



Universidad de
Oviedo



ESCUELA POLITÉCNICA DE INGENIERÍA DE GIJÓN.

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

**ÁREA DE MECÁNICA DE LOS MEDIOS CONTINUOS
Y TEORÍA DE ESTRUCTURAS**

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**CARACTERIZACIÓN NUMÉRICA DE UNIONES HÍBRIDAS
METAL-POLÍMERO MEDIANTE PINS**

D. ÁLVAREZ COBO, Andrea
TUTORES: FERNÁNDEZ FERNÁNDEZ, Pelayo

FECHA: Julio 2019

Índice

Capítulo 1: Metas y objetivos del proyecto	1
1.- Objetivo principal del proyecto.....	1
2.- Objetivos secundarios de proyecto	1
Capítulo 2: Estado del arte	2
1.- Introducción a las tecnologías de unión	2
1.1.- Unión adhesiva	2
1.2.- Refuerzo a través del espesor	4
2.- Materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con fibra	4
3.- Juntas híbridas de unión	8
3.1.- Hybrid bonded-pinned joint (HBP)	9
3.2.- Junta HYPER.....	16
3.3.- Principales parámetros influyentes en el comportamiento de las juntas HBP	20
Capítulo 3: Metodología de trabajo	24
1.- Investigación y análisis de la literatura existente.....	24
1.- Caracterización micro y macro de las geometrías mediante FEM	24
2.- Simulación de pines individuales	25
2.1.- Selección de geometrías	25
2.2.- Ensayos sobre pines individuales.....	27
Capítulo 4: Resultados	38
1.- Ensayos sobre pines individuales	38
1.1.- Ensayos de tracción	38
1.2.- Ensayos de cortante	40
Capítulo 5: Conclusiones.....	43
Capítulo 6: Líneas futuras	45
Capítulo 7: Presupuesto.....	46
Capítulo 8: Bibliografía.....	47

Capítulo 9: Anexos.....	49
-------------------------	----

Capítulo 1: Metas y objetivos del proyecto

1.- Objetivo principal del proyecto

Este trabajo fin de máster tiene como principal objetivo encontrar una geometría óptima para los pines de una junta híbrida, manufacturada mediante fabricación aditiva (impresión 3D), entre una matriz metálica (en este caso, acero inoxidable) y un polímero reforzado con fibra de carbono (de ahora en adelante, CFRP: Carbon Fiber Reinforced Polymer). Además de esto, y con la misma importancia, se llevará a cabo una caracterización numérica de la junta para poder así formular una teoría basada en un software comercial que nos aporte información del comportamiento macroscópico de la junta.

2.- Objetivos secundarios de proyecto

Como consecuencia de los objetivos principales, otros deben ser alcanzados previamente, como el completo entendimiento del comportamiento y uso de las juntas híbridas, las nuevas técnicas desarrolladas para unir metales y materiales compuestos y los diferentes procesos existentes que nos permiten fabricar los pines de las juntas. Todo esto es necesario para entender el por qué es tan importante el desarrollo de esta técnica y también, que ventajas y desventajas presenta respecto a las otras técnicas existentes.

Capítulo 2: Estado del arte

1.- Introducción a las tecnologías de unión

Dado que el objetivo fundamental de este proyecto es buscar una solución para una junta entre acero inoxidable y CFRP, es necesario un estudio preliminar de las técnicas existentes para este propósito. Basándose en [6] (Jahn, et al., 2016), si un componente metálico debe ser unido a un componente de material compuesto, hay tres posibilidades principales:

- Unión adhesiva
- Fijación mecánica
- Combinación de las dos anteriores

La elección de una u otra depende principalmente de la disposición geométrica de los componentes a unir, la mayoría de las disposiciones se muestran en la Figura 2.1:

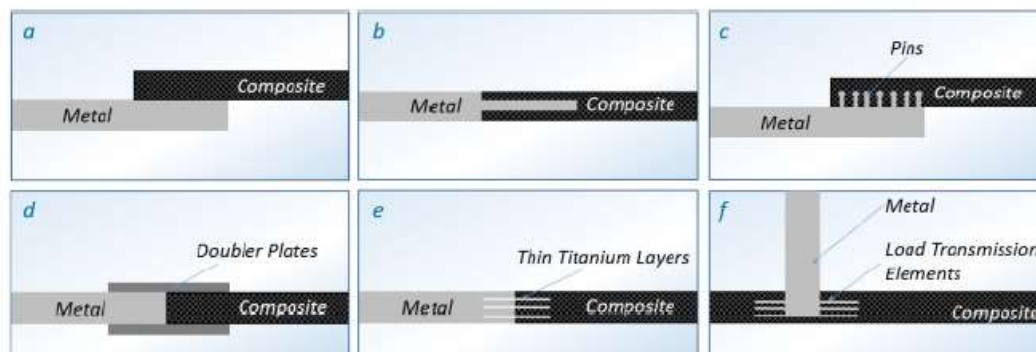


Figura 2.1 .- (Jahn, et al., 2016) (a) Junta de solape simple (b) Junta Comeld (c) Junta HYPER (d,e) Juntas frontales (f) Junta en T

1.1.- Unión adhesiva

Este tipo de unión es usada para fijar dos superficies, una sobre la otra. Su mayor ventaja es la unión continua que da comparada con la unión puntual que dan otros tipos de unión. Es un concepto aplicado a unir materiales compuestos, ya sean de igual o diferente composición. Se distingue entre:

- *Co-uni3n (co-bonding)*: uni3n de componentes curados con laminados h3medos. Consiste en curar conjuntamente dos o m3s elementos con al menos uno de ellos ya curado y otro sin curar
- *Co-curado (co-curing)*: uni3n de laminados h3medos. Consiste en curar un laminado compuesto y unirlo a otro material sin curar al mismo tiempo

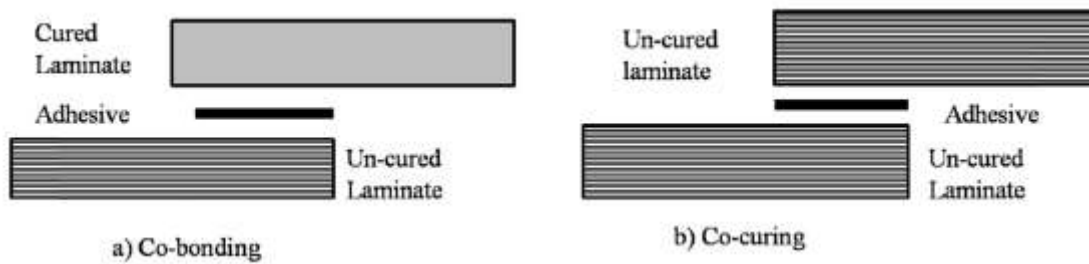


Figura 2.2.- (Budhe, et al., 2017) Procesos m3s comunes de uni3n entre componentes compuestos (a) Co-uni3n (b) Co-curado

Bas3ndose en [13] (Budhe, et al., 2017), el desempe1o de estas juntas est3 influenciado por:

- *M3todo de uni3n usado* (co-uni3n o co-curado): “muchos de los par3metros, como el proceso de fallo, el modo de fallo y la fuerza de uni3n est3n influenciados por el proceso de uni3n”
- *Preparaci3n superficial*: “directamente relacionada con la calidad de la uni3n debido a que tiene que asegurar la eliminaci3n de todos los contaminantes de las superficies a unir”
- *Par3metros del material* (propiedades del adhesivo y del sustrato)
- *Par3metros geom3tricos* (espesor del adhesivo, longitud de superposici3n, 3ngulo de capa)

“Todos los anteriores deben ser tenidos en cuenta durante el dise1o de las juntas para conseguir un buen comportamiento de la estructura una vez unida”.

De acuerdo con [6] (Jahn, et al., 2016), las principales ventajas de la uni3n adhesiva son:

- Introduce carga uniformemente distribuida
- Posibilidad de unir componentes con diferentes espesores

- Ofrece prevención frente a la corrosión galvánica al unir materiales diferentes

1.2.- Refuerzo a través del espesor

En [6] (Jahn, et al., 2016) el “refuerzo a través del espesor” es definido como “la introducción de elementos de unión en el laminado curado una vez se ha llevado a cabo el proceso de curado. La perforación del orificio causa un debilitamiento de la zona de fusión, daño en las fibras e interrupción de la transmisión de carga”.

De acuerdo con [14] (Mouritz, 2008) el refuerzo a través del espesor es uno de los métodos desarrollados para solucionar uno de los problemas de los laminados fibra-polímero, que es su “pobre resistencia de delaminación y tolerancia de daño al impacto debido a su baja resistencia y tenacidad a la fractura en dirección del espesor”. La efectividad de este método es notable, ya que con solo un 0.5-5% de contenido de refuerzo en volumen, la resistencia al daño mejora notablemente, así que grandes mejoras son obtenidas con cantidades relativamente pequeñas de refuerzo.

2.- Materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con fibra

Se entiende por material compuesto aquel formado combinando dos o más materiales diferentes, dando como resultado un producto con propiedades superiores a las de los materiales originales por separado.

Dentro del mundo industrial, una de las combinaciones más extendidas es la de resina y fibras, ya que se consigue aunar la rigidez, resistencia y dureza de las fibras con la capacidad de la matriz de transmitir los esfuerzos entre las diferentes fibras. Este tipo de materiales compuestos, que se denominan FRP (Fibre Reinforced Polymer), tienen estructura de laminado multicapa constituido por una matriz polimérica reforzada con fibras largas. Las matrices más típicas son:

- *Resina de poliéster*: se trata de una resina termoestable, es decir, al someterlas a altas temperaturas no se funden, solo se degradan.
- *Resina epoxy*: se trata también de una resina termoestable. Su coste es mayor que el de la resina de poliéster, pero tiene una resistencia mecánica mayor y permite

trabajar a mayores temperaturas sin perder propiedades. Además, tiene una alta resistencia a la corrosión y resto de fenómenos ambientales.

Los tipos de refuerzo más utilizadas son:

- *Fibras de vidrio*: muy usada en el ámbito industrial debido a su bajo coste frente a las buenas propiedades mecánicas que ofrecen.
- *Fibras de carbono*: utilizadas en aquellas aplicaciones estructurales que necesiten un buen comportamiento mecánico estático o que requieran una buena resistencia a la fatiga.

En el caso concreto de este proyecto, se ha utilizado una resina epoxi como matriz y fibras de carbono, por eso se denomina al material compuesto CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer).

Según el fabricante americano HEXCEL se denomina preimpregnado a “un material compuesto hecho de la combinación de fibras o tejido de refuerzo de alto rendimiento con una matriz de resina termoestable o termoplástica. Cuando se curan con alta temperatura y presión se logran propiedades estructurales excepcionales”. Lo que diferencia a un preimpregnado de otros materiales compuestos es que ya está listo para ser usado, solamente necesitaría ser curado a alta temperatura y presión, pero la resina y las fibras forman un solo cuerpo desde el principio. Actualmente esta clase de materiales suponen hasta el 50% de las estructuras primarias de aeronaves como el Airbus A350 XWB o el Boeing 787. Este aumento de su uso en los últimos años se debe a su excelente relación calidad/precio y sobre todo a la disminución de peso que supone su uso en grandes estructuras, además de su fácil procesado y sus buenas propiedades mecánicas finales.

Estos preimpregnados pueden ser suministrados de dos formas como se puede ver en la Figura 2.3:

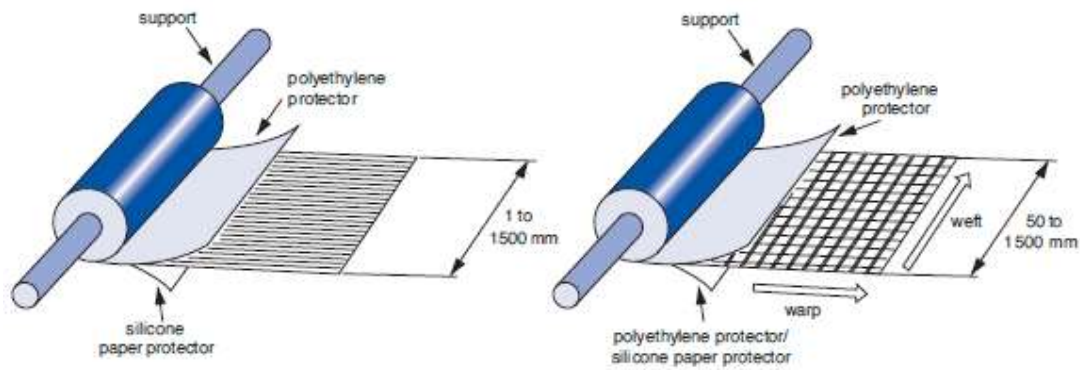


Figura 2.3.- Estado de suministro de preimpregnados unidireccionales y tejidos

(www.hexcel.com)

- *Unidireccionales*: todas las fibras están orientadas en una misma dirección, y por lo tanto en material es transversalmente isótropo, es decir, tiene las mismas propiedades en cualquier dirección perpendicular a las fibras.
- *Tejidos*: las fibras están orientadas en dos direcciones perpendiculares entre sí y están entrelazadas. Con esto se consigue que las propiedades en ambas direcciones de las fibras sean las mismas, es decir, un comportamiento isótropo, siempre y cuando las fibras estén dispuestas 50/50 en cada dirección.

