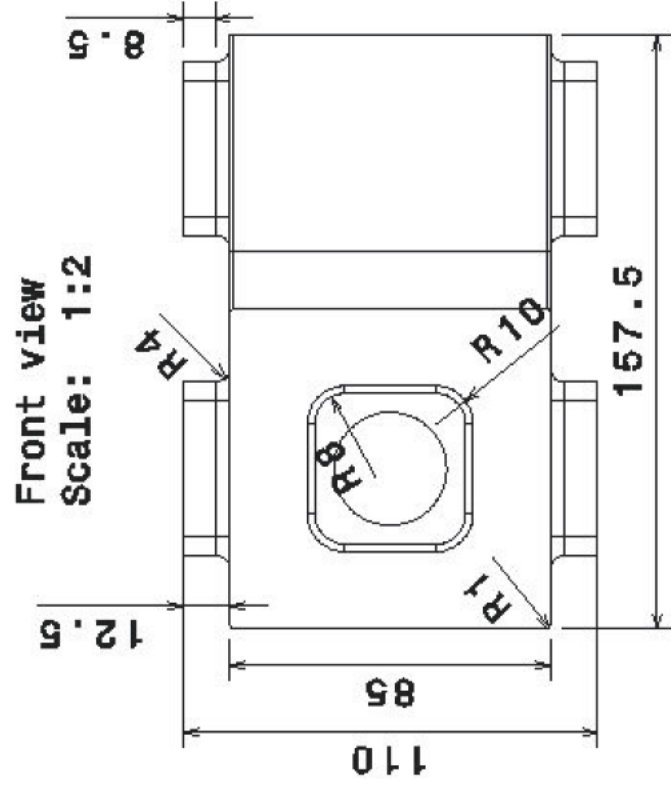
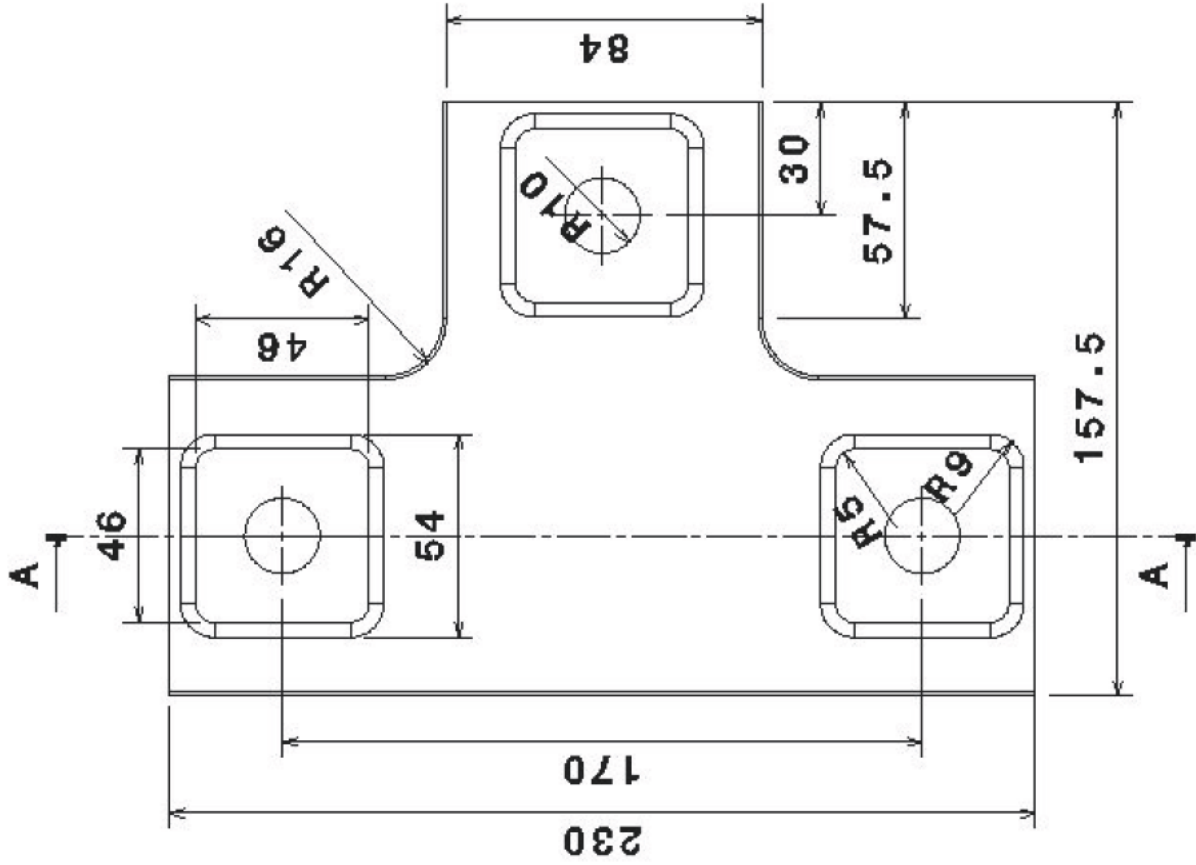
11. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Berchon, M. y Luyt, B. (2016). La impresión 3D: guía definitiva para makers, diseñadores, estudiantes, profesionales, artistas y manitas en general. Editorial Gustavo Gili.
<https://elibro--net.ujaen.debiblio.com/es/ereader/ujaen/45582?page=17>
- [2] Coward, Cameron. 3D Printing. 1st edition. Place of publication not identified: Alpha a member of Penguin Group USA Inc, 2015. Print.
- [3] Página web de 3D Systems <https://es.3dsystems.com/our-story>
- [4] Laboratory of Information Processing Science. Universidad de Helsinki.
<http://www.cs.hut.fi>
- [5] Technologies, O., Jetting, B., technologies, O. and Jetting, B., 2021. Binder Jetting - Additively. [online] Additively.com. Disponible en: <https://www.additively.com/en/learn-about/binder-jetting>
- [6] ABS: Researchers Test Temperature & Speed Settings in FDM 3D Printing - 3DPrint.com | The Voice of 3D Printing / Additive Manufacturing. 3DPrint.com | The Voice of 3D Printing / Additive Manufacturing. (2021). Retrieved 11 April 2021, from <https://3dprint.com/236571/abs-researchers-test-temperature-speed-parameters-3d-printing/>
- [7] (2021). [Image]. Retrieved 15 April 2021, from <http://makermex.com/blog/manufactura-digital-1/post/8-areas-donde-la-impresion-3d-crea-innovacion-514>
- [8] Noticia: Abre en Ámsterdam el primer puente de acero del mundo impreso en 3D.
https://www.europafm.com/noticias/viral/abre-amsterdam-primer-puente-acero-mundo-impreso-3d_20210831612e239a975d6a0001cba1e5.html
- [9] Robotics and Additive Manufacturing in the Construction Industry,
Trayana Tankova & Luís Simões da Silva, Springer Nature Switzerland AG 2020
- [10] <https://futurism.com/the-byte/massive-3d-printed-building>
- [11] 3-D printing offers new approach to making buildings, <http://news.mit.edu/2017/3-d-printing-buildings-0426>
- [12] THE BOD. Europe's first 3D printed building. <https://cobod.com/the-bod/>
- [13] Li T, Wang L. Bending behaviour of sandwich composite structures with tuneable 3D-printed core materials. Compos Struct. 2017;175: 46–57.
- [14] <https://www.esss.co/es/blog/metodo-de-los-elementos-finitos-que-es/>
- [15] Digital Image Correlation for Shape and Deformation Measurements. Michael A. Sutton.
https://link--springer--com.ujaen.debiblio.com/referenceworkentry/10.1007/978-0-387-30877-7_20