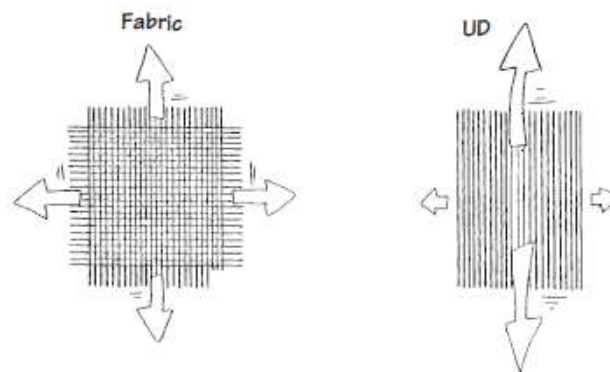


Figura 2.4.- Diferencia de propiedades entre preimpregnados unidireccionales y tejidos

(www.hexcel.com)

En la siguiente imagen se muestran las propiedades principales de los laminados preimpregnados del fabricante HEXCEL:






		UNITS		FIBRES							
				E-GLASS		ARAMID		HIGH STRENGTH CARBON		INTERMEDIATE MODULUS CARBON	
				UD	Fabric	UD	Fabric	UD	Fabric	UD	Fabric
Tensile 	σ_l	MPa	1100	600	1100	500	2000	800	2400	900	
	σ_t ≡	MPa	35	550	35	450	80	750	80	850	
	E_l	GPa	43	20	60	30	130	70	170	90	
	E_t ≡	GPa	8	19	8	30	9	65	9	90	
	Poisson's ratio ν_{lt}		0.28	0.13	0.34	0.2	0.25	0.05	0.27	0.05	
Compression 	σ_l	MPa	900	550	250	150	1300	700	1600	800	
	σ_t ≡	MPa	150	500	150	150	250	650	250	750	
	E_l	GPa	42	17	75	31	115	60	150	80	
	E_t ≡	GPa	10	16	5.5	30	10	55	11	75	
Flexural 	σ_l	MPa	1200	700	550	400	1800	1000	1400	1200	
	E_l	GPa	42	20	40	25	120	65	140	75	
In-plane shear 	σ_{lt} ⊕	MPa	60	55	45	40	95	80	95	80	
	G_{lt}	GPa	4	4.2	2.1	4	4.4	5.5	4.4	5	
Interlaminar shear 	σ	MPa	75	50	60	50	80	70	80	70	

Figura 2.5.- Características principales de los preimpregnados (www.hexcel.com)

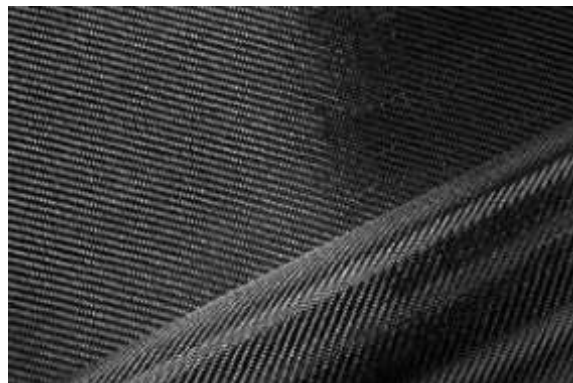


Figura 2.6.- Aspecto de los preimpregnados en forma de tejido (www.hexcel.com)

3.- Juntas híbridas de unión

Como se explica en [1] (Bodjona & Lessard, 2016), hybrid bonding-fastening (a partir de ahora HBF: Hybrid Bonding Fastening) es “una técnica alternativa que está generando interés debido a sus potenciales ventajas sobre las técnicas usadas actualmente en las que unión adhesiva y fijación mecánica son usadas simultáneamente para conectar los componentes”. Hay dos tipos principales de juntas HBF (ambas ilustradas en la Figura 2.7):

- *Juntas híbridas de unión atornilladas y con adhesivo* (a partir de ahora denominadas juntas HBB: Hybrid Bonded-Bolted): mayormente aquellas con tornillos o remaches. Existen muchos tipos de juntas HBB en el mercado, pero la más estudiada es la junta de solape simple cargada con tensión uniaxial, seguramente debido a la existencia de dos especificaciones suyas en estándares (ASTM D1002 and D3165). Además, en la bibliografía analizada, la configuración de fijador/cierre más estudiada es la de una fila una columna de tornillos, porque “elimina muchos efectos complejos e interacciones, permitiendo a los investigadores distinguir cuales son los mecanismos fundamentales que influyen el comportamiento de la junta. Desafortunadamente, no es representativo pues en la mayoría de los casos las juntas suelen tener varias filas y columnas de tornillos”. Si se habla del caso de unión entre metal y material compuesto (también son usadas para unir metal con metal y compuesto con compuesto), CFRP es el material más usado, en forma de cinta o tela preimpregnada.
- *Juntas híbridas de unión mediante pines y adhesivo* (a partir de ahora denominadas juntas HBP: Hybrid Bonded-Pinned): aquellas que utilizan refuerzo con pines a través del espesor. Pueden ser usadas para unir diversas geometrías y materiales como las juntas HBB. “La configuración más estudiada es la junta en T sometiendo el adhesivo a carga de tracción (ensayo de adherencia), aunque en los últimos años se ha venido estudiando también las juntas HBP de solapa simple sometidas a tensión uniaxial”. Las juntas HBP usan un gran número de pines, que normalmente tienen un diámetro menor de 1mm (las juntas HBB normalmente tienen diámetros de entre 5 y 10mm).

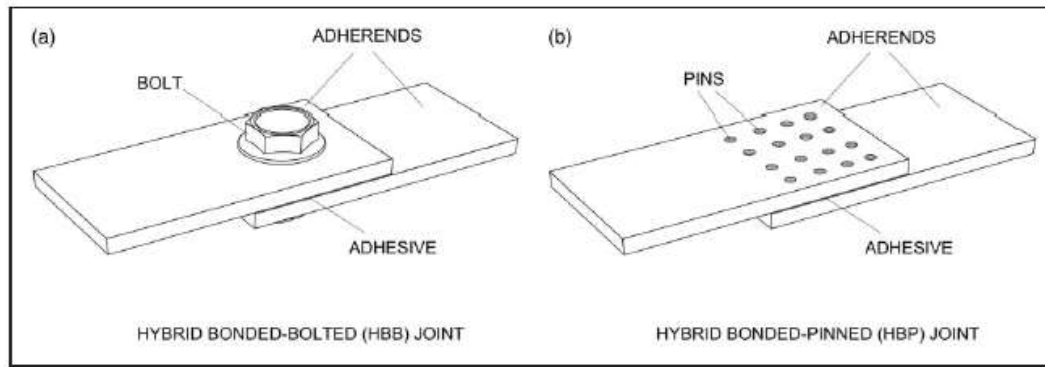


Figura 2.7.- Bodjona, K. and Lessard L. (2016) Tipos principales de juntas HBF

3.1.- Hybrid bonded-pinned joint (HBP)

Teniendo en cuenta que las juntas HBP son sobre las que versa el proyecto, es necesaria una explicación más detallada sobre los principales parámetros que influyen sobre su comportamiento, siempre basándose en [1] (Bodjona & Lessard, 2016).

3.1.1.- Diseño y fabricación de las juntas HBP

Uno de los parámetros más importantes que caracterizan una junta HBP es la densidad de área, que cuantifica la cantidad de pines calculando “la proporción entre el área transversal de los pines y el área total de zona adhesiva de unión”.

Siguiendo con esto, otro parámetro importante es la geometría del pin, que está íntimamente relacionada con los materiales a unir y el proceso usado para fabricarlos. Los pines pueden ser fabricados en casi cualquier material, pero suelen estar fabricados en materiales metálicos, mayoritariamente acero o titanio, o fibra de carbono.

En relación al proceso de fabricación, en uniones de metales y materiales compuestos hay dos opciones: fabricación aditiva (a partir de ahora AM: Additive Manufacturing) en la que normalmente los pines se fabrican en el mismo material que las piezas a unir, o dar forma a los pines directamente sobre el sustrato metálico. Algunas de las técnicas mencionadas en la bibliografía son:

- *Deposición de metal por láser (LMD: Laser Metal Deposition)*, que “proporciona libertad en cuanto a la geometría, permitiendo fabricar formas de pines muy

complejas". Las formas más estudiadas para esta técnica son las que tienen cabeza esférica, en forma de flecha y en forma de cuña.

- *Transferencia de metal en frío (CMT: Cold Metal Transfer)*, basándose en [15] (von H.P.F. Silva, et al., 2015) es una técnica desarrollada por Fronious Company, en la cual "un alambre a una cierta altura es derretido sobre la superficie del sustrato metálico gracias a la aplicación de un cortocircuito de alta corriente. CMT representa una técnica rápida y automática para introducir pequeños refuerzos metálicos en estructuras metálicas". Las formas de pines más estudiadas para esta técnica son las de cabeza esférica, cilíndricos y con cabeza en forma de clavo.

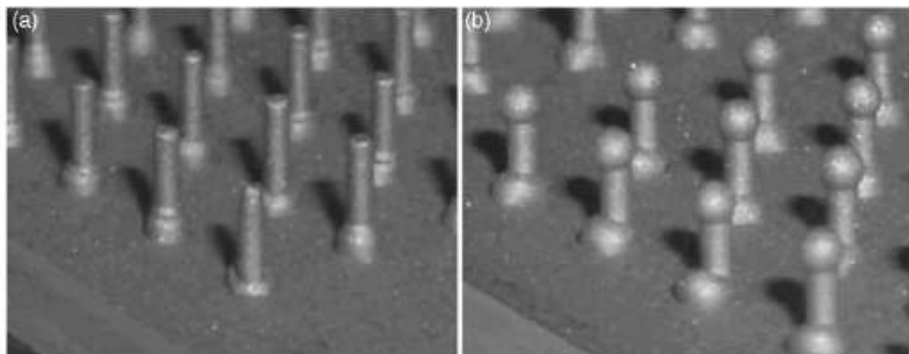


Figura 2.8.- Bodjona, K. and Lessard L. (2016) Pines fabricados usando la técnica CMT

(a) Pines cilíndricos y (b) Pines con cabeza esférica

- *Z-pinning*, basándose en [5] (Silva, et al., 2015) es una técnica patentada por Aztex Corporation, en la cual "varillas o pines cortos extruidos a partir de alambre de material con alta resistencia y rigidez actúan como uñas delgadas capaces de juntar las diferentes capas de laminado mediante una combinación de fricción y adhesión. Los Z-pins se usan en un rango de diámetros de 0.15 a 1 mm y están presentes en el laminado con una densidad volumétrica en el rango del 0.5 al 4%". De acuerdo con [7] (Mouritz, 2007), "UAZ® (Ultrasonic Assisted Z-fibre) es el proceso más común para fabricar pines mediante z-pinning en laminados en grandes cantidades". Un esquema del proceso mencionado se muestra en la Figura 2.9:

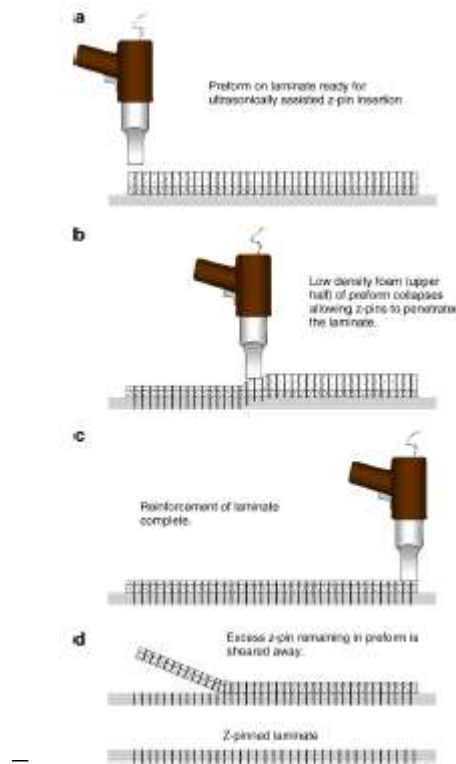


Figura 2.9.- Mouritz, A.P. (2007) Esquema del proceso UAZ®

- *HYPER (HYbrid PEnetrative Reinforcement)*, es la técnica principal en la que se basa este estudio, con lo que una explicación más detallada se hará en los siguientes apartados



Figura 2.10.- Silva, M Tiago et al. (2015) Conjunto de HYPER pines hecho por fabricación aditiva

De acuerdo con [1] (Bodjona & Lessard, 2016), las dos diferencias principales entre fabricar los pines mediante AM o mediante Z-pinning son:

- Los pines fabricados mediante AM no penetran todo el espesor del adhesivo, mientras que los z-pins sí que lo atraviesan completamente
- Los pines fabricados mediante AM están apoyados sobre un sustrato metálico así que su orientación puede ser controlada para que su posición sea perpendicular a la superficie, mientras que los z-pins están simplemente sujetos por la resina y esto causa un ángulo de offset de entre 10 y 30° respecto a la dirección perpendicular

Antes de finalizar este apartado es necesario comentar los principales problemas que surgen durante la fabricación de juntas HBP:

- La técnica suele provocar el engrosamiento de lo adhesivos compuestos
- Formación de zonas ricas en resina alrededor de cada pin porque la resina trata de rellenar los huecos formados donde las fibras han sido apartadas por los pines
- Desalineación de las fibras
- Ondulación de las fibras, causada porque el espesor de las fibras es muy pequeña comparada con la de los pines

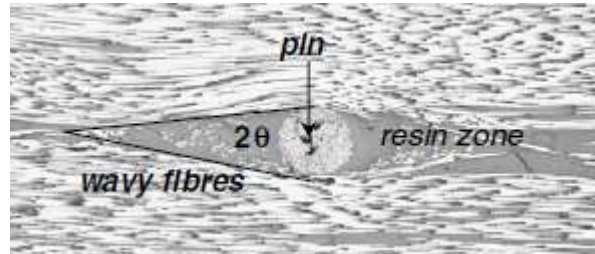


Figura 2.11.- Mouritz, A.P. (2007) Región con ondulación de fibras y zonas ricas en resina alrededor de un z-pin

3.1.2.- Comportamiento elástico e inelástico de las juntas HBP

Normalmente, las juntas HBP son co-curadas, esto significa que la matriz de material como el adhesivo. Como normalmente esta matriz es frágil, “las juntas co-curadas siempre muestran comportamiento lineal elástico hasta la fractura catastrófica”, como se indica en [1] (Bodjona & Lessard, 2016). Teniendo en cuenta esto, al añadir los pines a través del espesor este comportamiento cambia debido a que las grietas, que en una junta como esta

se propagan rápidamente a través de la línea de unión, son punteadas por los pines. Esto puede incluso prevenir la propagación de grietas en algunos casos.

De acuerdo con [1] (Bodjona & Lessard, 2016) “la principal ventaja de una junta HBP es que la propagación de grietas es severamente inhibida, aportándole a la junta con pines una significativa tolerancia al daño”:

- Durante la iniciación de grietas la rigidez de la junta no se ve afectada debido a que la mayoría de la junta se mantiene unida
- Cuando la grieta se ha propagado lo suficiente la rigidez de la junta empieza a reducirse hasta que llega un momento en el que la zona de unión está completamente desunida
- A pesar de que una junta HBP aún puede soportar carga en este punto, la extracción y fractura de los pines ocurrirá en un determinado momento, en el cual la rigidez se reduce, y eso significa que una fractura completa de la junta ha tenido lugar

El comportamiento descrito anteriormente es el de una junta HBP sometida a tensión uniaxial, en la cual la iniciación de grietas no se ve retrasada con respecto a una junta simplemente unida. Para juntas en T con pines el comportamiento es diferente, la rigidez de la junta generalmente no se ve afectada por los pines.

3.1.3.- Resistencia monotónica de las juntas HBP

Los experimentos en los que se basa [1] (Bodjona & Lessard, 2016) fueron llevados a cabo a velocidades de entre 0.5-2 mm/min, así que pueden considerarse cuasiestáticos. Dichos experimentos muestran que la máxima resistencia estática mejora o permanece invariante para una junta HBP, y siempre mejora para una junta en T.

Los principales parámetros que afecta a la resistencia estática de una junta HBP son:

- *Diámetro del pin*: para un valor fijo de densidad de área de pin, en una junta en T es preferible tener muchos pines de pequeño diámetro, mientras que en una junta de solapa simple es preferible tener pines de mayor diámetro
- *Densidad de área de pins*: el 2% es el valor óptimo de contenido de pins para una junta de solapa simple con el objeto de maximizar la resistencia última de la misma.

Sin embargo, valores de entre el 1 y el 4% son fijados en la literatura con el objetivo de obtener mejoras significantes

- *Longitud embebida*: a medida que la longitud embebida aumenta, la resistencia estática de una junta HBP lo hace también, debido a que la intercara entre la matriz y el pin se ve maximizada y con esto el despegue y la extracción de los pines se ven obstaculizadas
- *Rugosidad superficial del pin*: incrementando la rugosidad superficial del pin se incrementa la adhesión y fricción con la matriz y esto dificulta que puedan ser arrancados
- *Geometría de la cabeza del pin*: este parámetro se estudia porque ayuda a prevenir que el pin sea arrancado. En la literatura, en los casos de cabeza esférica y en forma de fleche se evitó el arranque de los pines y éstos fallaron por fractura. En los pines cilíndricos sin cabeza, los pines pueden fallar por ser arrancados de la matriz

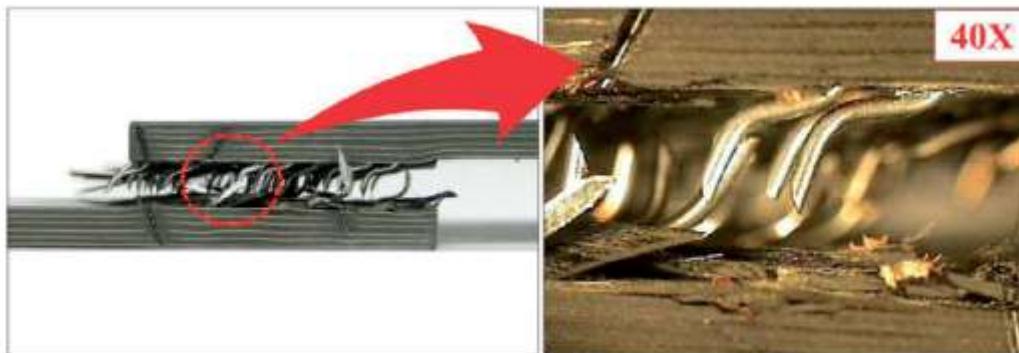


Figura 2.12.- Bodjona, K. and Lessard L. (2016) Fallo por plastificación y arranque de un pin en una junta HBP

En relación a los modos de fallo, el fallo de las juntas HBP es progresivo debido a su tenacidad a la fractura y porque además los pines mejoran la tolerancia al daño de la junta. Sumado a esto, el pequeño diámetro de los pines hace que las concentraciones de tensiones estén más localizadas y tengan valores menores que en las juntas HBB.

La iniciación de la primera grieta en este tipo de juntas se produce a lo largo de la línea de unión de los ejes del solape entre componentes, y se propaga libremente hasta que llega a la primera línea de pines, donde puede que se extienda dentro de los sustratos. A medida

que los pines vayan deformándose plásticamente, la línea de unión irá fallando progresivamente hasta que el fallo último tenga lugar, ya sea por la fractura de los pines o de la sección de sustrato en la que se sitúa la primera línea de pines.

3.1.4.- Resistencia a la fatiga de las juntas HBP

Hay dos formas de obtener la vida a fatiga de una junta HBP, que son:

- A una carga dada, el número de ciclos que conlleva el fallo de la junta
- Valor de la resistencia a 10^6 ciclos, evaluada sobre las curvas S-N

Basándose en [1] (Bodjona & Lessard, 2016), en el caso de carga monotónica, “crack bridging” es el mecanismo más importante de fortalecimiento, el cual ralentiza la propagación de grietas. Una vez la propagación se inicia, va avanzando produciendo un fallo gradual.

A pesar de que no se ha encontrado literatura que verse sobre esto, es lógico pensar que en el comportamiento a fatiga influyen los mismos parámetros que los citados para la resistencia monotónica de las juntas.

3.1.5.- Absorción de energía de las juntas HBP

Una de las principales ventajas de las juntas HBF, ya sean HBB o HBP, es la gran cantidad de energía que son capaces de absorber durante su fractura. Esto se debe a:

- La fricción provocada al tratar de arrancar los pines del material compuesto
- La masiva delaminación que tiene lugar en algunas de las intercaras previamente a la ruptura final

La mayoría de las publicaciones referentes a juntas HBB no tratan el tema de absorción de energía, pero algunas de ellas en las que se basa [1] (Bodjona & Lessard, 2016) dicen que después de someter una junta HBP a un ensayo de impacto, no hubo pérdida de resistencia, lo que las hace muy adecuadas para su uso en aplicaciones en las cuales haya que soportar impactos.

3.2.- Junta HYPER

Desde el año 2007 AIRBUS Group UK ha estado investigando un nuevo tipo de método de unión híbrida, usada específicamente para uniones entre metales y CFRP, y que se denomina HYPER (HYbrid PEnetrative Reinforcement). Esta nueva técnica “consiste en realizar una junta híbrida co-curando un material compuesto y una pieza metálica que contenga un patrón de pines (a partir de ahora llamados HYPINS) sobresaliendo de su superficie”. La mayor diferencia con las otras técnicas descritas en el apartado *Diseño y fabricación de las juntas HBP*, es el proceso de fabricación de los pines, que en este caso es la fabricación aditiva por capas (a partir de ahora ALM: Additive Layer Manufacturing), cuya ventaja principal es que permite “la fabricación de geometrías complejas de una forma rentable económicamente”, y también “proporciona un entrelazado mecánico y adhesión adicional de la resina epoxi alrededor de los pines”, esto último basándose en [6] (Jahn, et al., 2016) . También basándose en [6] (Jahn, et al., 2016), “la fabricación aditiva es ventajosa comparada con la fabricación tradicional de desbaste por la mayor eficiencia de uso del material”.

Basándose en [5] (Silva, et al., 2015), las siguientes mejoras han sido conseguidas con esta técnica:

- En relación al comportamiento a cortante hay una mejora del 128 y del 300% en la carga máxima que son capaces de soportar estas juntas si se las compara con juntas atornilladas y con juntas adhesivas respectivamente
- Hablando sobre la elongación media a máxima carga, el incremento es aproximadamente del 400%
- La energía absorbida puede incrementarse hasta 80 veces si se compara con la que absorbe la misma junta en ausencia de pines
- Hay una significativa mejora en términos de resistencia a esfuerzo cortante, hasta de 6.5 veces
- En relación a la resistencia al arranque y la máxima carga soportada por la junta, las juntas HYPER y las atornilladas muestran un comportamiento similar. El modo de fallo depende de la densidad de área de pines y la geometría del pin ensayado
- No hay problemas de corrosión

- Buen comportamiento frente a cargas de fatiga

3.2.1.- Fabricación de pines mediante fabricación aditiva

La fabricación aditiva tiene como una de sus mayores ventajas la posibilidad de realizar geometrías de alta complejidad si se la compara con técnicas de fabricación tradicionales como el moldeo por inyección y las máquinas CNC. Además, otra de sus ventajas es que en la mayoría de los casos las piezas fabricadas con esta técnica no requieren tratamientos posteriores de mecanización. Cierto es que en algunos casos es necesario realizar tratamientos térmicos con el objetivo de reducir las tensiones residuales y la porosidad.

Dentro de la fabricación aditiva hay diversas técnicas de fabricación según la forma de alimentación de material y la fuente de energía utilizada. En el proyecto bajo estudio, se trata de fabricación aditiva LBM (Laser Beam Melting \equiv Fusión selectiva mediante láser) a partir de cama de polvo. Se parte de un modelo 3D de la pieza que se desea fabricar, que mediante un software se divide en capas de unas pocas micras, para que la máquina vaya fabricando capa a capa la geometría deseada. El proceso para realizar cada capa es el siguiente: se esparce de forma uniforme una fina cama de polvo sobre la plataforma de fabricación para que a continuación la fuente de energía, en este caso un láser, funda el polvo según la geometría del modelo 3D correspondiente. Un esquema del proceso se puede ver en la Figura 2.13:

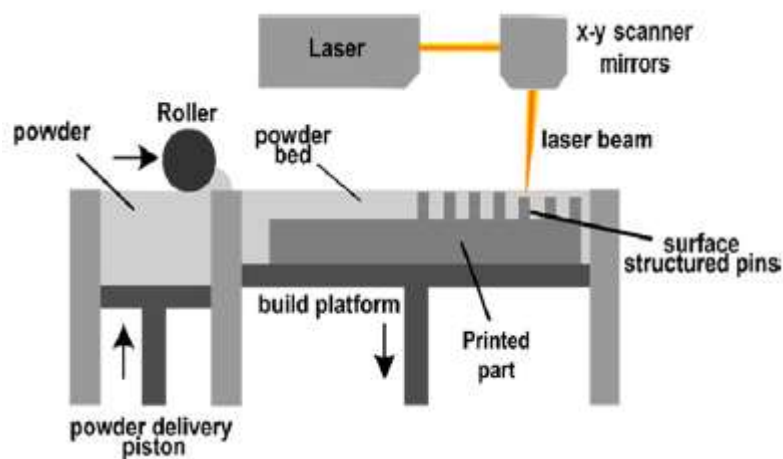


Figura 2.13.- (Feistauer, et al., 2019) Esquema de fabricación aditiva mediante fusión selectiva de láser a partir de cama de polvo

Debido a su libertad a la hora de fabricar geometrías complejas, permite llegar a fabricar diferentes geometrías de los pines a pesar de que su tamaño es muy pequeño comparado con las dimensiones de las partes de unir. Realizar ciertas geometrías sería imposible con cualquier otra técnica de fabricación.