- [16] Agencia Estatal Boletín Oficial del Estado. (2011). Instrucción de acero estructural (EAE).
- [17] Experimental behaviour of 3D-printed T-Stub models. Carazo-Álvarez, Daniela, Herranz-Colomina, Pedro, Aranda-Martínez, Beatriz and Ruiz-Canales, Jaime.
- [18] Ultrafuse 316L Technical Data Sheet. https://www.ultrafuseff.com/wp-content/uploads/2019/07/Ultrafuse_316L_Technical_Data_Sheet_TDS.pdf
- [19] Página web de Smart Materials 3D. <https://www.smartmaterials3d.com/pla-filamento>
- [20] MTS 810 & 858 Material Testing Systems
https://www.upc.edu/sct/documents_equipament/d_77_id-412.pdf

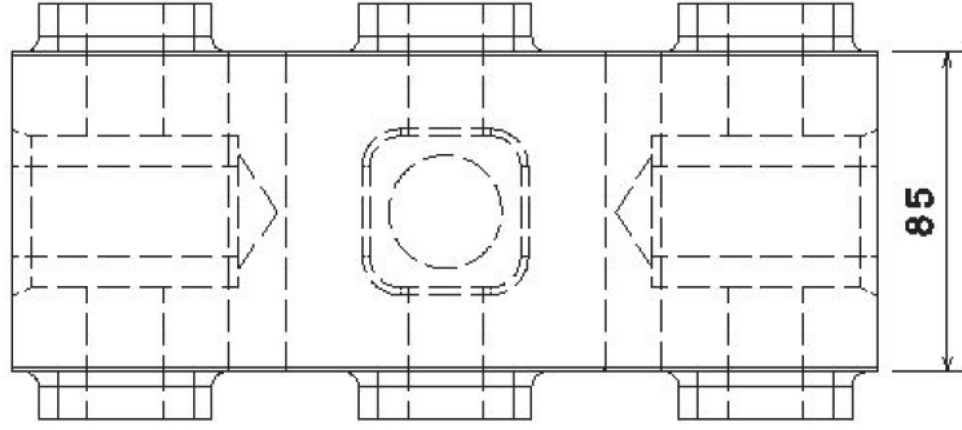
ANEXO 1: PLANOS.