3.2.2.- Métodos de montaje metal-CFRP

Una vez los pines han sido creados sobre la superficie mediante fabricación aditiva, el siguiente paso es el ensamblaje de la parte metálica con el CFRP para formar la junta híbrida. Hay varias técnicas para esta misión, entre ellas destacan tres:

- Moldeo por transferencia de la resina (RTM: Resin Transfer Moulding), que consiste en “ir depositando capas consecutivamente en el sustrato metálico, con la inyección de resina posterior”. El proceso puede dividirse en los siguientes pasos según [17]:
 1. Apertura del molde y colocación del sustrato metálico con los pines ya integrados
 2. Colocación del refuerzo de fibras sobre el sustrato metálico
 3. Cierre del molde
 4. Inyección a presión de la resina y el catalizador a través del molde para impregnar el refuerzo de fibras
 5. Curado de la resina a temperatura ambiente
 6. Apertura del molde y desmolde de la estructura híbrida

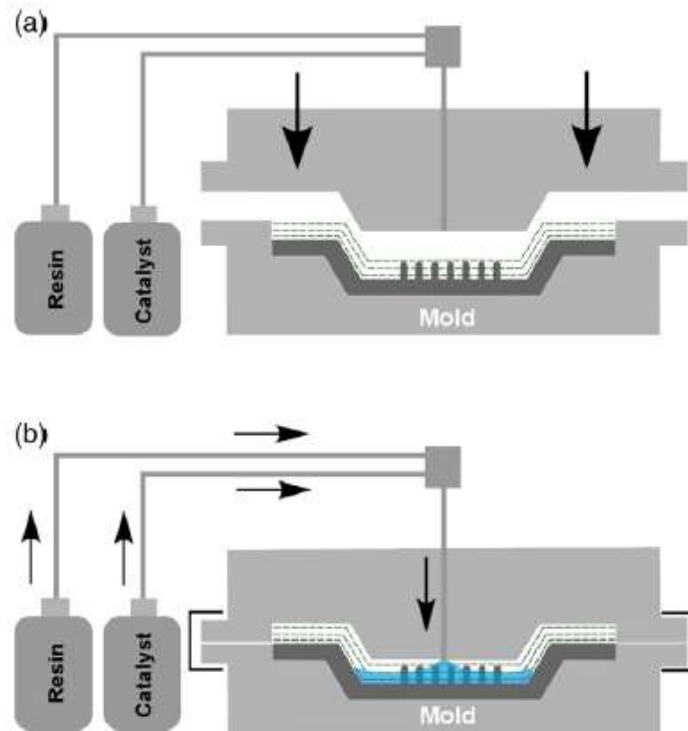


Figura 2.14.- (Feistauer, et al., 2019) Esquema del montaje metal-CFRP mediante RTM

– Introducción de la resina por vacío (VARI: Vacuum-Assisted Resin Infusion): inyección de la resina con refuerzo de fibra seca mediante VARI. Es un proceso industrializado para la fabricación de piezas reforzadas con fibras de alta calidad. El proceso puede dividirse en los siguientes pasos:

1. Colocación del sustrato metálico en un molde abierto
2. Colocación del refuerzo de fibras sobre el sustrato metálico

3. Cierre del molde y sellado del mismo con una bolsa de vacío
4. Conexión del sistema con una bomba de vacío flexible y extracción del aire
5. Inyección de la resina para mojar el refuerzo de fibra
6. Curado del material compuesto a temperatura ambiente

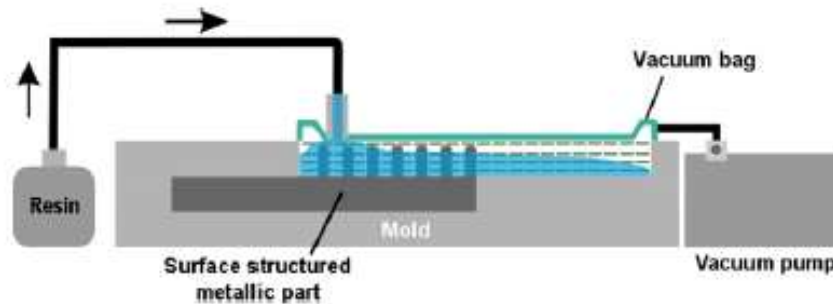


Figura 2.15.- (Feistauer, et al., 2019) Esquema del montaje metal-CFRP mediante RTM

- Ensamblaje con preimpregnados y autoclave: “Uso de sustratos preimpregnados e introducción de los pines en el laminado sin curar con la ayuda de un horno ultrasónico y la consiguiente consolidación en un autoclave”. Es un proceso similar al anterior explicado mediante VARI, puede dividirse en las siguientes fases:
 1. Colocación del sustrato metálico en un molde abierto
 2. Aplicación de las láminas preimpregnadas
 3. Sellado del molde con una bolsa de vacío flexible
 4. Extracción del aire con una bomba de vacío
 5. Curado del ensamblaje en un autoclave sometido a presión y temperatura

3.3.- Principales parámetros influyentes en el comportamiento de las juntas HBP

Aunque ya se han mencionado los parámetros que influyen en la resistencia estática de las juntas HBP, seguidamente se analizarán en detalle los parámetros más influyentes en el comportamiento general de las juntas HBP y los motivos de su influencia:

- *Longitud del pin*: es uno de los parámetros más influyentes ya que su influencia puede ser positiva o negativa según el modo de fractura que se esté analizando:
 - Modo I de fractura: la tenacidad a la fractura y la resistencia a fatiga aumentan con la longitud del pin hasta llegar a una longitud crítica, a partir

de la cual no hay mejora de dichas propiedades debido a una transición en el proceso de delaminación

- Modo II de fractura: la tenacidad a la fractura disminuye al incrementar la longitud del pin hasta una longitud crítica, a partir de la cual no hay más degradación de propiedades. El comportamiento a fatiga no se ve afectado por la longitud del pin en este caso.
- *Diámetro del pin:* en [3] (Nguyen, et al., 2016) se establece que pines de menor diámetro soportan cargas de tracción más elevadas que pines con diámetros mayores.
- *Densidad de área de pines:* por los valores encontrados en la literatura se puede establecer que el rango óptimo de entre el 1 y el 4%, queriendo decir que, por cada centímetro cuadrado de área de junta, como mucho serían necesarios 4 mm^2 de pines para conseguir una gran efectividad de la junta en términos de aumentar la resistencia última de la misma
- *Forma de la sección transversal del pin:* una de las maneras de mejorar para la resistencia al arranque de los pines es aumentando la superficie de los mismos. Esto supone un menor nivel tensional en la intercara entre el pin y el laminado de CFRP durante la fase de deformación elástica y, por lo tanto, una mayor fuerza de despegue. Además, mayores fuerzas de fricción son obtenidas durante el arranque de los pines. Todo esto se menciona en [10] (Hoffmann & Scharr, 2018), donde se analiza el comportamiento de pines de forma prismática rectangular en lugar de la tradicional cilíndrica. Utilizando pines rectangulares, para un mismo valor de contenido en volumen de los mismos, el valor de superficie en contacto con el laminado de CFRP es mayor. Los resultados del estudio indican que se aumenta entre un 59 y un 149% (dependiendo de la forma de colocación de las fibras) la fuerza de despegue y entre un 25 y un 84% la carga máxima soportada por la junta. Todo esto se puede observar en la Figura 2.16:

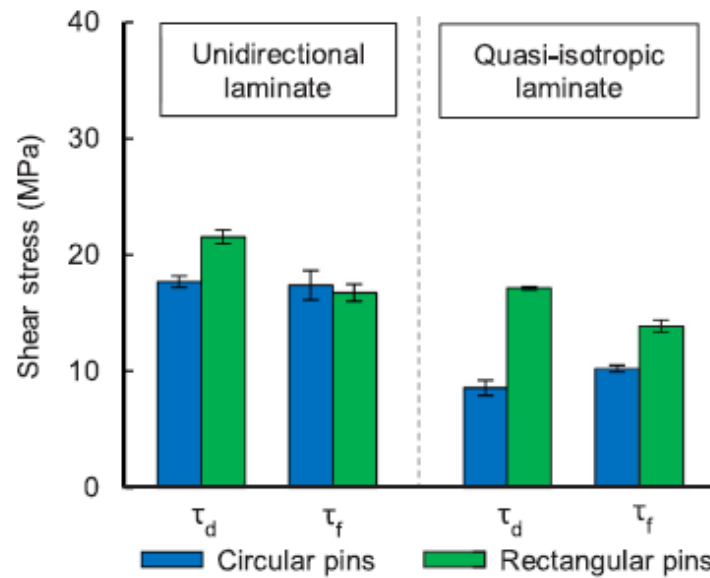


Figura 2.16.- (Hoffmann & Scharr, 2018) Tensiones cortantes soportadas por los pines circulares y rectangulares

- *Inclinación del pin:* otra manera de mejorar la resistencia al arranque de los pines que se estudia en [10] (Hoffmann & Scharr, 2018) es darle una inclinación a los mismos, en la dirección de la fuerza que soportan pero en sentido contrario a ésta. Los valores óptimos del ángulo de inclinación varían entre 20 y 30°.
- *Tratamiento superficial de los pines:* este parámetro influye de manera similar al anterior, pues se basa en la misma idea de que aumentando la superficie de interacción entre el pin y el laminado de CFRP se mejoran las propiedades de delaminación de la junta. Todo esto está basado en [16] (Knopp & Scharr, 2014), dónde se determina que con los tratamientos superficiales adecuados, como plasma o tratamientos criogénicos, se aumenta la superficie de contacto pin-CFRP, aumentando así las posibilidades de enlace químico entre los mismos.
- *Forma de la cabeza del pin:* darle una forma determinada a la cabeza del pin ayuda a prevenir el fallo por arrancamiento de los mismos y hace que el mecanismo de fallo sea la fractura de los pines cuando alcanza su resistencia última.
- *Ratio L/D:* los pines fallan o bien en la intercara metal-CFRP por cortante o por fractura del pin sometido a tracción. Como se explica en [3] (Nguyen, et al., 2016), la transición entre ambos modos de fallo depende de la resistencia del pin, la de la

intercara y de ciertos factores geométricos. Se puede establecer un valor de la relación L/D para el cual se produce la transición entre ambos modos de fallo, que es:

$$\frac{L}{D} = \frac{\sigma_{m\acute{a}x}}{4\tau_{m\acute{a}x}}$$

en la que $\sigma_{m\acute{a}x}$ representa la tensión máxima soportada por el pin bajo tracción y $\tau_{m\acute{a}x}$ representa la tensión tangencial máxima en la intercara metal-CFRP. Los pines con relación L/D mayor que el valor de transición fallarán por fractura del pin. Esto lleva a concluir que es esencial diseñar los pines con un ratio L/D menor a 4 para asegurar que el fallo ocurre en la intercara metal-CFRP, pero no alejarse demasiado del valor de transición, pues con un valor muy bajo de L/D, la junta tenderá a absorber menos energía de la debida, y por lo tanto, a fallar antes.

Capítulo 3: Metodología de trabajo

1.- Investigación y análisis de la literatura existente

Debe tenerse en cuenta que la cantidad de literatura relacionada directamente con el tema del proyecto, que son las juntas híbridas pineadas acero inoxidable-CFRP manufacturadas mediante fabricación aditiva, es muy limitada dado que es un nuevo campo de investigación que está en pleno desarrollo. La mayoría de la literatura encontrada está relacionada con otros materiales, como el titanio, o con otros procesos de fabricación de los pines, como CMT o Z-pinning.

1.- Caracterización micro y macro de las geometrías mediante FEM

El análisis mediante elementos finitos (a partir de ahora FEM: Finite Element Method) es una herramienta que ha sido útil a la hora de decidir cuáles son las geometrías más adecuadas. El objetivo de este análisis era lograr el primer mejor prototipo de la junta. Este tipo de análisis consiste en la aproximación de ecuaciones diferenciales parciales muy complejas haciendo uso de la discretización o subdivisión de una región, sobre la que están definidas dichas ecuaciones, en formas geométricas simples denominadas elementos finitos.

El análisis FEM fue llevado a cabo con la ayuda del software comercial ABAQUS, que permite mallar cada geometría individualmente y someter a cada geometría seleccionada a simulaciones de los ensayos pertinentes. Con los resultados que aportó el análisis, se seleccionaron las geometrías más óptimas de los pines y se comprobó si los resultados coincidían con los esperados antes del análisis.

Se construyó un modelo de un pin individual para cada geometría y posteriormente se sometieron todos al mismo análisis tensional con las mismas condiciones de contorno y cargas aplicadas, para poder hacer posteriormente una comparativa de los resultados aportados por todas las geometrías.

La parte más difícil e importante del análisis FEM es el proceso de mallado, ya que debe ser riguroso y adaptarse a cada geometría para que los resultados del análisis sean fiables y representen de la forma más precisa la realidad. Si se cumple esto, los resultados del análisis FEM sobre pines individuales no solo representarán la realidad, sino que podrán extrapolarse al comportamiento de la junta al completo.







2.- Simulación de pines individuales

2.1.- Selección de geometrías

Basándose en [1] (Bodjona & Lessard, 2016) la longitud y el grosor del pin son los parámetros de máxima influencia junto con el valor de densidad de área de pines. Como en pines individuales es imposible analizar el efecto de la densidad de área, se tomaron los otros dos parámetros como los más importantes, pero no como únicos parámetros. Las geometrías seleccionadas revelaron información sobre la influencia de los siguientes parámetros:

- Longitud embebida del pin
- Grosor del pin
- Forma de la base del pin
- Forma de la cabeza del pin

En la Tabla 3.1

Ref.	Nombre	Long. (mm)	Forma base	Dimensiones base (mm)	Ángulo de inclinación	Forma cabeza	Parámetro de interés
1	Pin cilíndrico	5		$\varnothing=0,4$	0	Chablán	-
2	Pin cilíndrico corto	3		$\varnothing=0,4$	0	Chablán	Longitud embebida
3	Pin cilíndrico grueso	5		$\varnothing=1$	0	Chablán	Grosor
4	Pin con cabeza esférica	5		$\varnothing=0,4$	0	Esfera	Forma cabeza
5	Pin con cabeza de flecha	5		$\varnothing=0,4$	0	Flecha	Forma cabeza
6	Pin rectangular	5		b=0,2 ; h=0,6	0	Chablán	Forma base

y Figura 3.1 se presentan las geometrías seleccionadas, así como sus parámetros principales:







Ref.	Nombre	Long. (mm)	Forma base	Dimensiones base (mm)	Ángulo de inclinación	Forma cabeza	Parámetro de interés
1	Pin cilíndrico	5		$\varnothing=0,4$	0	Chaflán	-
2	Pin cilíndrico corto	3		$\varnothing=0,4$	0	Chaflán	Longitud embebida
3	Pin cilíndrico grueso	5		$\varnothing=1$	0	Chaflán	Grosor
4	Pin con cabeza esférica	5		$\varnothing=0,4$	0	Esfera	Forma cabeza
5	Pin con cabeza de flecha	5		$\varnothing=0,4$	0	Flecha	Forma cabeza
6	Pin rectangular	5		$b=0,2 ; h=0,6$	0	Chaflán	Forma base

Tabla 3.1.-Principales parámetros de las geometrías seleccionadas

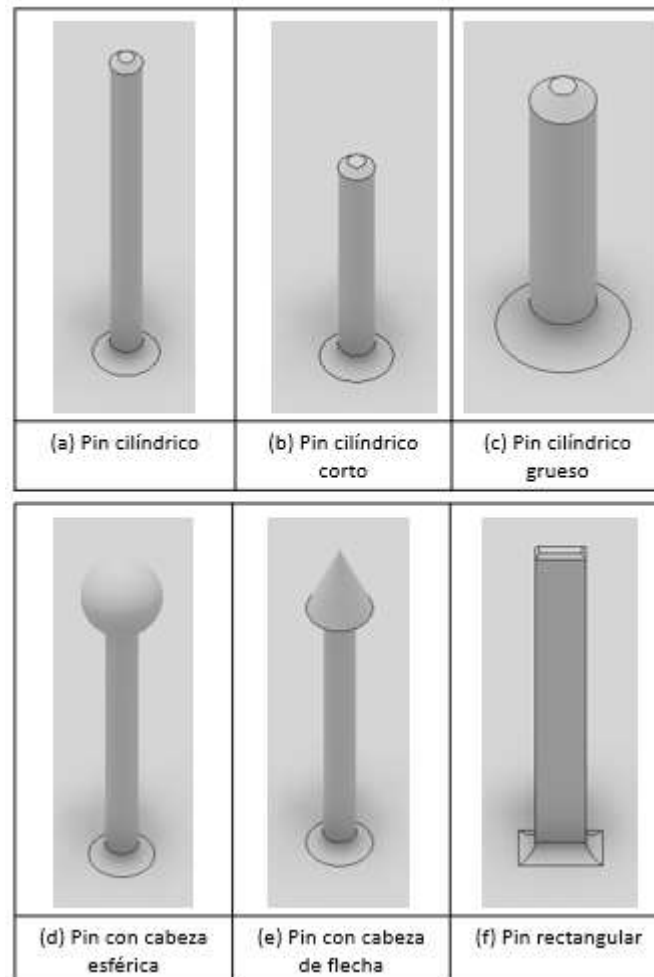


Figura 3.1.- Aspecto de las geometrías de pines seleccionadas

Además de las seis geometrías seleccionadas, que se van a explicar más en detalle posteriormente, se había seleccionado otra que Bodjona, K., & Lessard, L. denominan pin con cabeza en forma de clavo en [1], que se descartó debido a problemas mencionados respecto a su fabricación en la literatura.

2.2.- Ensayos sobre pines individuales

Una vez seleccionadas las geometrías fue el momento de decidir los ensayos a los que se iban a someter los pines y las condiciones de éstos. Basándose en [8] (Vazquez, et al., 2011) se decidió someter a los pines individuales a dos ensayos mecánicos: de tracción/arrancamiento y de cortante. Se someterán todas las geometrías al mismo estado de carga y se compararán los resultados de las simulaciones en términos de tensión máxima de Von Mises soportada por la pieza y qué zona la soporta, y el máximo desplazamiento y en qué zona se produce. Además de esta comparación, se realizará otra, también en términos de tensión y desplazamiento, que se medirán a una cierta altura del cuerpo del pin y de la pieza de CFRP, para poder determinar si el fallo de esa geometría se producirá por la rotura del pin o por la descohesión del pin y las fibras.

Lo primero que se realizó fueron los modelos 3D de todas las geometrías con el software AUTODESK INVENTOR PROFESSIONAL 2018, para después exportar dichas geometrías al software ABAQUS CAE 6.12-1, que fue el utilizado para la simulación de elementos finitos.

Una vez introducidas las piezas correspondientes, fue necesario crear los materiales y asignarlos a sus respectivas piezas. Se crearon dos materiales isotrópicos denominados: acero inoxidable y CFRP. Como el análisis a realizar es elástico-lineal, los datos necesarios para cada material son sus respectivos módulos de Young y sus coeficientes de Poisson que se pueden ver en la siguiente tabla:

	Módulo elástico [MPa]	Coefficiente de Poisson
Acero inoxidable	200000	0,27
CFRP	90000	0,05

Tabla 3.2.- Parámetros de los materiales introducidos en ABAQUS

Se introdujo el material CFRP como isótropo a modo de simplificación. En realidad, las fibras van tejidas en ángulo de 90° de forma entrelazada, con varias capas superpuestas, con lo que no forman un continuo con las mismas propiedades mecánicas en todas las direcciones. Aun así, tomando como referencia los datos del fabricante HEXCEL, el módulo elástico en dirección longitudinal y transversal toma el mismo valor, que es el introducido en ABAQUS.

Para recrear la situación real de las fibras curadas sobre los pines metálicos se optó por realizar una operación de corte de la geometría correspondiente en la pieza de CFRP (Figura 3.2), y a continuación aplicar una restricción tipo TIE, que hace que las dos superficies en contacto no tengan movimiento relativo entre ellas, aunque las mallas de las mismas no sean iguales.

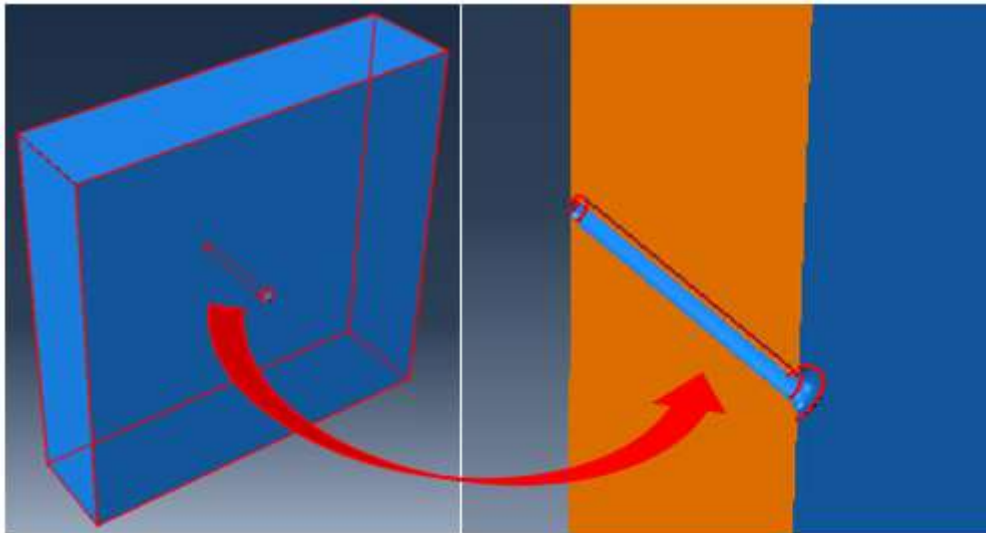


Figura 3.2.- Corte de la geometría del pin en la pieza de CFRP

Esta operación se llevó a cabo en todas las geometrías de los dos ensayos, tanto el de tracción como el de cortante.

2.2.1.- Ensayo de tracción/arrancamiento

El ensayo de tracción se planteó tal como se muestra en la Figura 3.3, fijando la cara inferior de la pieza metálica y aplicando la carga en dirección del eje z sobre la cara superior de la pieza de CFRP. La fijación de la cara inferior se realizó creando una condición de contorno

de tipo ENCASTRE, que impide los movimientos y giros de la superficie especificada respecto de los tres ejes del espacio.

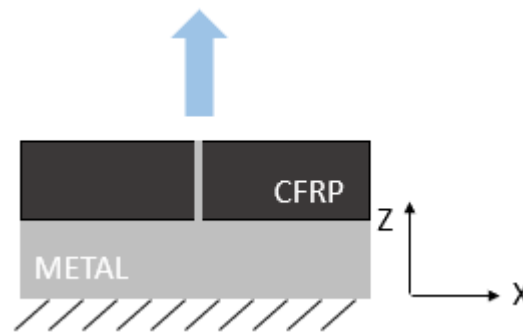


Figura 3.3.- Esquema del ensayo de tracción/arrancamiento

Antes de nada, se decidió el valor de la carga aplicado se decidió en base al área resistente de las diferentes geometrías. Hay tres valores de área resistente diferentes:

$$A_{geometría1,2,4,5} = \pi \cdot 0.4^2 = 0.50 \text{ mm}^2$$

$$A_{geometría3} = \pi \cdot 1^2 = 3.14 \text{ mm}^2$$

$$A_{geometría6} = 0.2 \cdot 0.6 = 0.12 \text{ mm}^2$$

Se quiere que el análisis sea elástico lineal, por lo tanto, la carga aplicada debe estar por debajo de aquella que provocaría el comienzo de la plastificación del material. Tomando como referencia el límite elástico del grado de acero inoxidable 316, que es de 276 MPa, y la menor de las tres áreas resistentes que es la del pin rectangular, se tiene:

$$F = \sigma \cdot A = 276 \text{ MPa} \cdot 0.12 \text{ mm}^2 = 33.12 \text{ N}$$

Se decidió, por lo tanto, usar una carga de 30 N. Dicha carga se introdujo en ABAQUS como una PRESSURE de tipo TOTAL FORCE, lo que significa que se le indica al programa el valor de 30 N y el mismo lo distribuye como una presión uniforme sobre toda la cara superior de la pieza CFRP.

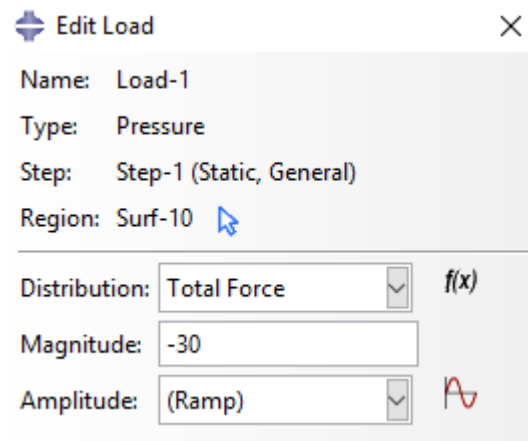


Figura 3.4.- Tipo de carga creada (ensayo tracción)

Las condiciones de contorno y de carga se muestran en la Figura 3.5:

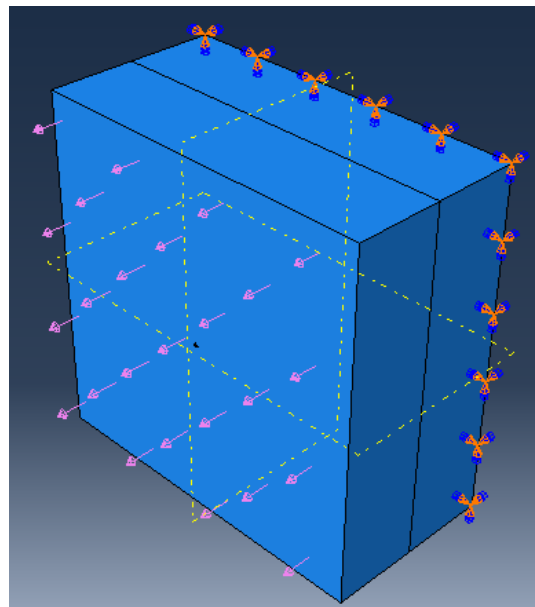


Figura 3.5.- Condiciones de contorno y carga del ensayo de tracción

El siguiente paso fue el mallado de las piezas que iban a tomar parte en la simulación. Se sabía por lo expuesto en la bibliografía que la zona que mayores tensiones iba a soportar era la zona inferior del pin, donde el pin se une al material. Por ello se realizó una malla más fina en esa zona, en concreto en todo el cuerpo del pin y en la zona adyacente al mismo, creando unas particiones circulares concéntricas que ayudasen a la hora de realizar el mallado.