- Plano 1: Modelo final PLA
- Plano 2: Modelo final PET CF
- Plano 3: Modelo final Ultrafuse 316L
- Plano 4: Conjunto Útiles-Pieza

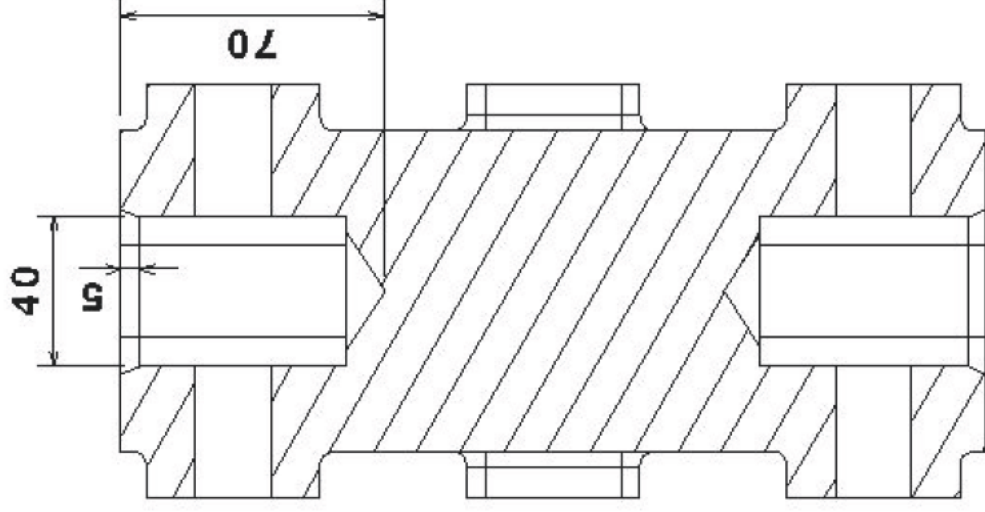


Front view
Scale: 1:2

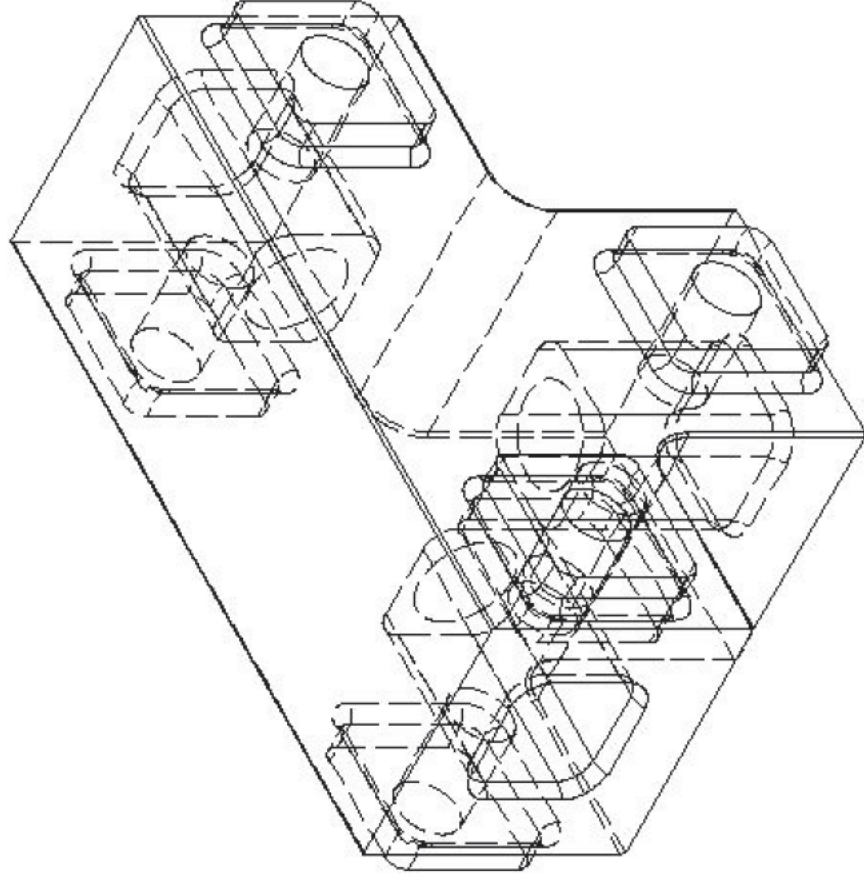
Top view
Scale: 1:2



Left view
Scale: 1:2

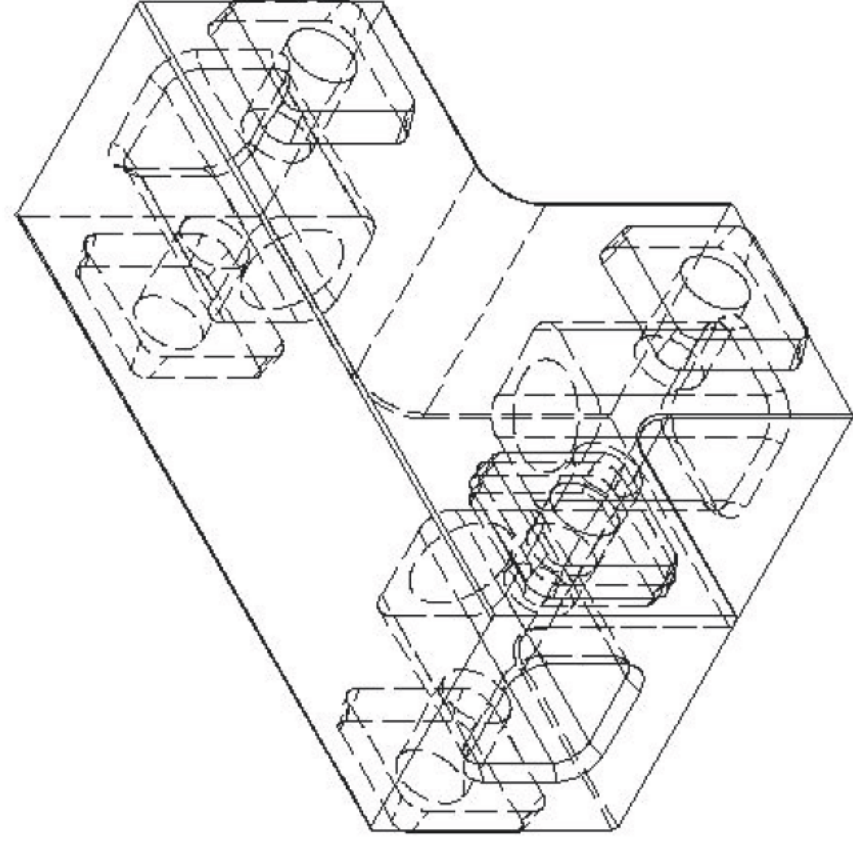
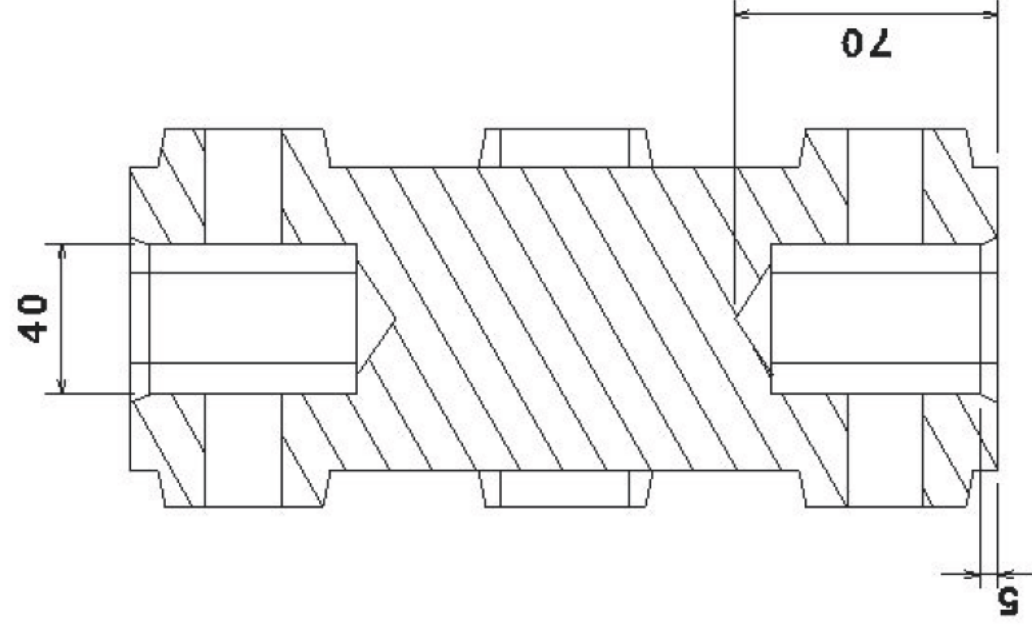
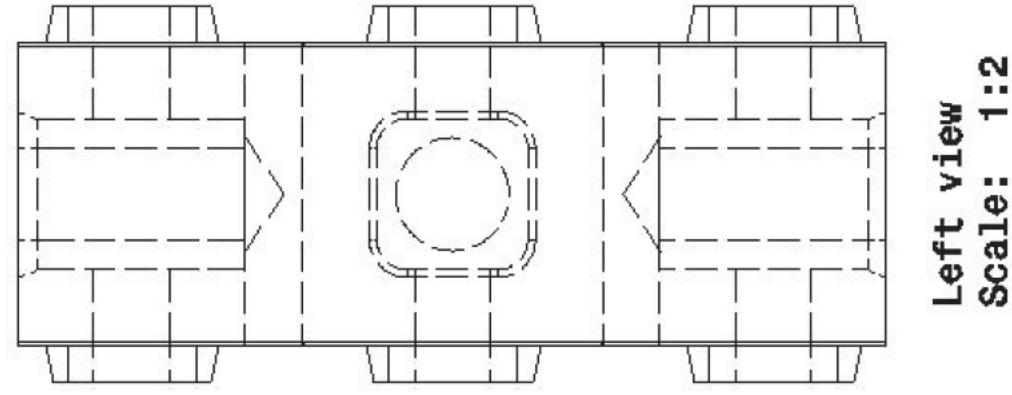
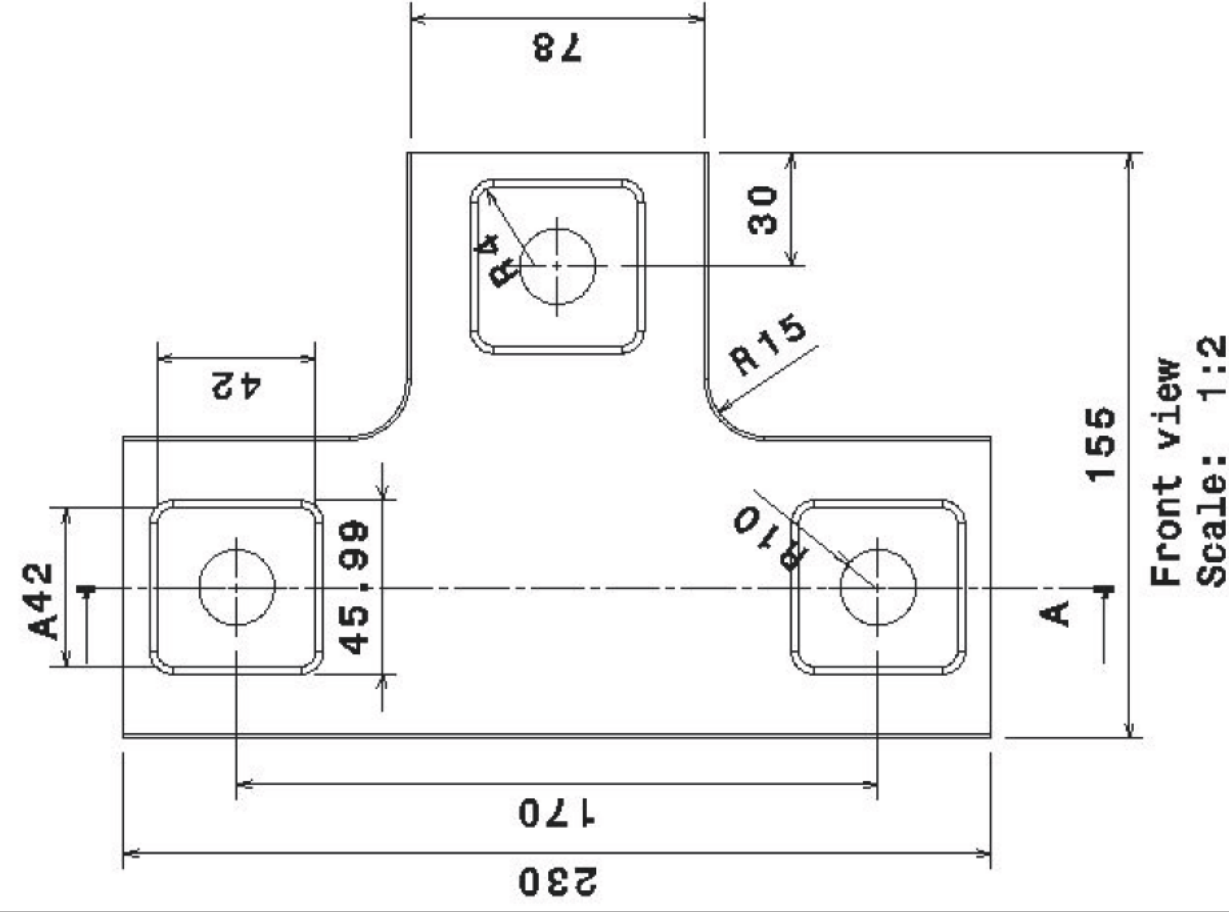