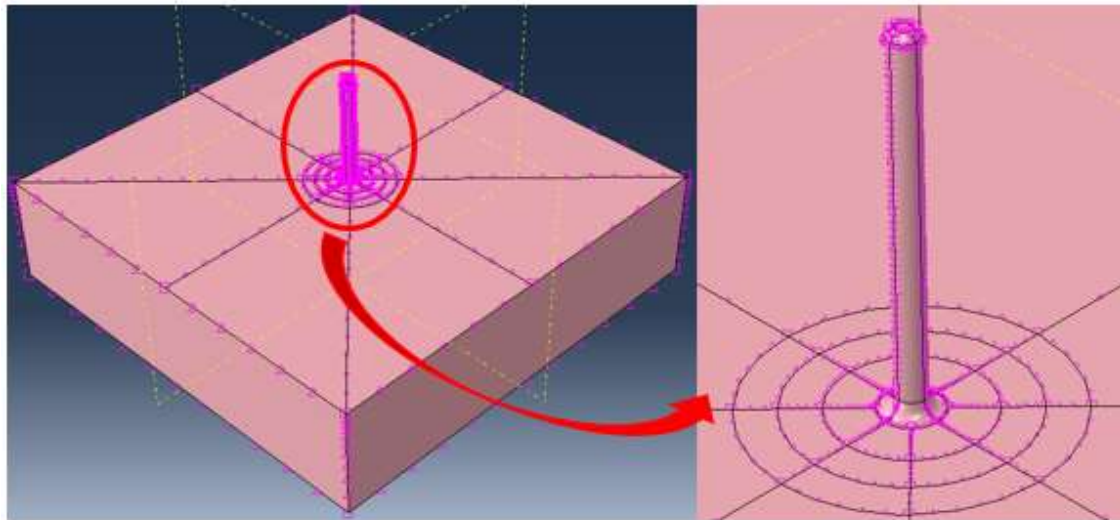


Figura 3.6.- Particiones y divisiones de ejes en elementos previo al mallado
(ensayo tracción)

Como controles de mallado se establecieron elementos tetraédricos (Figura 3.9), con los que la única técnica de mallado es la FREE, que establece una malla libremente siguiendo los SEEDS (divisiones) que se le han marcado previamente. Los SEEDS tienen como función indicarle al software cuantos elementos queremos en una región concreta o que tamaño deben tener éstos. Con esto se consigue tener un mallado más fino en la zona de interés, que es el cuerpo del pin y la zona cercana al radio de acuerdo en el pin y el hueco del pin en la pieza de CFRP, y una malla más gruesa en el resto de la pieza metálica y de la pieza CFRP, tal y como se muestra en la Figura 3.7 y Figura 3.8:

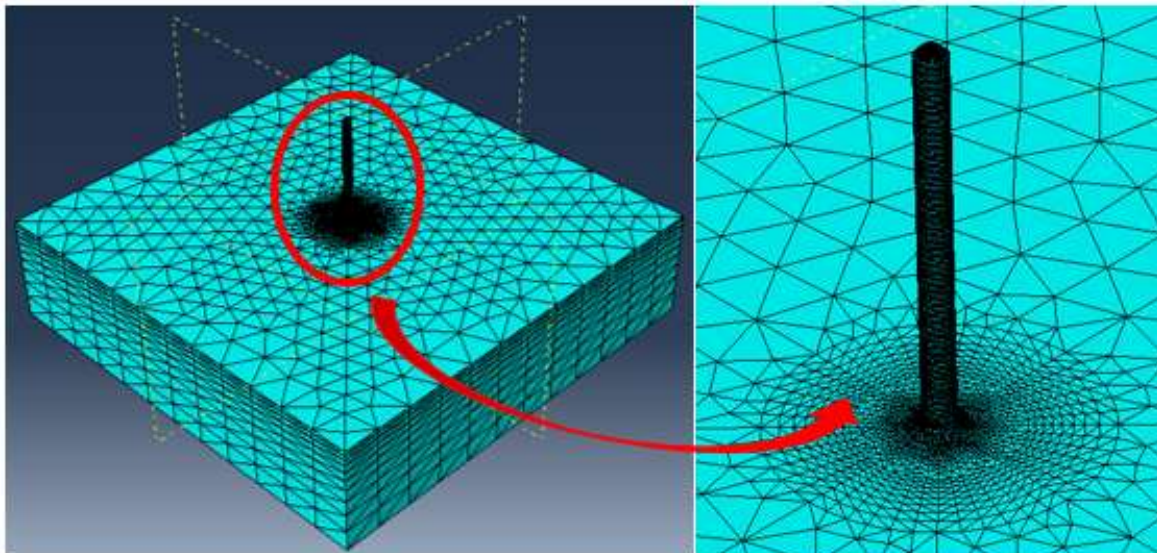


Figura 3.7.- Mallado de la pieza de metal para el ensayo de tracción

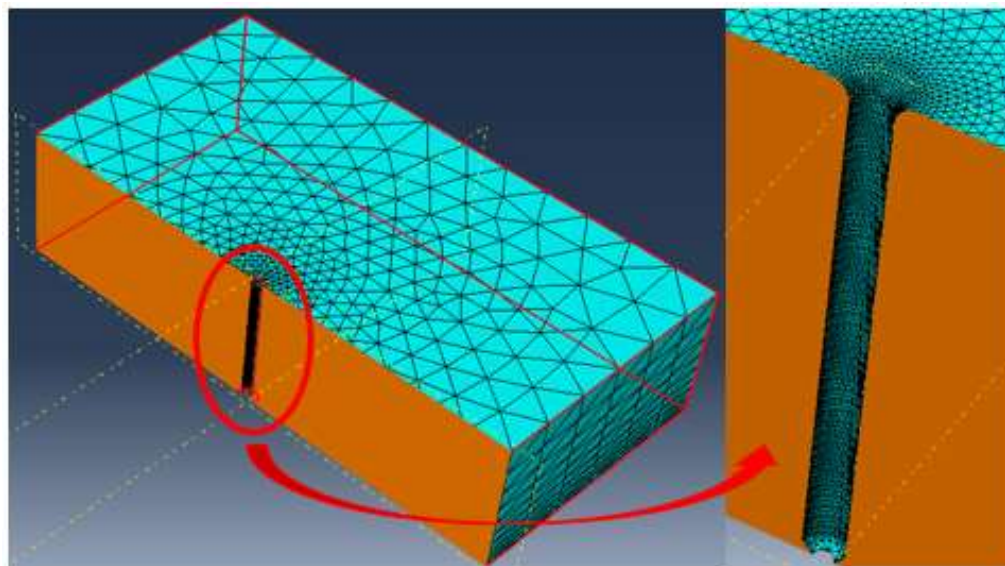


Figura 3.8.- Mallado de la pieza de CFRP para el ensayo de tracción

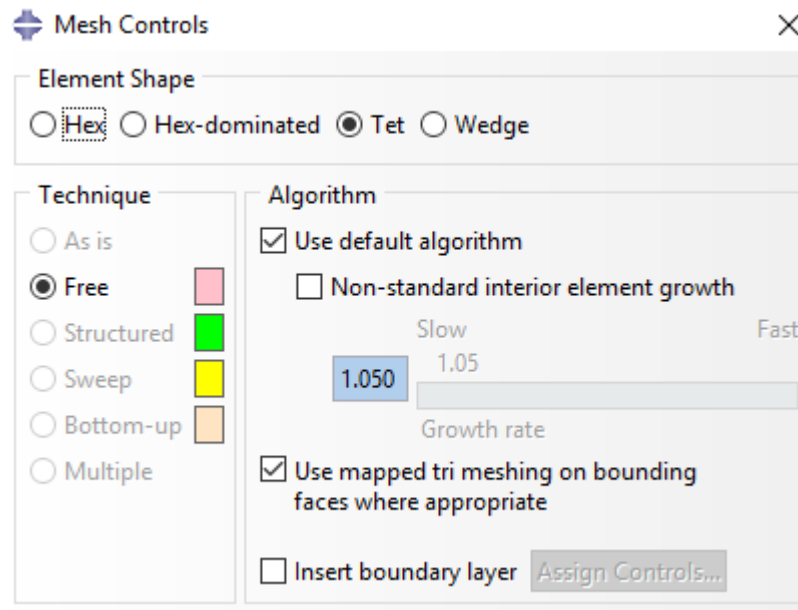


Figura 3.9.- Controles de malla asignados

Respecto al tipo de elementos se eligió elementos 3D Stress pues tenemos un modelo en tres dimensiones en el cual queremos comparar tensiones y desplazamientos. Para un primer análisis se utilizó una interpolación lineal, y una vez comprobado que la simulación realmente funcionada y refinada la malla se estableció una interpolación cuadrática, que siempre aporta resultados más fiables.

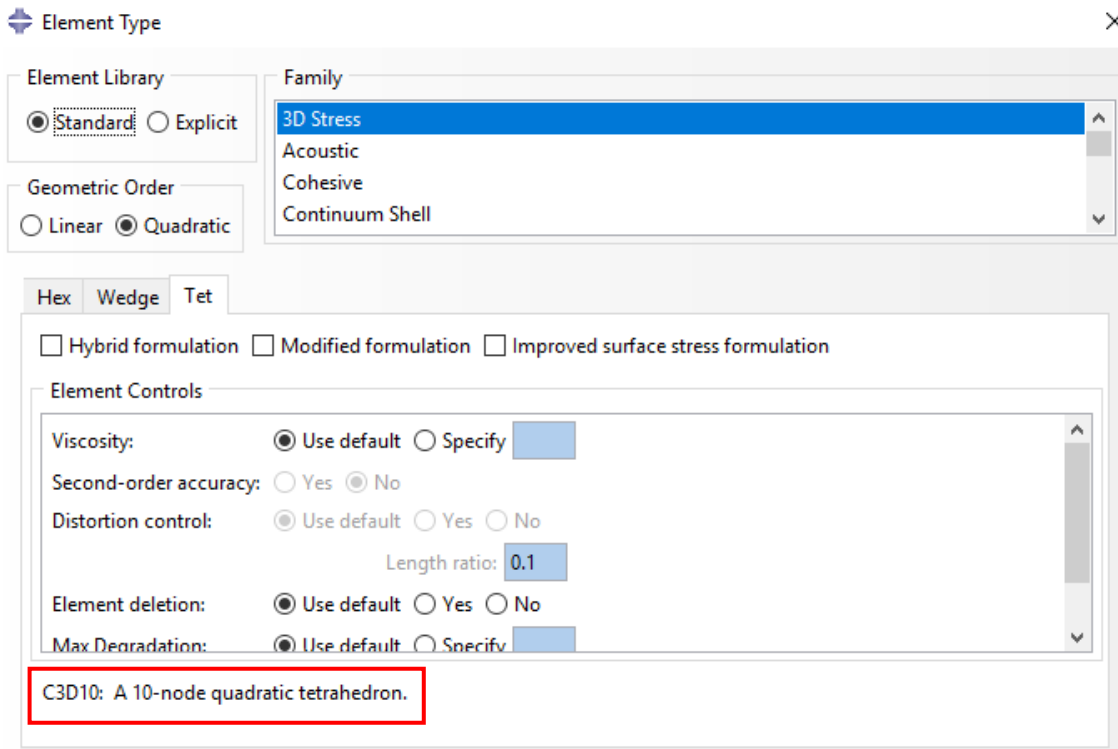


Figura 3.10.- Tipo de elemento asignado

Según la nomenclatura de ABAQUS, los elementos tetraédricos que se usaron en la simulación fueron los C3D10, que visualmente se corresponden con el de la Figura 3.11:

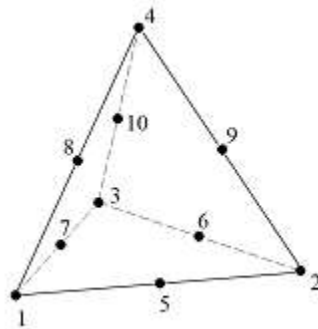


Figura 3.11.- Aspecto de un elemento tetraédrico de 10 nodos

2.2.2.- Ensayo de cortante

El ensayo de cortante se planteó tal como se muestra en la Figura 3.12, fijando la cara lateral de la pieza metálica y aplicando la carga en dirección del eje x sobre la cara lateral de la pieza de CFRP. La fijación de la cara lateral se realizó creando una condición de

contorno de tipo ENCASTRE, que impide los movimientos y giros de la superficie especificada respecto de los tres ejes del espacio.

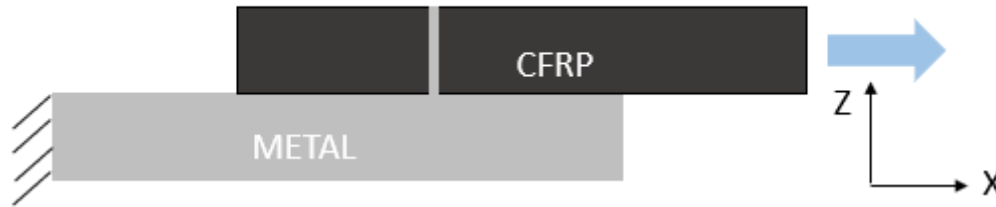


Figura 3.12.-Esquema del ensayo de cortante

Con el objetivo de simular un ensayo de cortante puro, se restringió el movimiento en el eje z de la cara inferior del metal y de la superior del CFRP, para evitar que flecten durante la aplicación de la carga. Además, la carga se introdujo de igual forma que en el ensayo de tracción, simplemente cambiando la superficie de aplicación. Todo esto se muestra en la Figura 3.13:

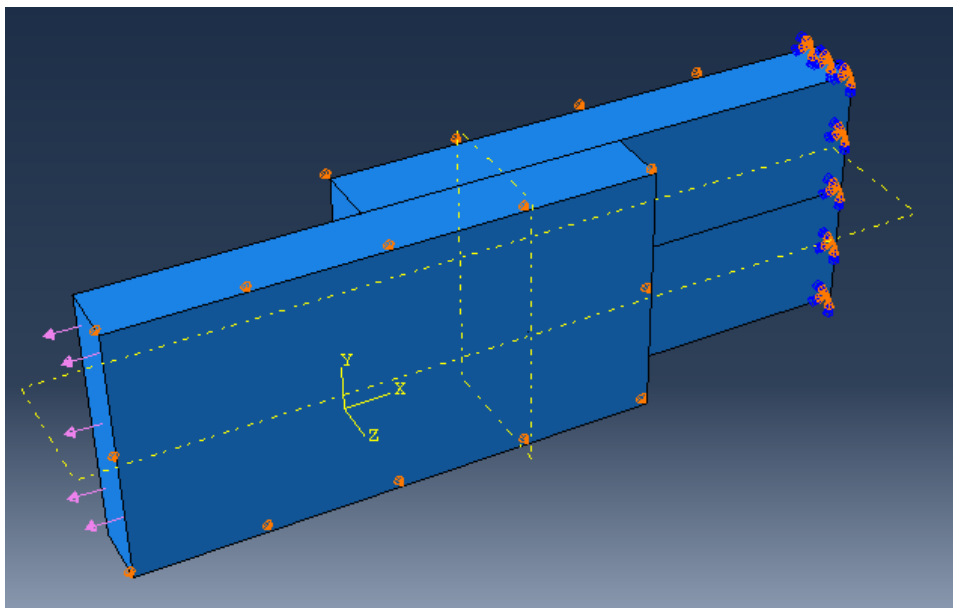


Figura 3.13.- Condiciones de contorno y carga del ensayo de cortante

Respecto al mallado, se realizó de forma equivalente a lo ya explicado para el ensayo de tracción. Se realizaron las mismas particiones y se colocaron los mismos SEEDS, con el objetivo de poder comparar los resultados de todas las simulaciones conjuntamente, tal y como se muestra en la Figura 3.14:

El mallado se realizó de forma equivalente a como se hizo para el ensayo de tracción, es decir, un mallado más fino en la zona de interés, que es el cuerpo de pin y el hueco de éste en la pieza de CFRP y los alrededores del radio de acuerdo; y un mallado más grueso en el resto de la geometría.

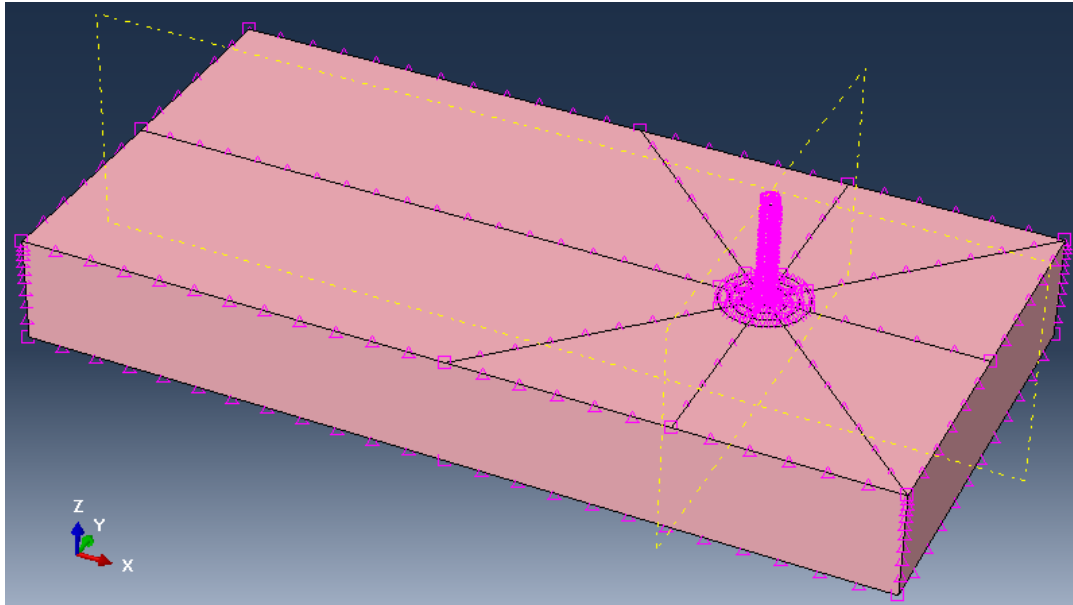


Figura 3.14.- Particiones y divisiones de ejes en elementos previo al mallado
(ensayo cortante)

Se realizó un mallado más fino en la zona de interés, que es el cuerpo de pin y el hueco de éste en la pieza de CFRP y los alrededores del radio de acuerdo; y un mallado más grueso en el resto de la geometría, tal y como se muestra en la Figura 3.15 y Figura 3.16:

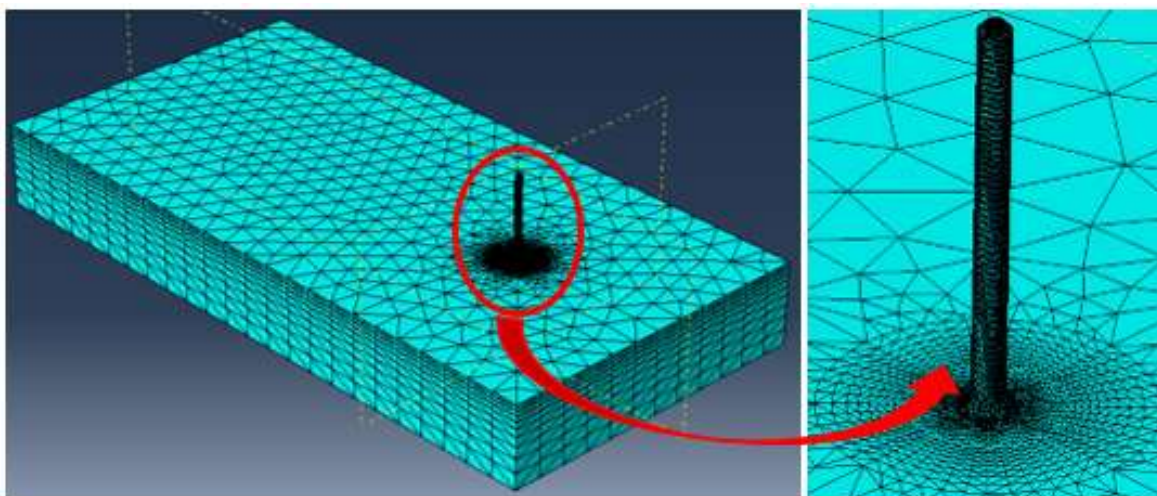


Figura 3.15.- Mallado de la pieza de metal para el ensayo de cortante

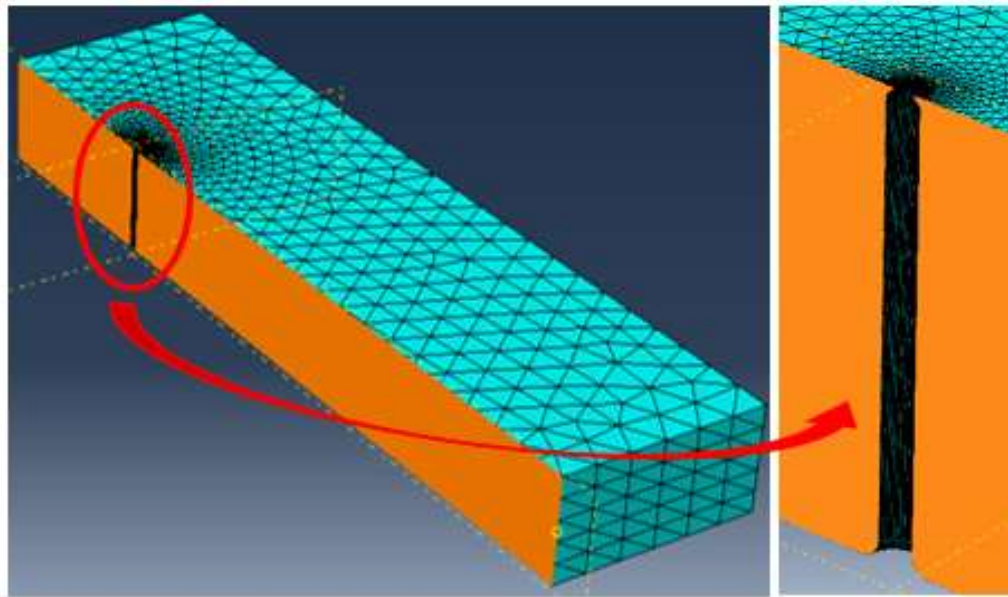


Figura 3.16.- Mallado de la pieza de CFRP para el ensayo de cortante

Una vez finalizado el mallado, se realizaron las simulaciones.

Capítulo 4: Resultados

1.- Ensayos sobre pines individuales

1.1.- Ensayos de tracción

Una vez realizadas las simulaciones de las seis geometrías, se extrajeron los datos más importantes de las mismas. En la Tabla 4.1 y Tabla 4.2 se muestran las tensiones y los desplazamientos máximos de cada simulación. Se puede ver que todos los valores de tensión máxima se dieron en la misma zona en todas las geometrías y lo mismo ocurre con los desplazamientos máximos. Estas tensiones máximas se producen en la mayoría de los casos de manera local cuando hay simetría en las simulaciones. Por lo tanto, se pueden considerar como un problema del mallado y los puntos de contacto más que una tensión real existente en el pin. Esto también se puede tener en consideración en función de la carga puesta y el valor máximo de tensión bajo tracción para el menor área en el pin.

		TENSIONES MÁXIMAS	
		Valor [MPa]	Localización
Geometría 1	Pin cilíndrico	122,30	puntos concretos zona inferior radio acuerdo
Geometría 2	Pin cilíndrico corto	610,40	puntos concretos zona inferior radio acuerdo
Geometría 3	Pin cilíndrico grueso	67,34	puntos concretos zona inferior radio acuerdo
Geometría 4	Pin cabeza esférica	239,90	puntos concretos zona inferior radio acuerdo
Geometría 5	Pin cabeza de flecha	320,00	puntos concretos zona inferior radio acuerdo
Geometría 6	Pin rectangular	404,00	puntos concretos zona inferior radio acuerdo

Tabla 4.1.- Valores y localización de las tensiones máximas en los ensayos de tracción

Los desplazamientos máximos toman valores del mismo orden de magnitud en todas las geometrías y, como todas se dan en la misma zona, esta parte de la simulación no servirá para diferenciar unas geometrías de otras.

		DESPLAZAMIENTOS MÁXIMOS	
		Valor [mm]	Localización
Geometría 1	Pin cilíndrico	4,34E-04	mitad superior cuerpo pin
Geometría 2	Pin cilíndrico corto	7,45E-04	mitad superior cuerpo pin
Geometría 3	Pin cilíndrico grueso	3,75E-04	mitad superior cuerpo pin
Geometría 4	Pin cabeza esférica	4,68E-04	mitad superior cuerpo pin
Geometría 5	Pin cabeza de flecha	4,61E-04	mitad superior cuerpo pin
Geometría 6	Pin rectangular	4,09E-04	mitad superior cuerpo pin

Tabla 4.2.- Valores y localización de los desplazamientos máximos en los ensayos de tracción

Para comparar mejor el comportamiento de las geometrías, se recogieron datos de tensión y desplazamiento, tanto en el metal como en el CFRP, para determinar cuál de las dos piezas soporta mayores esfuerzos. Se tomaron valores a una altura de 1 mm por encima del radio de acuerdo del pin. Los resultados se muestran en la Tabla 4.3:

		PIN		CFRP	
		Tensión zona estudio [MPa]	Despl. zona estudio [mm]	Tensión zona estudio [MPa]	Despl. zona estudio [mm]
Geometría 1	Pin cilíndrico	42	2,00E-04	19	2,00E-04
Geometría 2	Pin cilíndrico corto	43	2,00E-04	20	3,00E-04
Geometría 3	Pin cilíndrico grueso	7	9,00E-05	3	1,00E-04
Geometría 4	Pin con cabeza esférica	44	2,00E-04	22	2,00E-04
Geometría 5	Pin con cabeza de flecha	45	2,00E-04	18	3,00E-04
Geometría 6	Pin rectangular	35	2,00E-04	16	2,00E-04

Tabla 4.3.- Valores de tensiones y desplazamientos del pin y del CFRP en la zona de estudio

Como era de esperar, la geometría 3, que se corresponde con el pin de mayor diámetro, al tener mayor área resistente, las tensiones toman los valores más bajos, tanto en el pin como en el CFRP. En todos los casos las tensiones son más bajas en el CFRP que en el pin. Para determinar si el fallo de la geometría se produce por descohesión del pin y del CFRP o por arrancamiento del pin se tomaron como referencia los valores de [10] (Hoffmann & Scharr, 2018), que establece como valor de fuerza de descohesión aproximadamente los 50 N y como fuerza máxima soportada por el pin, que provocaría la fractura del mismo, unos 80 N. Teniendo en cuenta las áreas resistentes tenemos que las tensiones de descohesión que deberían alcanzarse en el CFRP serían:

$$P_{d-1,2,4,5} = \frac{50 \text{ N}}{0.5 \text{ mm}^2} = 25 \text{ MPa}$$

$$P_{d-3} = \frac{50 \text{ N}}{3.14 \text{ mm}^2} = 16 \text{ MPa}$$

$$P_{d-6} = \frac{50 \text{ N}}{0.12 \text{ mm}^2} = 417 \text{ MPa}$$

En ninguno de las geometrías se alcanza en el CFRP el valor de la tensión de descohesión, por lo que el fallo no se produce por este mecanismo.

Teniendo en cuenta las áreas resistentes tenemos que las tensiones que deberían alcanzarse en los pines para la fractura del mismo son:

$$P_{d-1,2,4,5} = \frac{80 \text{ N}}{0.5 \text{ mm}^2} = 40 \text{ MPa}$$

$$P_{d-3} = \frac{80 \text{ N}}{3.14 \text{ mm}^2} = 25.5 \text{ MPa}$$

$$P_{d-6} = \frac{80 \text{ N}}{0.12 \text{ mm}^2} = 667 \text{ MPa}$$

Por lo tanto, las geometrías 1, 2, 4 y 5 habrían ya fallado por fractura del pin, mientras que las geometrías 3 y 6 no habrían llegado a ninguno de los dos mecanismos de fallo.

Todas las geometrías, salvo la 3, tienen valores de tensiones y desplazamientos similares, tanto en el pin como en el CFRP. Como no hay ninguna que destaque para bien o para mal, pasaremos a analizar los resultados de los ensayos de cortante que complementarán la información de tracción y que nos permitirá mejorar el criterio para elegir las geometrías más adecuadas.

Los resultados de todas las simulaciones de las geometrías se encuentran recogidos en Anexos.

1.2.- Ensayos de cortante

Una vez realizadas las simulaciones de las seis geometrías, se extrajeron los datos más importantes de las mismas. En la Tabla 4.4 y Tabla 4.5 se muestran las tensiones y los desplazamientos máximos de cada simulación. En este caso no todos los valores de tensiones máximas aparecen en la misma zona, así como tampoco lo hacen los

desplazamientos máximos. De hecho, en las geometrías 1 y 7 la tensión máxima aparece en el CFRP, cosa que en los ensayos de tracción no sucedía. Además, destaca que las tensiones máximas en las geometrías 2 y 3 se disparan, si bien es cierto que esos valores tan elevados solo aparecen en unos puntos concretos y no son representativos del estado tensional completo de las piezas.

		TENSIONES MÁXIMAS	
		Valor [MPa]	Localización
Geometría 1	Pin cilíndrico	141,50	alrededor zona inf radio acuerdo CFRP
Geometría 2	Pin cilíndrico corto	31100,00	puntos concretos zona inf radio acuerdo
Geometría 3	Pin cilíndrico grueso	43490,00	puntos concretos borde chaflan superior pin
Geometría 4	Pin cabeza esférica	309,30	alrededor zona inf radio acuerdo
Geometría 5	Pin cabeza de flecha	837,80	puntos concretos zona inf radio acuerdo
Geometría 6	Pin rectangular	514,00	esquinas inferiores radio de acuerdo pin y CFRP

Tabla 4.4.- Valores y localización de las tensiones máximas en los ensayos de cortante

Los desplazamientos toman valores del mismo orden de magnitud que en tracción, salvo en las geometrías 2 y 3. Aun tomando valores mucho mayores, el mayor desplazamiento encontrado no supera las dos décimas de milímetro, con lo que se trata de valores muy bajos.

		DESPLAZAMIENTOS MÁXIMOS	
		Valor [mm]	Localización
Geometría 1	Pin cilíndrico	6,72E-04	mitad CFRP cercana carga
Geometría 2	Pin cilíndrico corto	7,13E-02	mitad superior cuepro pin
Geometría 3	Pin cilíndrico grueso	1,19E-01	mitad CFRP cercana carga
Geometría 4	Pin cabeza esférica	7,10E-04	mitad CFRP cercana carga
Geometría 5	Pin cabeza de flecha	7,67E-04	zona CFRP cercana carga
Geometría 6	Pin rectangular	6,45E-04	mitad CFRP cercana carga

Tabla 4.5.- Valores y localización de los desplazamientos máximos en los ensayos de cortante

Para comparar mejor el comportamiento de las geometrías, se recogieron datos de tensión y desplazamiento, tanto en el metal como en el CFRP, para determinar cuál de las dos piezas está más sometida en cada geometría. Se tomaron valores en la zona central del cuerpo del pin para evitar comparar resultados en zonas donde las tensiones se vean

amplificadas, como puede ser el radio de acuerdo que actúa como concentrador de tensiones. Los resultados se muestran en la Tabla 4.6:

		PIN		CFRP	
		Tensión zona estudio [MPa]	Despl. zona estudio [mm]	Tensión zona estudio [MPa]	Despl. zona estudio [mm]
Geometría 1	Pin cilíndrico	16	4,00E-04	7	4,00E-04
Geometría 2	Pin cilíndrico corto	1900	4,90E-02	900	5,10E-02
Geometría 3	Pin cilíndrico grueso	600	1,00E-02	0,3	1,18E-01
Geometría 4	Pin con cabeza esférica	19	5,00E-04	8	5,00E-04
Geometría 5	Pin con cabeza de flecha	17	5,00E-04	7	5,00E-04
Geometría 6	Pin rectangular	20	4,00E-04	3	4,00E-04

Tabla 4.6.- Valores de tensiones y desplazamientos del pin y del CFRP en la zona de estudio

Se ve que en este caso la geometría que peor se comporta es la número 2, ya que alcanza valores muy elevados de tensión tanto en el pin como en el CFRP, que podrían deberse a una menor longitud embebida del pin en la resina a una menor área de contacto metal-CFRP. La geometría número 3 soporta también tensiones muy altas, con lo que ya se pueden descartar estas dos geometrías como óptimas.

Se vuelve a cumplir que las tensiones en el CFRP son menores que en el pin en todas las geometrías, y los desplazamientos son de orden similar en ambas piezas.

Eliminando las geometrías 2 y 3, quedarían las cuatro restantes como las mejores de cara a simular el comportamiento de junta, ya no con un solo pin sino con un conjunto de ellos.

Al igual que en tracción, los resultados de todas las simulaciones de las geometrías se encuentran recogidos en Anexos.

Capítulo 5: Conclusiones

El gran avance de los materiales compuestos en los últimos años, y en concreto de los polímeros reforzados con fibra, ha permitido su introducción en campos como la aeronáutica, en los que sus propiedades, combinadas con las de un material metálico permiten aligerar el peso de grandes estructuras. Así es como surgieron las juntas híbridas metal-polímero, y más en concreto las juntas HYPER, patentadas por AIRBUS GROUP UK y que tienen como punto diferencial manufacturarse mediante fabricación aditiva. Esto conlleva un gran ahorro de material, así como la posibilidad de fabricar geometrías muy complicadas que con cualquier otro proceso de fabricación sería imposible.

A este respecto, y con el objetivo de elevar las propiedades mecánicas de las juntas hasta el máximo posible, se comenzó con el estudio de los parámetros de la geometría de los pines que más influyen en su comportamiento estático y dinámico, descubriendo que, de todos ellos, los más influyentes son: la longitud del pin, el diámetro del mismo, el ratio entre su longitud y su diámetro, la densidad de área de pines, la forma de la cabeza y la forma de la sección transversal. Además, como parámetros secundarios y menos influyentes se encuentran la inclinación del pin y el tratamiento superficial del mismo.

El diseño de las diferentes geometrías que se sometieron a simulación mediante elementos finitos se basó en los parámetros mencionados anteriormente, y se optó por simular las seis geometrías que más parámetros aunaban, con el objetivo de determinar los más influyentes.

Las simulaciones confirmaron parte de lo supuesto, como que la longitud del pin en uno de los parámetros más determinantes (de ahí que la geometría del pin más corto sea la que peor resultados aporte), y que al aumentar el área de contacto entre metal y CFRP con el uso de pines rectangulares, los resultados son más satisfactorios. Además, con los resultados de los ensayos de tracción puede concluirse que dar una forma a la cabeza del pin, ya sea esférica o en forma de flecha, ayuda a mejorar el agarre pin-CFRP y dificulta el fallo por descohesión del pin y la matriz polimérica.

El efecto del diámetro del pin, que en teoría no debería tomar valores tan altos como en la geometría 3, queda un poco indeterminado, pues mientras en el ensayo de tracción es el que mejores resultados aporta, debido a su mayor sección transversal, en el ensayo de cortante es uno de los que mayores tensiones sufre tanto en el metal como en el CFRP. Habría que ver su comportamiento en forma de junta con varios pines, para clarificar si es una geometría óptima o no.

Capítulo 6: Líneas futuras

Respecto a las simulaciones, podría mejorarse en investigaciones futuras el tipo de contacto entre las superficies del metal y el CFRP, intentando crear una unión cohesiva, que sería más fiel a la realidad. También se podría intentar modelar como material compuesto tejido a capas el CFRP, pues aunque tiene un comportamiento casi isótropo como el supuesto en este proyecto, realmente no es un bloque de material continuo tal y como se modeló en este caso.

Para concluir, destacar que este proyecto se establece como una primera fase de una línea de investigación completa, que conllevaría investigaciones posteriores en las que se realicen los estudios de juntas completas y no de pines individuales. En eso consistiría la segunda fase de investigación, llevando a una tercera que supondría la fabricación de las juntas que mejores resultados hayan mostrado y la realización de ensayos de tracción y cortadura.

Capítulo 7: Presupuesto

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se ha desglosado el presupuesto del trabajo realizado en sus diferentes partidas:

Concepto	Cantidad (ud)	Precio unitario (€)	Importe (€)
Estudio de la documentación previa	300	40	12000
Horas de trabajo simulación	300	40	12000
Amortización de software	0,25	7000	1750
Coste total antes impuestos			25750
Impuesto (21% IVA)			5407,5
COSTE TOTAL (€)			31157,5

Tabla 7.1.- Desglose del presupuesto

En la partida *Amortización de software*, el precio unitario de 7000€ se corresponde con la licencia anual del software, y la cantidad de 0.25 se corresponde con el período de tres meses durante el cual se han realizado las simulaciones.

Capítulo 8: Bibliografía

- [1] Bodjona, K., & Lessard, L. (2016). Hybrid bonded-fastened joints and their application in composite structures: a general review. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 1-18.
- [2] Nguyen, A. T., Amarasinghe, C. K., Brandt, M., Feih, S., & Orifici, A. C. (2017). Loading, support and geometry effects for pin-reinforced hybrid. *Composites*, 192-206.
- [3] Nguyen, A. T., Brandt, M., Feih, S., & Orifici, A. C. (2016). Pin pull-out behaviour for hybrid metal-composite joints with integrated. 160-172.
- [4] Parkes, P., Butler, R., Meyer, J., & Oliveira, A. d. (2014). Static strength of metal-composite joints with penetrative. 250-256.
- [5] Silvaa, M. T., Camanho, P. P., Marquesa, A. T., & Castro, P. M. (2017). 3D-reinforcement techniques for co-bonded CFRP/CFRP and CFRP/metal joints: a brief review. *Ciência & Tecnologia dos Materiais*, 102-107.
- [6] Jahna, J., Weebera, M., & Steinhilper, J. B. (2016). Assessment strategies for composite-metal joining technologies – A review. *CIRP*, 689-694.
- [7] Mouritz, A. (2007). Review of z-pinned composite laminates. *Composites*, 2383-2397
- [8] Vazquez, J. T., Castanié, B., Barrau, J.-J., & Swiergiel, N. (2011). Multi-level analysis of low-cost Z-pinned composite joints: Single Z-pin behaviour. *Composites*, 2070-2081.
- [9] Vazquez, J. T., Castanié, B., Barrau, J.-J., & Swiergiel, N. (2011). Mutil-level analysis of low cost Z-pinned composite joints: Joint behaviour. *Composites*, 2082-2092.
- [10] Hoffmann, J., & Scharr, G. (2018). Pull-out performance of rectangular z-pins in hot-cured carbon fiber reinforced laminates. *Composite structures*, 62-67.
- [11] ASTM Designation: D5898. (2014). Standard test method for lap shear adhesion for fiber reinforced plastic bonding.
- [12] ASTM D-790, 2017. Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials.

- [13] Budhe, S., Banea, M., Barros, S. d. & Silva, L. d., 2017. An updated review of adhesively bonded joints in composite materials. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, pp. 30-42.
- [14] Mouritz, A., 2008. Tensile fatigue properties of 3D composites with through-thickness reinforcement. *Composites Science and Technology*, pp. 2503-2510.
- [15] von H.P.F. Silva, M. T., Camanho, P. P., Marques, A. T. & Castro, P. M., 2015. 3D-reinforcement techniques for co-bonded CFRP/CFRP and CCRP/metal joints. *Ciência & Tecnologia dos Materiais*, pp. 102-107.
- [16] Knopp, A. & Scharr, G., 2014. Effect of z-pin surface treatment on delamination and debonding properties of z-pinned composite laminates. *Journal of Materials Science*, pp. 1674-1683.
- [17] Feistauer, E. E., Santos, J. F. d. & Amancio-Filho, S. T., 2019. A review on direct assembly of through-the-thickness reinforced metal-polymer composite hybrid structures. *Polymer engineering and science*.
- [18] Jansson, A. & Pejryd, L., 2019. Dual-energy computed tomography investigation of additive manufacturing aluminium-carbon-fibre composite joints. *Heliyon*.

Capítulo 9: Anexos