Section view A-A
Scale: 1:2

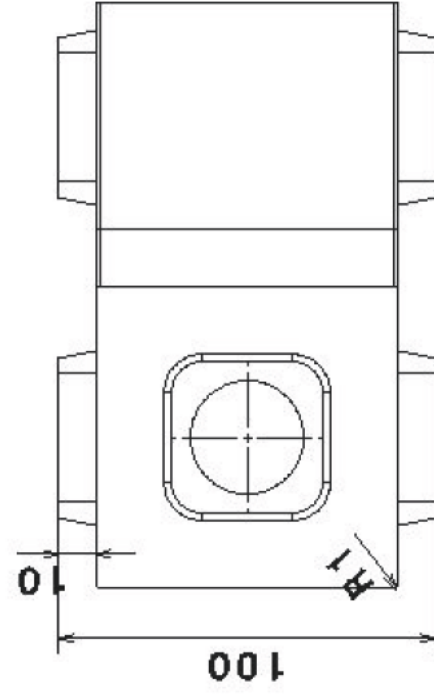


Isometric view
Scale: 1:2

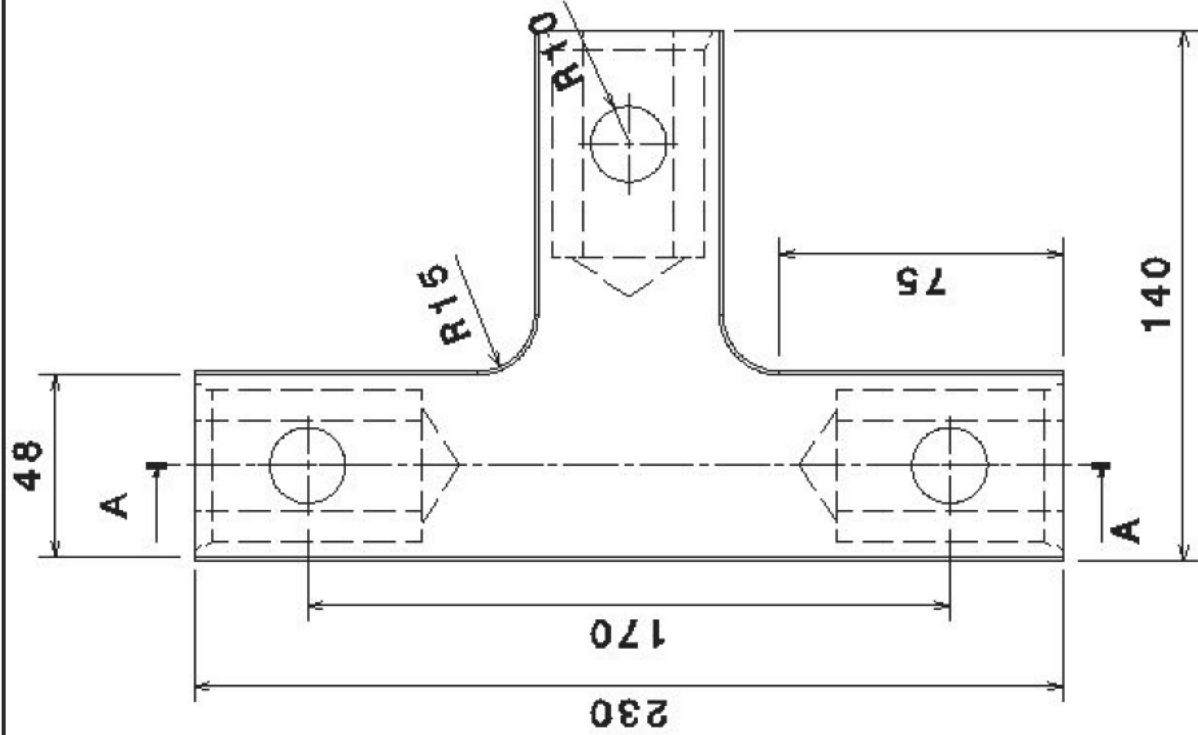
		FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR JAÉN
DIBUJADO			Abraham Garrido		
COMPROBADO					
ESCALA:	Unión impresa PLA				Nº PLANO
1:2					1
					SUSTITUYE A:
					SUSTITUIDO POR:



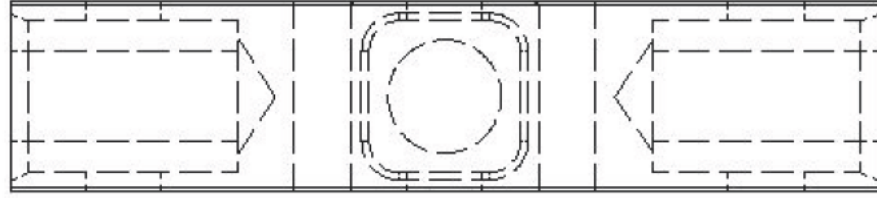
Isometric view
Scale: 1:2



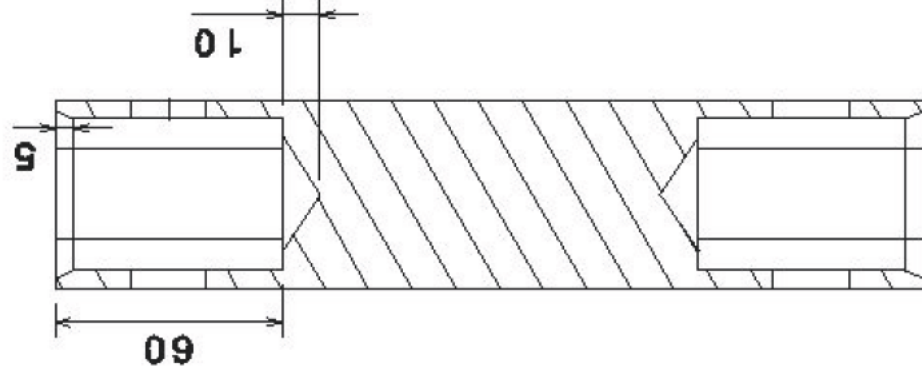
		FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR JAÉN	
DIBUJADO			Abraham Garrido			
COMPROBADO						
ESCALA:		Unión impresa PET FC				Nº PLANO 2
1:2						SUSTITUYE A:
					SUSTITUIDO POR:	



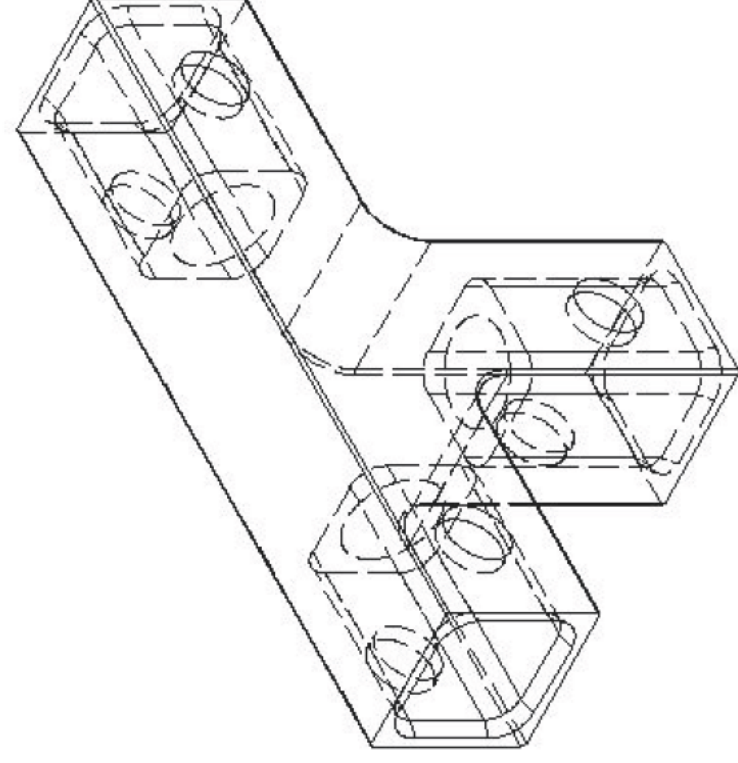
Front view
Scale: 1:2



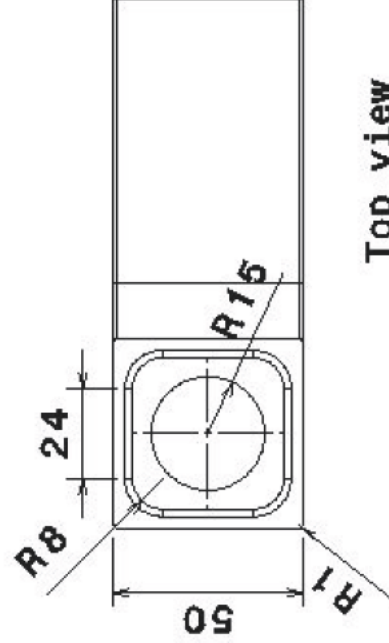
Left view
Scale: 1:2



Section view A-A
Scale: 1:2

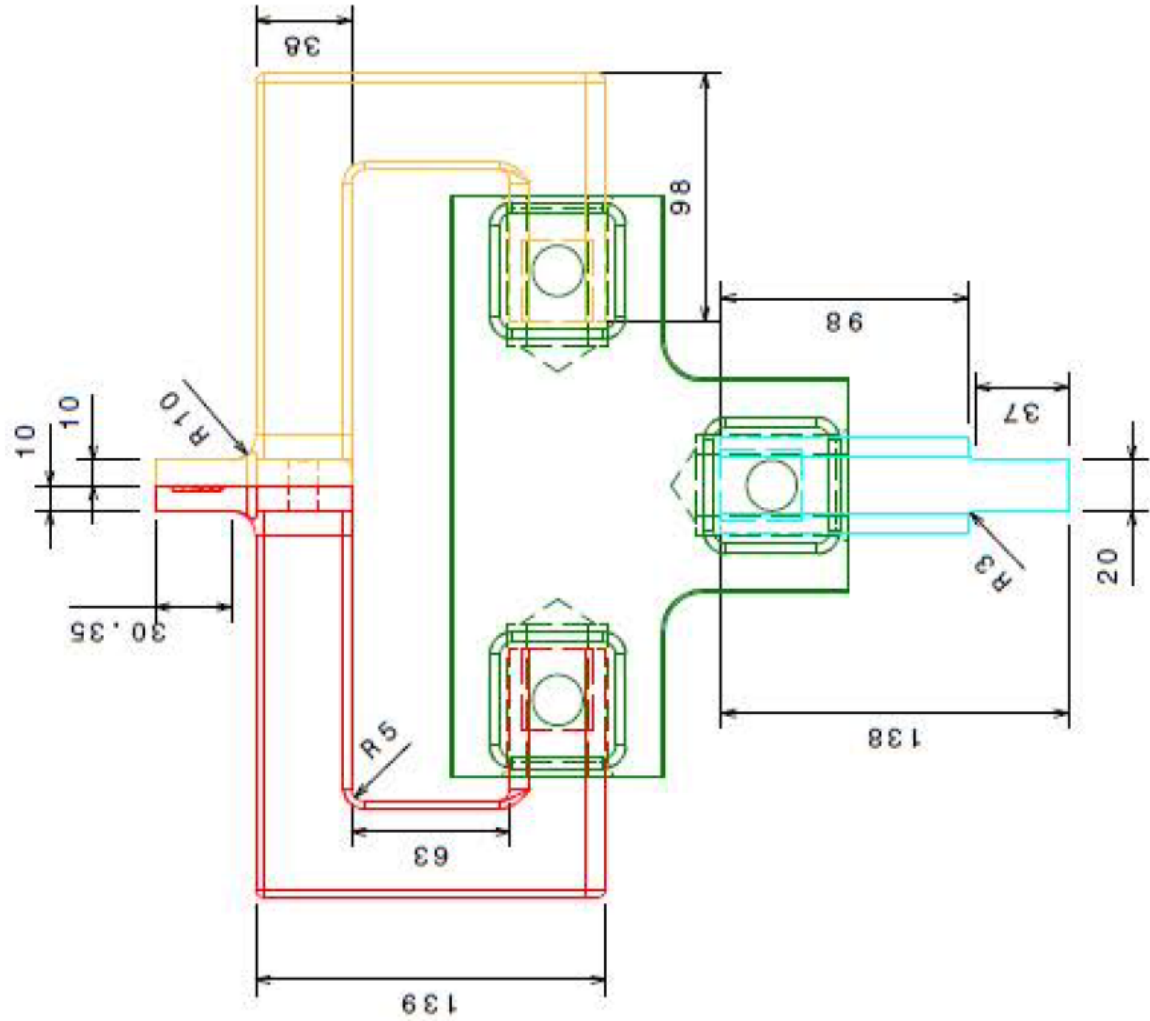


Isometric view
Scale: 1:2

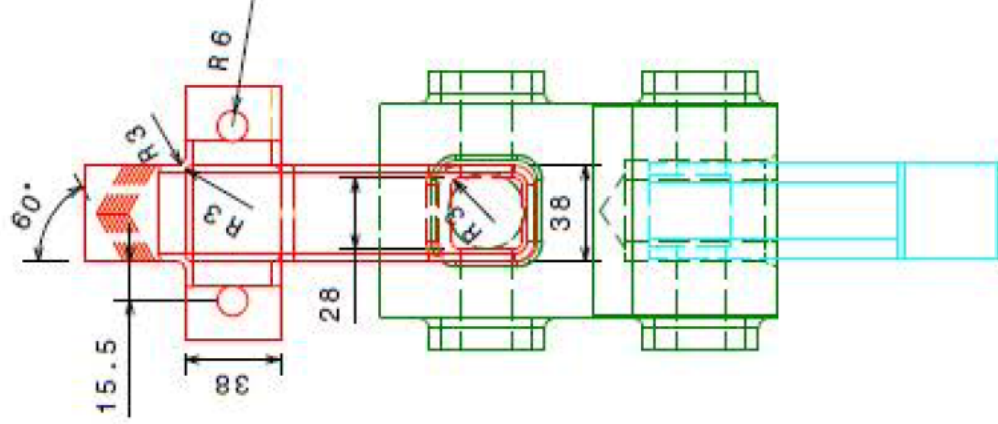


Top view
Scale: 1:2

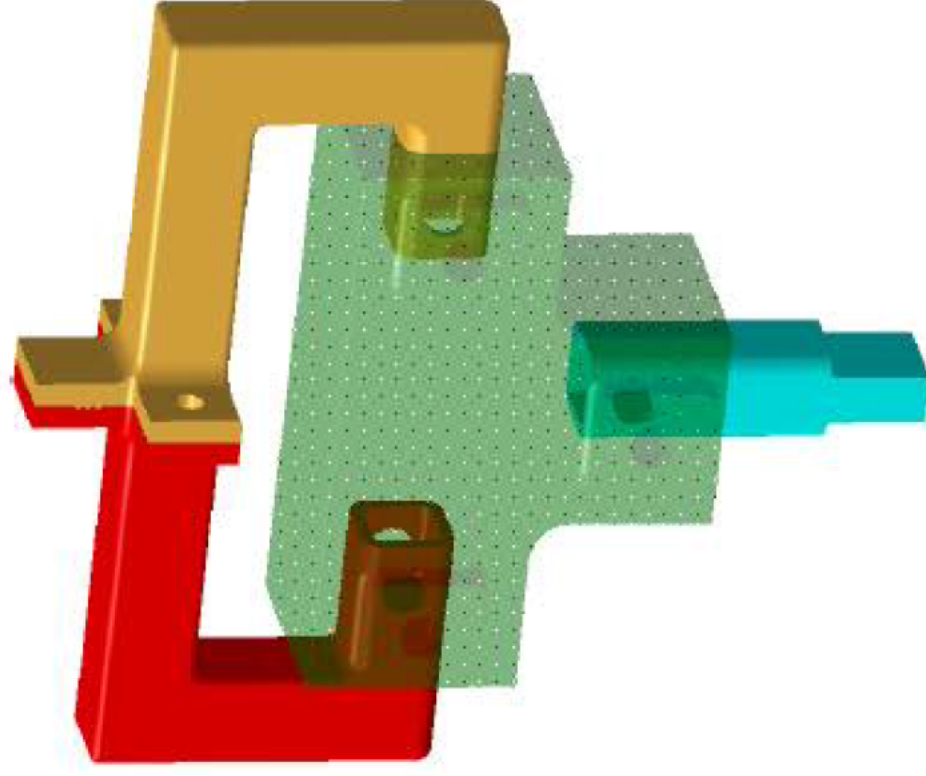
	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR JAÉN
DIBUJADO		Abraham Garrido		
COMPROBADO				
ESCALA:	Unión impresa Ultrafuse			Nº PLANO
1:2				3
				SUSTITUYE A:
				SUSTITUIDO POR:



Front view
Scale: 1:3



Left view
Scale: 1:3



Isometric view
Scale: 1:3

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR JAÉN		FIRMA				
		NOMBRE				
DIBUJADO				Alfonso Garrido Morales		
COMPROBADO				David Carlos Álvarez		
ESCALA:		CONJUNTO ÚTILES-PIEZA				Nº PLANO 4
1:3						SUSTITUYE A:
						SUSTITUIDO POR: