

Desarrollo de Componentes Estructurales mediante Impresión 3D
de Composite de Fibra Continua para la Absorción de Energía en
caso de Impacto

Unai Morales Diez

Directores de Tesis:

Dr. Jon Aurrekoetxea Narbarte

Dr. Aritz Esnaola Arruti



Tesis dirigida a la obtención del título de **DOCTOR**
por MONDRAGON UNIBERTSITATEA

Departamento de Mecánica y Producción Industrial
Mondragon Unibertsitatea

Julio 2021

DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD

Declaro a través de este documento que esta tesis, y el trabajo presentado en ella con sus resultados han sido realizados totalmente por mí, en la Línea de Investigación de Plásticos y Composites del Departamento de Mecánica y Producción Industrial de la Escuela Politécnica Superior de Mondragon Unibertsitatea.

Unai Morales Diez

(Julio 2021)

Propiedad intelectual y autorización de reproducción:

La propiedad intelectual de esta tesis es de Unai Morales Diez, 2021.

Autorizo a Mondragon Unibertsitatea para reproducir esta tesis doctoral, en parte o en su conjunto, a petición de otras instituciones o personas para el propósito de investigación académica.

Para mis padres

*porque me enseñasteis a
luchar por un sueño,
porque os lo debo todo.*

A mis hermanos

*porque compartís mis sueños
e ilusiones,
porque siempre estáis ahí.*

Olaia y Markel

*porque sois el sol y la luna
que me ilumináis el camino.*

Y para Haizea

*porque eres todo para mí,
porque me complementas,
porque te amo.*

AGRADECIMIENTOS

Quisiera expresar por medio de las siguientes palabras mi enorme gratitud a amigos y compañeros que habéis estado a mi lado durante estos años de proyecto personal y a la vez compartido con todos vosotros. Me habéis dado alas cuando no podía volar, me habéis aportado luz cuando necesitaba claridad y me habéis alentado para alcanzar la meta, hasta el final.

Primeramente, agradecer a Eskola y al grupo de investigación de Plásticos y Composites haber apostado por Mikel y por mi para liderar la línea de impresión 3D con estas dos tesis. Junto hemos descubierto un nuevo enfoque de concebir los composites y de diseñar en ingeniería. Fruto de ello, es el nacimiento del Master de Fabricación Aditiva.

Seguro que me olvido de algunas personas, pero quisiera destacar a mis directores Aritz y Jon por su dedicación y constancia, habéis logrado crecer en mí el espíritu crítico e investigador a través de cada uno de los retos planteados en la tesis, gracias de verdad. A mis compañeros Lauren, Mikel, Mariasun, Maider, Iván, Iosu, Julen e Imanol por vuestro apoyo incondicional y vuestro ánimo para sacar la tesis adelante.

Quisiera hacer una mención especial a las *3D Women* (Udane, Itxaro, Idoia, Giorgia y June), que gracias a vuestras ganas de aprender y trabajar habéis hecho del laboratorio un lugar desarrollo tanto profesional como personal. A mis chicos, Kerman, Egoitz y David que entre risas y simulaciones pusimos en marcha la optimización topológica y desde entonces no hemos parado. A mis emprendedoras Maite y Laida siempre dispuestas a escuchar y defender mis ideas empresariales por muy descabelladas que fueran. A ti Maria que compartimos la ilusión de emprender este camino juntos, por apoyarme durante todo este tiempo.

Tengo claro hacia dónde voy, pero no puedo olvidar de dónde vengo. Por ello no puedo olvidarme de vosotras Cris, Sonia y Amaia que me involucrasteis en el mundo de las poliamidas; de Jorge, Pablo y Mikel que siempre estuvisteis al teléfono o esperándome con una cerveza.

Tampoco me puedo olvidar de vosotros Sharon y Eloi que con tanto mimo habéis traducido mis ideas, volviéndolas léxica y gramaticalmente elegantes y hermosas. Milaesker benetan. Thank you. Gracias.

LABURPENA

Etorkizuneko materialei eta fabrikazio prozesuei buruzko ezaguera sortzeak gizarteak dituen erronka nagusiei erantzungo dizkieten balio erantsi handiko produktuak garatzeko balio izango du. Produktuen pertsonalizatzea, fabrikazioaren digitalizazioa edo ekonomia zirkularra (EC) fabrikazio gehigarriak (AM) erantzun diezaikeen erronka horietako batzuk dira.

Gaur egun, diseinu jasagarria da ibilgailuetako osagaien garapenean, ildoetatik bat eta diseinu arinak, energia aurrezteak eta lehengaien erabilera eraginkorrak ikerketa anitz izan dituzte. Dena den, ingurumenaren aldeko kezkarekin batera, segurtasunak faktore kritikoa izaten jarraitzen du eta talkak diren egoeretan ibilgailuko bidaiarien segurtasuna bermatu edo hobetzen saiatu behar dute fabrikatzaileek. Horregatik, diseinu geometriko konplexuaren bidez, energia xurgatze propietateak gehitzea eta cFRTP material konposatuko egitura zuntzen orientabide ez konbentzionalak tesi honen helburu nagusi dira. Horretarako, konposite-ko AM teknologien bidez, aurretik definituta dituzten propietateak edo programatu daitezkeen egituren eta metamaterialen kontzeptu berriak aztertu eta garatu dira, ibilgailuaren egituraren barruan berariazko beharrak/funtzionaltasunak betetzen dituztenak. cFRTP (cCF/PA, cGF/PA y cKF/PA) egituren fabrikazioari dagokienez, zuntz jarraituzko 3D – FFF inprimaketak diseinuaren askatasun eta malgutasun handiagoa ematen du, kargaren norabidean zuntza bideratzeari aukera ematen baitio.

Beraz, lan honek funtsezko hiru bloketan ezaguera sortzeari ekin dio:

Lehen blokea ondorengo honetan ardaztu da: profil diseinu geometrikoaren bidez fabrikatutako egitura-osagaien energia xurgatzeko propietateen gehikuntzan eta zuntz jarraituzko inprimaketa ibilbideak hautatzen. Horretarako, karakterizazio mikroestruturala eta FFF prozesua dela bide inprimaketa akatsen identifikazioa burutu dira eta baita aztertu ere geometria-erlazioa (Fold perfila), zuntzaren inprimaketa patroia eta errefortzu zuntz mota (karbonoa, beira eta Kevlar[®]) aipatutako akatsen sorreran. Halaber, inprimatutako profilen kolapso egonkor moldeak eragiten dituzten haustura mekanismoak identifikatu dira, kokapena, akatsen tipologia eta kargaren norabidearekin duen zerikusia aztertuz. Hori guztia, egituraren ahultasuna/etenaldia (inprimaketa

akatsak) kolapso egonkorren abiarazleetan bihurtzeko xedez. cCF/PA perfil baterako 30,1 eta 9,0 kJ/kg-ko *SEA* balioak lortu dira norabide axialean eta erradialean hurrenez hurren.

Bigarren blokean cFF zuntz jarraiez (karbonoa, beira eta Kevlar[®]) indartutako inprimaketa materialen erantzuna aztertzen da saiakuntza abiadura ezberdinetan eta zera frogatu da: zuntzak estaltzen dituzten PA matrizen izaeran ezberdintasunak daudela, deformazio abiadurarekiko bere sentsibilitate handiagoa eta talkarekiko bere erresistentzia hobea azaltzen dutenak. Frogatu da ere zuntzen inpregnazio txarrak edo inprimaketa materialaren sendotze gabeziak hutsegite mekanismo ziurak eragiten dituela, zuntzen hausturan, delaminazioetan eta geruzen eta inprimaketa kordoiaren arteko marruskaduran funtsatzen direnak. cGF/PA profilek sentsibilitate handiagoa erakutsi dute deformazio-abiadurarekiko. Hau dela eta, inpaktuarekiko erresistentzia eta zurruntasuna hobetu direla ikusi da. Inpaktuaren araberrako *SEA* baloreak 20 kJ/kg axialean eta 12,8 kJ/kg erradialean dira.

Hirugarren blokea, azkenik, nukleo auxetikoren egiturak identifikatu eta karakterizatzeari dago bideratuta, profil tubularren zeharkako portaera hobetzeko eta, profil eta nukleo binomioari esker, xurgatze ahalmenean ondorio sinergetikoa eragiteko. Frogatu da ere RSH nukleo auxetiko kolapso moduak (izar motatako errentantea) profilaren zamaedukiera gehitzen duela eta, loditzearekin batera, bere kolapso progresibo modua kontrolatzen duela. Efektu sinergiko bat hauteman da nukleo auxetiko eta profilen artean, eta inpaktu erradialeko *SEA* balorerik altuena cKF/PA profilerako lortu da (20,6 kJ/kg).

3D motatako inprimaketa *4.0 Industry*-a bideratzen duen teknologietako bat da eta RIS3 Euskadi espezializazio adimendun estrategian identifikatzen da, gai birziklatuen erabileraren bidez, ekonomia zirkularren integrazte errazari aukera ematen diona. Dena den, berez ez da erakargarria bere kostu handiagatik eta fabrikazio denborak luzeak direlako. Beraz, material konposatu termoplastikoen fabrikazio teknologietako hibridazioak materialaren arintze eta ustiatze maila altuagoak lortzeko beharri ez ezik, piezen operazio-kostuak murriztekoari erantzuten dio eta baita produktibitate gehitzearenari ere.

ABSTRACT

Broadening knowledge about future materials and manufacturing processes will serve to develop high value-added products that respond to major societal challenges. Additive manufacturing (AM) is one such process and demonstrates great potential to contribute to enhanced product customization, digitalization of manufacturing, and the circular economy (EC).

Sustainable design is currently one of the criteria in the development of automotive components; with lightweight design, energy savings and efficient use of raw materials the subject of much research. In parallel with environmental concerns, safety remains a critical factor, and manufacturers must strive to ensure or improve the safety of vehicle occupants in impact situations. To satisfy both these requirements, the increase of energy absorption properties by means of complex structure design and non-conventional fibre orientations in cFRTP composite materials is the main objective of the present thesis. To this end, new concepts of structures and metamaterials with predefined or programmable properties addressing specific needs/functionalities within the vehicle structure were analysed and developed using composite AM technologies.

3D printing - FFF of continuous fibre permits greater design freedom and flexibility in terms of fabrication of cFRTP structures, since the fibre can be oriented in the direction of the load, increasing performance and material utilization.

The present work focuses on broadening knowledge in three fundamental blocks:

The first block investigates increasing the energy absorption properties of fabricated structural components through geometric profile design and selection of continuous fibre printing trajectories. For this purpose, microstructural characterization and identification of printing defects due to the FFF process was carried out, and the relationship between geometry (Fold profile), fibre printing pattern, and the nature of the reinforcement filament (cCF/PA, cGF/PA and cKF/PA) in the generation of these defects was analysed. At the same time, the fracture mechanisms that induce stable collapse modes of printed profiles were identified, analysing the position and typology of the defects and their relationship with the load direction. This work facilitates the conversion of a weakness/discontinuity in the structure (printing defects) into initiators of stable collapse.

The cCF/PA profiles achieved an axial and radial static *SEA* of 30.1 kJ/kg and 9.0 kJ/kg, respectively.

In the second block, the response of printed materials reinforced with continuous fibre cFF (carbon, glass, and Kevlar[®]) at different test speeds was studied. The results proved that there are differences in the nature of the PA matrices that cover the fibres, which explains their greater sensitivity to the strain rate and improvement of their impact resistance (Kevlar[®]). It was also demonstrated that poor impregnation of the fibres or lack of consolidation of the printing material causes certain failure mechanisms based on fibre fracture, delamination, and friction between the layers and the printing beads. The cGF/PA profiles shown an axial and radial dynamic *SEA* of 20.0 kJ/kg and 12.8 kJ/kg, respectively. Moreover, the strain-hardening effect enhanced impact resistance of cCF/PA material, whereas in cCF/PA not.

The third block was centred on the identification and characterization of auxetic filling structures that improve the transverse behaviour of tubular profiles, and that produces a synergistic effect on the absorption capacity of the profile-core. The results of this study also showed that the collapse mode of the RSH auxetic core (star-shape re-entrant) increases the load capacity of the profile and controls of the profile progressive collapse mode during its densification. A synergetic effect has been observed for every profile filled with the RSH auxetic core. The cKF/PA filled profile achieved the highest radial impact *SEA* value (20.6 kJ/kg).

3D printing is one of the Industry 4.0 enabling technologies identified in the RIS3 smart specialization strategy of Euskadi. It was selected because it easily integrates into the circular economy through the use of recycled materials (filament or pellet), however it remains underutilised because of its high cost and long manufacturing time. Hybridization in thermoplastic composite manufacturing technologies responds to these challenges by: (i) achieving high levels of lightweighting and material utilization, (ii) reducing the operational cost of parts, and (iii) increasing productivity.

RESUMEN

La generación de conocimiento sobre los futuros materiales y proceso de fabricación servirá para desarrollar productos de alto valor añadido que respondan a los grandes retos sociales. La personalización de los productos, la digitalización de la fabricación o la economía circular (EC) son algunos de esos retos a los que puede responder la fabricación aditiva (AM).

El diseño sostenible es actualmente una de las directrices en el desarrollo de componentes de automoción, siendo el aligeramiento, la eficiencia energética y el uso eficiente de las materias primas objeto de muchas investigaciones. De forma paralela, la seguridad sigue siendo un factor crítico, y los fabricantes deben esforzarse por garantizar o mejorar la seguridad de los ocupantes del vehículo en situaciones de impacto. Por ello, el incremento de las propiedades de absorción de energía de impacto mediante el diseño avanzado de estructuras y nuevas arquitecturas de refuerzos en materiales compuestos cFRTP es el principal objetivo de la presente tesis. Para ello, se han analizado y desarrollado, mediante tecnologías de AM de composite, nuevos conceptos de estructuras tubulares y metamateriales con propiedades predefinidas o programables que cubren necesidades/funcionalidades específicas dentro de la estructura del vehículo.

La impresión 3D – FFF de fibra continua presenta una mayor libertad diseño y flexibilidad en cuanto a la fabricación de estructuras cFRTP ya que permite orientar la fibra en dirección de la carga, aumentando su rendimiento y el aprovechamiento del material. El presente trabajo se ha centrado en la generación de conocimiento en tres bloques fundamentales:

El primer bloque se ha centrado en el incremento de las propiedades de absorción de energía de los componentes estructurales fabricados a través del diseño geométrico del perfil y la selección de trayectorias de impresión de fibra continua. Para ello se ha llevado a cabo la caracterización microestructural e identificación de los defectos de impresión debidos al proceso FFF y analizar la relación de geometría (perfil Fold), patrón de impresión de la fibra y naturaleza del filamento de refuerzo (cCF/PA, cGF/PA y cKF/PA) en la generación de estos defectos. A su vez, se ha identificado los mecanismos de fractura que inducen modos colapso estable de los perfiles impresos, analizando la posición y

tipología de los defectos y su relación con la dirección de la carga. Todo ello, a fin de convertir una debilidad/discontinuidad en la estructura (defectos de impresión) en iniciadores del colapso estable. Se han alcanzado unos valores de *SEA* de 30,1 y 9,0 kJ/kg en dirección axial y radial respectivamente, para un perfil cCF/PA, con orientación de fibra concéntrica y bajo sollicitación quasi-estática.

En el segundo bloque se ha estudiado la respuesta de los materiales de impresos reforzados con fibra continua cFF (carbono, vidrio y Kevlar[®]) a diferentes velocidades de ensayo. Por un lado, se ha comprobado que existen diferencias en la naturaleza de las matrices PA que recubren las fibras y que explican su mayor sensibilidad a la velocidad de deformación y mejora de su resistencia al impacto (Kevlar[®]). Por otro lado, se ha comprobado que la mala impregnación de las fibras o la falta consolidación del material de impresión provoca mecanismos de fallo seguros basados en fractura de fibras, delaminaciones y fricción entre las capas y los cordones de impresión. Los perfiles cGF/PA han mostrado una mayor sensibilidad a la velocidad de deformación y se ha observado un efecto rigidizador y una mejora en la resistencia a impacto. Los niveles de *SEA* a impacto alcanzados son 20 y 12,8 kJ/kg en dirección axial y radial, respectivamente.

El tercer bloque se ha orientado a la identificación y caracterización de estructuras de relleno auxético que mejore el comportamiento transversal del perfil tubular, y que produzca un efecto sinérgico en la capacidad de absorción del binomio perfil- núcleo. Además, se ha comprobado que el modo colapso del núcleo auxético RSH (reentrante tipo estrella) aumenta la capacidad de carga del perfil y controla su modo de colapso progresivo a la vez que se densifica. Se ha observado un efecto sinérgico en todos los perfiles rellenos de RSH, obteniendo los niveles de *SEA* a impacto radial más altos (20,6 kJ/kg) para los perfiles rellenos cKF/PA.

La impresión 3D, es una de las tecnologías habilitadora de la *Industry 4.0* identificada en la estrategia de especialización inteligente RIS3 de Euskadi que permite una fácil integración de la economía circular mediante el uso de materiales (filamento o pellet) reciclados. Sin embargo, no es atractiva como tal ni por su elevado coste, ni por elevado su tiempo de fabricación. Por lo tanto, la hibridación en tecnologías de fabricación de materiales compuestos termoplásticos responde a una necesidad no sólo de alcanzar cotas más altas de aligeramiento y aprovechamiento del material sino también en reducir el coste operacional de las piezas, así como el aumento de la productividad.

ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS	I
LISTA DE TABLAS	VII
GLOSARIO	IX
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. MOTIVACIÓN	1
1.2. ORGANIZACIÓN DE LA MEMORIA DE LA TESIS	2
2. ENMARQUE CIENTÍFICO-TECNOLÓGICO	3
2.1. FABRICACIÓN ADITIVA DE COMPOSITES	3
2.1.1. Impresión 3D - FFF de composite de fibra continua.....	6
2.1.2. Laminated Object Manufacturing.....	24
2.2. ESTRUCTURAS LIGERAS SOMETIDAS A IMPACTO	25
2.2.1. Estructuras tubulares.....	28
2.2.2. Estructuras celulares y núcleos.....	40
2.2.3. Perfiles rellenos y paneles tipo sandwich	45
2.3. HIBRIDACIÓN EN PROCESO.....	53
2.3.1. Integración de refuerzo de fibra continua.....	54
2.3.2. Integración de elementos funcionales mediante sobremoldeo	55
2.3.3. Impresión 3D insertos.....	58
2.3.4. Sobreimpresión.....	59
2.4. ECONOMÍA CIRCULAR E IMPRESIÓN 3D	60
2.4.1. Reciclado del plástico desde la perspectiva de la Economía Circular.....	60
2.4.2. Oportunidades de la Fabricación Aditiva en el entorno EC	61

2.4.3. Fabricación Aditiva como tecnología habilitadora de la EC.....	62
2.4.4. Perspectivas de futuro y retos a abordar por AM.....	70
3. ESTUDIO CRÍTICO DEL ESTADO DEL ARTE Y OBJETIVOS.....	73
3.1. ESTUDIO CRÍTICO DEL ESTADO DEL ARTE.....	73
3.2. OBJETIVOS.....	75
4. METODOLOGÍA.....	77
4.1. MATERIALES EMPLEADOS.....	77
4.1.1. Filamento de relleno.....	77
4.1.2. Filamentos de los pre-impregnados de refuerzo (cFF).....	78
4.2. PROCESO DE IMPRESIÓN CFF.....	78
4.2.1. Máquina de impresión 3D.....	78
4.2.2. Software Eiger®.....	79
4.3. FABRICACIÓN DE PROBETAS.....	80
4.3.1. Influencia de la geometría.....	81
4.3.2. Influencia de la velocidad de ensayo.....	82
4.3.3. Influencia del núcleo y efecto combinado.....	83
4.4. CARACTERIZACIÓN DE LOS PERFILES Y NÚCLEOS.....	86
4.4.1. Caracterización microestructural.....	86
4.4.2. Caracterización mecánica.....	86
4.5. IMPRESIÓN 3D SOBRE PANELES DE ORGANOSHEET.....	90
4.5.1. Proceso de sobreimpresión 3D.....	90
4.5.2. Diseño de probetas.....	91
4.5.3. Materiales.....	92
4.5.4. Proceso de fabricación.....	92
4.5.5. Caracterización mecánica.....	93
4.6. SOBREMOLDEO MEDIANTE GMT DE PREFORMAS DE IMPRESIÓN 3D.....	93

4.6.1. Proceso de sobremoldeo de refuerzos impresos	93
4.6.2. Diseño de probetas	95
4.6.3. Materiales	95
4.6.4. Caracterización mecánica	97
4.7. ECONOMÍA CIRCULAR E IMPRESIÓN 3D PARA APLICACIONES A IMPACTO	97
4.7.1. Proceso de reciclaje del material Onyx®	97
4.7.2. Caracterización mecánica	99
4.7.3. Demostrador	100
5. INFLUENCIA DE LA GEOMETRÍA DEL PERFIL SOBRE LA ABSORCIÓN DE ENERGÍA.....	105
5.1. ANÁLISIS Y SELECCIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL PERFIL HUECO.....	106
5.1.1. Caracterización microestructural de los perfiles	106
5.1.2. Caracterización mecánica de los perfiles.....	113
5.2. EFECTO DE LA DIRECCIÓN DE LA CARGA	120
5.2.1. Compresión en dirección axial	120
5.2.2. Compresión en dirección radial	120
5.3. SELECCIÓN DE LA TRAYECTORIA DE IMPRESIÓN DE LA FIBRA	122
5.4. CONCLUSIONES.....	123
5.4.1. Conclusiones de análisis microestructural.....	123
5.4.2. Conclusiones de la influencia de la carga.....	123
5.4.3. Conclusiones de la trayectoria de impresión	124
6. INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD DE ENSAYO SOBRE LA ABSORCIÓN DE ENERGÍA EN PERFILES.....	125
6.1. ANÁLISIS DEL PERFIL EN MATERIAL CGF/PA.....	126
6.1.1. Caracterización microestructural de los perfiles	126
6.1.2. Caracterización estática de los perfiles.....	129
6.1.3. Caracterización dinámica de los perfiles	133

6.2. EFECTO DE LA VELOCIDAD DE ENSAYO	140
6.3. ABSORCIÓN DE ENERGÍA DE IMPACTO.....	140
6.4. CONCLUSIONES.....	141
6.4.1. Conclusiones del análisis microestructural.....	142
6.4.2. Conclusiones de la velocidad de ensayo.....	142
6.4.3. Conclusiones de la matriz de pre-impregnado	142
7. COMPORTAMIENTO A IMPACTO DE PERFILES CON NÚCLEOS AUXÉTICOS	145
7.1. SELECCIÓN DEL NÚCLEO AUXÉTICO	146
7.1.1. Caracterización microestructural de los núcleos	146
7.1.2. Caracterización mecánica de los núcleos auxéticos	147
7.2. ANÁLISIS DE PERFIL HUECO DE CCF/PA, CGF/PA Y CKF/PA.....	151
7.2.1. Caracterización microestructural del perfil hueco cKF/PA.....	151
7.2.2. Caracterización mecánica de los perfiles huecos	154
7.3. COMBINACIÓN DE NÚCLEO Y PERFIL	158
7.3.1. Caracterización microestructural de los perfiles rellenos.....	158
7.3.2. Caracterización mecánica de los perfiles rellenos.....	159
7.4. EFECTO SINÉRGICO: ABSORBEDORES DE ENERGÍA POR IMPRESIÓN 3D	164
7.5. CONCLUSIONES.....	165
7.5.1. Selección y dimensionamiento del núcleo auxético	165
7.5.2. Selección del composite	165
7.5.3. Efecto combinado de núcleo y perfil.....	166
8. SOBREIMPRESIÓN 3D.....	167
8.1. OPTIMIZACIÓN PARAMETROS PROCESO SOBREIMPRESIÓN.....	168
8.1.1. Caracterización mecánica del material sobreimpreso	168
8.1.2. Relación entre parámetros de proceso de sobreimpresión y propiedades mecánicas.....	170

8.2. CONCLUSIONES.....	171
9. EXPLOTACIÓN DE RESULTADOS.....	173
9.1. INTRODUCCIÓN.....	173
9.2. IMPACTO.....	175
9.2.1. Reciclaje de plásticos.....	175
9.2.2. Tecnología de sobreimpresión 3D.....	177
9.3. METODOLOGÍA <i>LEAN STARTUP</i>	177
9.4. BUSINESS CASE.....	179
9.4.1. Business need/problem.....	179
9.4.2. Análisis DAFO.....	181
9.4.3. Stakeholder map.....	186
9.4.4. Cadena de valor.....	188
9.5. VALUE PROPOSITION CANVAS.....	189
9.5.1. Necesidades del cliente.....	189
9.5.2. Propuesta de valor.....	191
9.5.3. Plan de validación.....	192
9.6. BUSINESS MODEL CANVAS.....	193
9.6.1. Segmentos de cliente.....	194
9.6.2. Propuesta de valor.....	194
9.6.3. Canales.....	195
9.6.4. Relación con clientes.....	195
9.6.5. Actividades clave.....	195
9.6.6. Recursos clave.....	196
9.6.7. Socios clave.....	197
9.6.8. Estructura de costos.....	198
9.6.9. Fuentes de ingresos.....	198

9.7. CONCLUSIONES.....	199
10. CONCLUSIONES GENERALES Y LÍNEAS FUTURAS.....	201
10.1. CONCLUSIONES.....	201
10.1.1. Desarrollo de estructuras fabricadas mediante cFF para la disipación de energía en caso de impacto.....	201
10.1.2. Hibridación de tecnologías.....	203
10.1.3. Modelo de negocio.....	203
10.2. LÍNEAS FUTURAS.....	204
10.2.1. Diseño de núcleos con propiedades programables a impacto.....	204
10.2.1. Estructuras auxéticas con gradientes funcionales a impacto.....	207
10.2.2. Sobremoldeo con GMT de preformas 3D-cFF.....	209
10.2.3. Reciclado de poliamidas para impresión 3D.....	209
10.2.4. Sistema de protección eje ferroviario frente a impacto.....	211
10.3. DIVULGACIÓN DE RESULTADOS.....	214
10.3.1. Artículos indexados.....	214
10.3.2. Participación en congresos.....	214
10.3.3. Proyectos de I+D.....	216
11. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	217

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. a) Utillajes y soportes y b) suelas deportivas personalizadas. Tecnología FFF-Markforged [Mark2015].	3
Figura 2. Clasificación tecnologías de AM [3DHubs].	4
Figura 3. Propiedades mecánicas de las tecnologías impresión 3D [Matzusaki2016].	5
Figura 4. Patrón de impresión concéntrico, b) Patrón isotrópico y c) Secuencia de apilamiento de capas [Dickson2017].	5
Figura 5. Estructura típica de un composite impreso. a) Probeta de tracción, b) Sección transversal. [Melenka2016].	6
Figura 6. Técnicas de impresión mediante FFF. [Baumann2017]	6
Figura 7. Propiedades mecánicas a tracción de materiales compuestos mediante técnicas convencionales y fabricados mediante impresión 3D – cFF [Justo2018].	8
Figura 8. Microscopia óptica defectos de a) cCF/PA y b) cGF/PA [Justo2018].	8
Figura 9. Parámetros que afectan en la adhesión proceso FFF (entre cordones y entre capa).	9
Figura 10. Micrografías y esquemas de dos meso-estructuras diferentes; a) rectangulares y b) en forma de pincho, que muestran la formación de un vacío triangular típico. [Rodriguez2011].	9
Figura 11. Historial térmico de la impresión de cCF/PA; a) distribución de temperatura tras la impresión de un cordón de 40 mm y b) temperatura a lo largo de cordón para el mismo instante. [Iragi2019].	10
Figura 12. Radios de acuerdo mediante cFF. [Blok2018].	11
Figura 13. a) Boquilla de impresión para cFF, b) ángulo y c) radio para trayectorias curvas. [ZhangH2021]	11
Figura 14. Defectos de impresión de fibra en función del radio de curvatura [ZhangH2021].	12

Figura 15. Torsión, *folding back* y rotura de fibras, en función del ángulo de la curva: a) 120°, b) 150° y 180° [ZhangH2021]. 12

Figura 16. Potencial de la fabricación aditiva. Resistencia a tracción en función del volumen de fibra [Goh2019]. 13

Figura 17. Número de publicaciones sobre la caracterización mecánica en impresión 3D-cFF [Kabir2020]. 14

Figura 18. Ensayos de cortadura fuera del plano [Yogehvaran2020]. 15

Figura 19. Factores que influyen en las propiedades mecánicas de impresión 3D – cFF. 16

Figura 20. Influencia sobre las propiedades mecánicas; a) Orientación de la pieza con respecto de la mesa impresión [Chacón2019], b) Tipo y distribución de las capas de refuerzo [Arayo-Calvo2018]. 17

Figura 21. Valores de resistencia; a) tracción y b) flexión con respecto de la orientación, volumen de fibra y material de refuerzo [Chacon2019]. 18

Figura 22. a) Curvas tensión-deformación de probetas de tracción cCF/PA y cGF/PA, b) Mecanismos de fractura presentes en la probeta tracción, c) Fractura transversal de fibras y delaminaciones entre capas a tracción (cCF/PA), d) Delaminaciones entre cordones y grietas longitudinales (cGF/PA), e) Fractura de la matriz por cortadura y rotura de fibras, f) Fibre pull-out y g) Fractura transversal de fibras y residuo de matriz adherido a las fibras [Goh2018]. 20

Figura 23. Imágenes de SEM de probetas de tracción fracturadas. a) cCF/PA y b) cKF/PA [Dickson2017]. 21

Figura 24. a) Mecanismos de fractura presentes en probetas de flexión cGF/PA. b) pandeo de las fibras de vidrio (vista superior probeta), c) Pandeo de fibras por cortadura (centro de a probeta), d) bandas pandeo de fibras en las capas sometidas a compresión (vista lateral) [Goh2018]. 21

Figura 25. Imágenes de SEM de probetas de cortadura fracturadas. a) Comportamiento frágil de las cCF/PA y b) dúctil cKF/PA [Oztan2019]. 22

Figura 26. Imágenes de macroscópicas de la superficie de fractura de las probetas de cortadura (cCF/PA) [Iragi2019]. 22

Figura 27. Imágenes de macroscopio (vista lateral) fractura longitudinal: a) pandeo de fibras en las cercanías de las sufrideras, b) bandas de pandeo e inclinación β [Iragi2019].
 23

Figura 28. Imágenes de SEM de las superficies fracturadas (probetas tipo Charpy). Probeta con orientación perpendicular y distribución separada de capas a) cCF/PA, b) cGF/PA y c) cKF/PA [Caminero2018b]. 24

Figura 29. Esquema proceso LOM [Parandoush2017a] 24

Figura 30. Mecanismo de difusión entre capas LOM asistido por láser. [Parandoush2017a]. 25

Figura 31. Identificación de los parámetros que influyen en las propiedades de absorción.
 26

Figura 32. Valores de absorción de energía (*SEA*) en automoción. [ParkCK2012]..... 27

Figura 33. Influencia de la geometría de la sección transversal en el valor del *SEA* [Abdewi2008]..... 28

Figura 34. a) Sección perfil semi-hexagonal y bisel mecanizado. b) Dimensiones de la sección. [Esnaola2018]..... 29

Figura 35. Diferentes geometrías de tubo en material compuesto [Palanivelu2011].... 29

Figura 36. Valores de *SEA*, diámetro (D_i) del perfil de composite y ángulos (α) de los iniciadores de colapso..... 30

Figura 37. Diferentes conceptos de sección transversal de parachoques [Esnaola2018].
 30

Figura 38. Sección transversal; a) Perfil tubular, b) Corrugado y c) Compuesto. [Abdewi2007]..... 31

Figura 39. Valores de *SEA* axial; a) fibra de refuerzo; b) la orientación de la fibra, c) volumen de fibra [Farley1989]. 31

Figura 40. Modos de colapso radial inestable en perfiles tubulares. Ratio entre diámetro exterior (D) y espesor (t); a) $D/t < 10$ y b) $D/t > 10$ 33

Figura 41. Sensibilidad a la velocidad de deformación de la fibra de vidrio [Arao2012].
 34

Figura 42. Influencia a la velocidad de ensayo en el de perfil a) CF/Epoxi y b) KF/Epoxi [Farley1991]. 35

Figura 43. Diagrama de flujo: proceso de colapso de perfiles cFRP. Adaptado de [Farley1992]. 36

Figura 44. Mecanismos de fractura observados en laminados cFRP. a) Fallo intralaminar y b) Interlaminar [Mamalis1997]. 37

Figura 45. Modos de colapso estables en perfiles cFRP. a) Flexión de lámina, b) cortadura transversal, c) fractura frágil y d) pandeo local. [ParkCK2012] 37

Figura 46. Modos de fallo a crush no estables. a) Pandeo, b) interpenetración y c) embarrilamiento (pandeo) [ParkCK2012]. 38

Figura 47. Modo fallo progresivo por a) flexión de lámina y b) crecimiento estable de grieta axial. Mecanismos de c) delaminación y d) fractura de fibras. [Esnaola2015].... 39

Figura 48. Estructuras 2D auxéticas. Reentrante a) hexagonal, b) triangular, c) tipo-estrella y d) quiral [Saxena2016]. 40

Figura 49. Estructural auxéticas a) Chiral y b) Reentrante [Körner2015]. 41

Figura 50. Diseño de celda unitaria con Poisson programable mediante TO [Clausen2015]. 42

Figura 51. Optimización topológica de una estructura quiral auxética. a) modelo lineal, b) no lineal y c) variación del ratio de Poisson con respecto del nivel deformación. [Clausen2015]. 42

Figura 52. a) Concepto de rueda sin cámara de aire comprimido. b) Propiedades mecánicas programadas [Ju2009]. 43

Figura 53. Propiedades microlattice a) Módulo de compresión relativa b) Valores de absorción de energía específica frente a la máxima tensión transmitida [Schaedler2013]. 44

Figura 54. Propiedades de las estructuras celulares fabricada mediante impresión de tinta a) Módulo de Young, b) Resistencia frente densidad [Compton2014]. 44

Figura 55. Arquitectura de perfil relleno [Madhi2014]. 46

Figura 56. a) Proceso de fabricación de panel sandwich CFRP (piel y núcleo de hexagonal), b) Esquema de proceso de doblado de la celda unitaria y c) Modos de colapso y valor de <i>SEA</i> compresión (fuera de plano) [Wei2019].	47
Figura 57. Patrones de impresión cFF; en plano a) con fibras entrelazadas, b) sin fibras entrelazadas y c) fuera de plano [LiN2020].	48
Figura 58. Paneles sándwich formado por pieles convencionales y núcleo impresión 3D [LiT2017].	48
Figura 59. Proceso de impresión integral de un panel cFRTP [Sugiyama2018].	49
Figura 60. Núcleos impresos mediante cFF: a) Hexagonal, b) rombo, c) rectangular y d) circular [Sugiyama2018].	49
Figura 61. Trayectorias de impresión de la capas impares y las capas pares [Zheng2021].	50
Figura 62. Valores de <i>SEA</i> . a) Fuera de plano y b) en el plano [Zheng2021].	50
Figura 63. a) Panel sandwich con núcleo corrugado y b) trayectorias de impresión y zonas de solapamiento y entrecruzamiento de fibras [HouZ2018].	51
Figura 64. a) Esquema de ensayo de impacto (flexión 3 puntos), b) Panel sándwich auxético y c) patrón colapso [HouS2018].	52
Figura 65. Esquema del proceso de sobremoldeo de organosheet [Bouwman2016].	53
Figura 66. a) Refuerzo en forma de mechas de fibra continua en GMT [Wakeman2002], b) bandeja de batería de coche de GMT reforzada con bandas unidireccionales [Behrens2020], y c) esquema de la distribución de fibras en una placa nervada de GMT [ParkCH2012].	54
Figura 67. a) Refuerzo en forma de mechas de fibra continua en LFT [Joo2020] y b) diferentes diseños de refuerzo con bandas unidireccionales [Alwaker2021].	55
Figura 68. Estructura de nervios sobremoldeados propuesto por a) b) [Akkerman2020] y c) [Valverde2020].	56
Figura 69. Ensayos propuestos para estudiar la adhesión en la intercara sobremoldeada; a) cortadura [Aurrekoetxea2006], b) Iosipescu [Akkerman2020] y tracción sobre nervio c) [Akkerman2020] d) [Valverde2020].	57

Figura 70. a) Proceso híbrido estampación/GMT y b) carcasa de batería de coche fabricado con dicho proceso [Behrens2017].	58
Figura 71. Optimización topológica para la base de una placa de suspensión [Li2020].	59
Figura 72. Reciclado, Revalorización y Reutilización local de los plásticos [Garmulewicz2018].	61
Figura 73. a) Fabricación aditiva [Gu2018] y b) personalización de producto [Conner2014].	64
Figura 74. Oportunidades de negocio y sectores para la integración de AM [Rauch2018].	64
Figura 75. Inyector de combustible para el motor aeronáutico LEAP [GE-aviation].	66
Figura 76. Ejemplo de fabricación distribuida mediante AM.	70
Figura 77. Tecnología de impresión cFF. a) Descripción general del proceso y secuencia de impresión capa a capa (b) patrón de impresión de fibra rectangular [Iragi2019].	78
Figura 78. Trazado de la deposición de fibra continua: a) isotrópico y b) concéntrico. [Mark2015].	80
Figura 79. Geometrías de las estructuras; a) Fold [Belingardi2013], b) Hexagonal [Saenz2019, Esnaola2016, Esnaola2018].	81
Figura 80. Trayectoria de impresión y contenido (%) medio en fibra de carbono. Longitudinal: a) Fold y b) Hexagonal. Concéntrico: c) Fold y d) Hexagonal.	82
Figura 81. Trayectorias de impresión de fibra para el perfil Fold. a) cCF/PA, b) cGF/PA y c) cKF/PA.	83
Figura 82. Geometrías de núcleos auxéticos: a) RSH [Ingrole2017], b) ASH [WangH2019], y c) RH [Quan2020].	84
Figura 83. a) Perfil hueco [Belingardi2013]. b) Perfil relleno con núcleo RSH[HuanWang2019].	84
Figura 84. Configuración probetas de impresión. a) Perfil hueco y d) perfil relleno con RSH.	85

Figura 85. Curva carga-desplazamiento típica de un colapso progresivo. I) inicio del colapso, II) colapso progresivo y III) densificación [Hull1991]	87
Figura 86. Equipamiento y montaje para el ensayo de impacto de alta energía.	89
Figura 87. “Setup” del proceso de sobreimpresión 3D	90
Figura 88. Geometría de las probetas sobreimpresas.	91
Figura 89. Geometría del molde y componente para la integración de refuerzo de impresión 3D – cFF por sobremoldeo de GMT.	94
Figura 90. a) Probeta de llenado de molde mediante proceso compresión GMT. b) Muestra de material zona nervadura, zona Longitudinal. c) Imágenes microscopio contenido de la fibra en el nervio.	94
Figura 91. Diseño de preforma 3D para sobremoldeo. a) Vista en planta y b) sección transversal.	95
Figura 92. Configuración en Eiger [®] de la preforma para sobremoldeo. b) Vista general del refuerzo parcial y c) distribución de fibras en sección transversal.	96
Figura 93 Proceso de reciclado. Programa retorno y reciclaje materiales. 3R3D TM	98
Figura 94. Concepto A de protección frente impacto de balasto.	101
Figura 95. Concepto B de protección frente impacto de balasto.	101
Figura 96. Aspecto de la protección ferrovía impresa.	102
Figura 97. Utillaje de amarre del eje y <i>setup</i> del ensayo de impacto de la protección ferroviaria.	103
Figura 98. Calidad del proceso de impresión y aspecto de la intercara de los materiales impresos. Contorno Onyx [®] : a) Microfibras de carbono y b) porosidad entre cordones de impresión. Muestra Longitudinal: c) Altura de capa, aspecto de la intercara y porosidades. d) Apilamiento capa por capa y zona rica en resina. e) Ondulación de la fibra y poros entre cordones. Muestra Concéntrica: f) Ondulaciones de fibra para zonas trayectoria rectas.	107
Figura 99. Sección transversal de los filamentos: a) cGF/PA, b) cGF/PA, c) cGF/PA (HSHT glass) y d) cKF/PA.	108

Figura 100. Defectos de impresión de la fibra y puntos geoméricamente para las probetas Longitudinal y Concéntrica. Perfiles tipo a) Fold y b) Hexagonal.....	109
Figura 101. Defecto de impresión de fibra. Muestra Longitudinal: a) Contenido en volumen de fibra no homogéneo, b) Relleno parcial con Onyx [®] y apilamiento de capas de fibra, and c) Falta de material relleno. Muestra Concéntrica: d) poros entre cordones, e) Torsión de fibras y f) <i>Folding back</i> de fibras.....	111
Figura 102. Anchura del cordón de Onyx [®] para una muestra mono-cordón.....	112
Figura 103. a) zona del radio inferior y b) zona de la corrugación.	113
Figura 104. Curvas fuerza desplazamiento de los ensayos de compresión axial; a) Fold y b) Hexagonal.....	115
Figura 105. Curvas fuerza desplazamiento de los ensayos de compresión radial; a) Fold y b) Hexagonal.	119
Figura 106. Superficie de rotura y modo de fallo: a) Flexión de lámina, b) Micro-pandeo de fibra de HLA. c) Fractura de la matriz, d) Arranque de fibras en el perfil FCA, e) Puentes de fibra de HCA, f) Fallo interlaminar de HLR y g) Rotura de fibras y delaminación entre cordones de HCR.	121
Figura 107. a) Calidad del proceso de impresión y b) aspecto de la intercara del material impreso cGF/PA. c) Poros entre cordones, d) ondulación y desalineación de la fibra. e) Solape fibra y material Onyx [®] e f) intercara de contorno.	127
Figura 108. Defecto de impresión de fibra en perfil cGF/PA: a) Poros entre cordones, b) torsion y c) <i>folding back</i> de la fibra vidrio.	128
Figura 109. Curvas y patrones de compresion axial cuasi-estática.	130
Figura 110. Curvas y patrones de compresion radial cuasi-estática.....	131
Figura 111. Modos de fallo y superficies de fractura. a) Separación y arranque de fibras en CSA. b) puentes de fibra en GSA, c) fractura transversal de la fibra y delaminación entre cordones en CSR y d) despegado, flexión de lámina y delaminación entre cordones en GSR.....	133
Figura 112. Curvas de impacto axial; a) CDA y b) GDA.	135
Figura 113. Curvas de impacto radial; a) CDR y b) GDR.	137

Figura 114. Perfiles impactados. A) Delaminación y rotura de fibras en CDA, b) puentes de fibra y fracturas en GDA, c) Rotura y arranque de fibras en CDR, f) Fallo interlaminar entre cordones y flexión de lámina en GDR, e) Grieta longitudinal en CDR y f) fallo interlaminar y rotura de fibras en GDR.	139
Figura 115. Defectos de llenado en los núcleos auxéticos. Celda; a) RSH y b) ASH. Nodo; c) RSH y d) ASH.	146
Figura 116. Patrón de colapso de los núcleos auxéticos deformación; a) RSH, b) ASH y c) RH.	148
Figura 117. Curvas de colapso; a) RSH, b) ASH y c) RH y valores de d) P_{max} y e) SEA	149
Figura 118. Curvas de impacto: a) RSH, b) ASH y c) RH.....	150
Figura 120 Calidad del proceso de impresión y aspecto de la intercara de cKF/PA. a) Intercara de impresión. b) Poros entre capas. c) Poros entre cordones. d) Paredes de material Onyx [®] e intercara de unión cKF/PA.	152
Figura 121. Defecto de impresión de fibra. Perfil cKF/PA: a) Poros entre cordones, trayectoria recta. Torsión y desalineación de la fibra en b) zona corrugación en c) el radio superior.	153
Figura 122. Curvas y patrones de compresión radial cuasi-estática; a) cCF/PA, b) cGF/PA y cKF/PA.	154
Figura 123. Curva de impacto radial de los perfiles huecos; a) CD, b) GD and c) KD.	156
Figura 124. Aspecto <i>as printed</i> de perfil de CGF/PA con relleno RSH.	158
Figura 125. a) Distribución de defectos de impresión; b-d) ondulaciones, poros de isla e intersección, radios no intencionados y falta de material; e-g) poros entre cordones, torsión de fibras y zonas ricas en matriz y h-j) torsión, <i>folding back</i> de fibras y falta de material.	159
Figura 126. Curva de impacto radial de los perfiles rellenos; a) CDD, b) GDD and c) KDD.	161
Figura 127. Patrones de colapso radial de los perfiles rellenos; a) CDD, b) GDD and c) KDD.	162

Figura 128. Perfil relleno KDD post-impacto. a) Delaminación entre capas y entre cordones, b) Cortadura y despegue del núcleo y c) detalle de la delaminación intercapa y puentes de fibra de Kevlar®.....	163
Figura 129. Perfil relleno GDD post-impacto. a) Delaminación entre cordones y despegue de núcleo-perfil, b) Rotura de fibras, c) delaminación entre cordones y cortadura del núcleo y d) rotura de fibras.....	163
Figura 130. Perfil relleno CDD post-impacto. a) Rotura de fibras y cortadura del núcleo, b) Plegado y fractura del núcleo, en la corrugación y c) Rotura de fibras.	164
Figura 131. Curvas de los ensayos de cortadura para las cuatro temperaturas de intercara analizados.	168
Figura 132. Detalle de las diferentes morfologías de intercara sobreimpresas; a) intercara original, b) superficie de fractura de la probeta con T_i 157,5 °C, y c) superficie de fractura de la probeta con T_i 177,5 °C.....	170
Figura 133. Pico de fusión del sustrato y resistencia a cortadura de las intercaras a diferentes temperaturas.....	171
Figura 134. Transformación hacia la Economía Circular [Ellen2018].	174
Figura 135. Potencial económico e impacto ambiental de ciclo de vida evitable de los materiales contenido en flujos de residuos con destino a los vertederos (Mil puntos de <i>Recipe/Ecoinvent</i>) [ProyectoEC2018].....	174
Figura 136. Concepto de economía circular aplicada a la fabricación de materiales poliméricos.	175
Figura 137. Oportunidades de la Economía Circular por sector de actividad y etapas de ciclo de vida [Diagnostico2018].....	176
Figura 138. Líneas de actuación 2030 [EstrategiaEC2020].	177
Figura 139. Modelo de negocio protecciones frente al impacto de balasto.	179
Figura 140. Definición de líneas de productos y flujos de entrada y salida de material	180
Figura 141. Protecciones frente al balasto basado en pinturas o (recubrimientos). Fuente: Luccini RS.....	180

Figura 142. Protector de eje de rodadura (ES2647961B1). Titular patente: CAF S.A. [ES2647961B1]	181
Figura 143. Cubierta de eje de rueda (ES2399383T). Titular patente: SJ AB.[ES2399383T].....	181
Figura 144. Análisis DAFO.....	182
Figura 145. Definición del Ecosistema (Oarsoaldea-Bidasoaldea).....	183
Figura 146. Stakeholder map.....	188
Figura 147. Cadena de valor.....	188
Figura 148. Value proposition canvas.....	189
Figura 149. Matriz grado criticidad y certeza de las hipótesis.....	192
Figura 150. <i>Business Model Canvas</i>	194
Figura 151. Patrones de colapso cuasi-estático. Perfil relleno sin refuerzo cFF; a) OSD y b) OSS.	205
Figura 152. Patrones de colapso cuasi-estático. Perfil relleno reforzado con Kevlar [®] a) KSD y b) KSS.	206
Figura 153. Geometrías de núcleos auxéticos con distintas densidades: a) RSH [Ingrole2017], b) ASH [WangH2019], y c) RH [Quan2020].....	207
Figura 154. Propiedades de impacto en función de la densidad de núcleo; a) RSH, b) ASH y c) RH.	208
Figura 155. Microestructura del nervio tras el proceso de sobremoldeo.	209
Figura 156. Curvas de impacto. a) Material virgen y b) Muestra 1P0.	210
Figura 157. Curvas de impacto. Concepto A; a) Impacto en punto central. Concepto B; b) Impacto en extremo; Impacto en punto central, c) 1º Impacto, d) 2º Impacto, e) 3º Impacto y f) 4º Impacto.	212
Figura 158. Test de impacto sistema de protección ferroviaria. Concepto A; a) Impacto central, b) Fractura por cortadura, c) Indentación y gieta circunferencial y d) superficie de fractura. Concepto B; e) Impacto central, f) Flexo-compresión, g) Posición y número de impactos y h) fractura por cizalla, parte posterior.	213

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. SEA quasi-estático y axial para diferentes procesos de fabricación de composites [Esnaola2018].	32
Tabla 2. Energía absorbida por unidad de volumen (MPa) en perfiles de CFRP y GFRP [Harding1983].	34
Tabla 3. Propiedades mecánicas a tracción del material de relleno empleado. [Mark2015].	77
Tabla 4. Propiedades mecánicas de los materiales de refuerzo empleado [Mark2015].	78
Tabla 5. Parámetros de extrusión.	79
Tabla 6. Parámetros de relleno.	79
Tabla 7. Plan de fabricación de probetas. Estructura de la tesis.	80
Tabla 8. Propiedades geométricas y masas de los perfiles (cCF/PA).	81
Tabla 9. Material, masa, volume de fibra y tiempo de impresión de los perfiles Fold.	82
Tabla 10. Tipología de estructura auxética, número de repeticiones de celda, masa y densidad.	83
Tabla 11. Material de refuerzo del perfil, tipología de estructura auxética y masa.	85
Tabla 12. Masa, velocidad y energía en el impacto.	88
Tabla 13. Temperatura de la intercara (T_i) y del sustrato (T_s).	91
Tabla 14. Parámetros de extrusión para el proceso de sobreimpresión 3D.	92
Tabla 15. Parámetros de relleno para las probetas de sobreimpresión 3D.	93
Tabla 16. Identificación de preformas 3D para pruebas de sobremoldeo GMT.	96
Tabla 17. Parámetros de extrusión para el proceso material reciclado.	99
Tabla 18. Parámetros de relleno para el proceso material reciclado.	99
Tabla 19. Identificación de probetas de material reciclado, peso y número de ciclos mecánico y térmicos.	100

Tabla 20. Resultados de compresión axial estática.	116
Tabla 21. Resultados de compresión radial estática.	118
Tabla 22. Resumen del comportamiento a compresión cuasi-estática de los perfiles; estable (✓) o inestable (✗).....	122
Tabla 23. Valores <i>SEA</i> axial en bibliografía.....	122
Tabla 24. Valores <i>SEA</i> radial en bibliografía.	123
Tabla 25. Resultados de compresión cuasi-estática.....	129
Tabla 26. Resultados de impacto	134
Tabla 27. Valores de <i>SEA</i> para impacto axial.	141
Tabla 28. Valores de <i>SEA</i> para <i>crush</i> radial.	141
Tabla 29. Resultados de compresión de los núcleos.....	149
Tabla 30. Resultados de impacto en el plano.	151
Tabla 31. Resultados de compresión cuasi-estática de perfil huecos.	155
Tabla 32. Resultados de impacto radial de perfil huecos.	157
Tabla 33. Resultados de impacto radial de perfil rellenos.....	160
Tabla 34. Valores de <i>SEA</i> para <i>crush</i> radial.	165
Tabla 35 Tipología de estructura auxética, número de repeticiones de celda, masa y densidad.....	208
Tabla 36. Resultados de impacto en material virgen y reciclado.	210
Tabla 37. Resultados de impacto sobre la protección.....	211

GLOSARIO

LISTA DE ABREVIATURAS

ABS	Acrilonitrilo Butadieno Estireno
AM	<i>Additive Manufacturing</i>
ATL	<i>Automated Tape Laying</i>
B2B	<i>Business to Business</i>
BMC	<i>Business Model Canvas</i>
CAD	<i>Computer Added Design</i>
cCF	<i>continuous Carbon Filament</i>
cCF/PA	<i>continuous Carbon Filament/Poliamide</i>
cFF	<i>continuous Fibre Fabrication</i>
CFRP	<i>Carbon Fibre Reinforced Plastics</i>
cFRP	<i>continuous Fibre Reinforced Plastics</i>
cFRTP	<i>continuous Fibre Reinforced Thermoplastics</i>
cGF/PA	<i>continuous Glass Filament/Poliamide</i>
CO ₂	Dióxido de carbono
DAFO	Debilidades, Amenazas, Fortalezas y Oportunidades
DAH	<i>Double Arrowhead Honeycomb</i>

DDM	<i>Direct Digital Manufacturing</i>
DIC	<i>Digital Image Correlation</i>
DSC	<i>Differential Scanning Calorimetry</i>
EC	Economía Circular
FFCC	Ferrocarriles
FFF	<i>Fused Filament Fabrication</i>
FRP	<i>Fibre Reinforced Plastics</i>
GFRP	<i>Glass Fibre Reinforced Plastics</i>
GMT	<i>Glass Mat reinforced Thermoplastic</i>
HSHT	<i>High Strength High Temperature</i>
KFRP	<i>Kevlar[®] Fibre Reinforced Plastics</i>
LATP	<i>Laser Assited Tape Placement</i>
LFT	<i>Long Fibre renforced Thermoplastic</i>
LOM	<i>Laminated Object Manufacturing</i>
NPR	<i>Negative Poisson Ratio</i>
OEM	<i>Original Equipment Manufacturer</i>
PC	Policarbonato
PA	Poliamida
PA12	Poliamida 12

PA6	Poliamida 6
PEEK	Polieteretercetona
PLA	Ácido Poliláctico
PMV	<i>Producto Mínimo Viable</i>
PPS	Polisulfuro de fenileno
RH	<i>Reentrant Honeycomb</i>
RSH	<i>Reentrant Star-shaped Honeycomb</i>
sCF	<i>short Carbon Fibre</i>
STL	<i>STereoLithography</i>
TPU	Poliuretano termoplástico
UE	Unión Europea
VPC	<i>Value Proposition Canvas</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos romanos

A	Área del perfil
A_e	Energía Absorbida
CFE	<i>Crush Force Efficiency</i>
D_i	Diámetro interior del perfil
d_{max}	Deflexión máxima

E	Módulo de Young
F_b	Adherencia del nervio a tracción
F_s	Resistencia a cortadura
g	Gravedad
I_{yy}, I_{zz}	Momento de inercia del perfil con respecto del eje Y y eje Z
$ILSS$	Resistencia interlaminar
l_{max}	Longitud máxima colapsada
m	Masa
m_t	Masa colapsada
P_{max}	Carga máxima
P_{mean}	Carga media
SE	<i>Stroke Efficiency</i>
SEA	<i>Specific Energy Absorption</i>
t	Espesor del perfil
T_0	Temperatura de boquilla
T_i	Temperatura de la intercara
T_m	Temperatura de fusión
T_s	Temperatura del sustrato

Símbolos griegos

v_f	Contenido en volumen de fibra
β	Inclinación de las bandas de pandeo
ε	Deformación
$\dot{\varepsilon}$	Velocidad de deformación
ν	Módulo de Poisson
ρ	Densidad
σ_f	Resistencia a flexión
σ_R	Resistencia a rotura

Capítulo 1

Introducción

CAPÍTULO 1

Introducción

En este primer capítulo, se expone la motivación y los objetivos para el desarrollo de la tesis doctoral, “Desarrollo de componentes estructurales fabricados mediante impresión 3D de composites de fibra continua para la absorción de energía de impacto”. Esta tesis se ha realizado dentro del programa de doctorado Ingeniería Aplicada, en el grupo de Investigación de Tecnologías de Plásticos y Composites del Departamento de Mecánica y Producción Industrial de la Escuela Politécnica Superior de Mondragón Unibertsitatea.

1.1. MOTIVACIÓN

La generación de conocimiento sobre los futuros materiales y proceso de fabricación servirá para desarrollar productos de alto valor añadido que respondan a los grandes retos sociales. La personalización de los productos, la digitalización de la fabricación o la economía circular son algunos de esos retos a los que puede responder la fabricación aditiva. La principal ventaja de esta tecnología, clave dentro de la filosofía de la Industria 4.0, es que se trata de un proceso completamente digital [Niaki2019], ya que no necesita de moldes ni utillajes, por lo que la flexibilidad de la producción es máxima. Esto permite cambios de paradigma importantes como:

1. Cambiar el modelo productivo actual [Weller2015] de “economía de escala” basado en el capital y en la producción en serie centralizada en grandes centros productivos que requieren de complejas redes de distribución [Cerdea2017], por un modelo de “economía unitaria” en el que la fabricación puede realizarse de forma distribuida y bajo demanda cerca del usuario final.
2. La transformación del cliente va más allá del empoderamiento, asociado a su participación en la toma de decisiones durante todo el proceso del desarrollo de producto. Gracias a la fabricación distribuida, el consumidor puede transformarse en productor, lo que se denomina *prosumer* [Jiang2017]. Como resultado, se

generan vínculos entre cliente y producto más fuerte, posibilitando el cobro de un precio premium y alargar la vida útil del producto.

3. Pasar de transportar productos físicos a transportar ficheros electrónicos, extender la vida útil de producto mediante la reparación/remanufactura [Ford2016], o la posibilidad de reciclar y producir con el material reciclado en un entorno cercano al lugar de consumo del producto [Kreiger2014] contribuyen a cumplir con los principios de la economía circular.

Para que estas innovaciones de producto y negocio sean posibles, es necesario comprender los principios básicos de diseño y fabricación de la fabricación aditiva, y es precisamente el objetivo genérico de la presente tesis, que se centra en la impresión 3D de composites reforzados con fibra continua de perfiles para disipación de energía de impacto.

1.2. ORGANIZACIÓN DE LA MEMORIA DE LA TESIS

El trabajo desarrollado para alcanzar los objetivos de la presente tesis se describe en los siguientes nueve capítulos que se presentan a continuación. En el segundo capítulo se muestra el enmarque científico tecnológico enfocado principalmente al diseño de estructuras de composite cFRTP para absorción de energía y fabricadas mediante impresión 3D - FFF de fibra continua. El tercer capítulo presenta el estudio crítico del estado del arte, donde se identifican los vacíos o falta de conocimiento en el estado actual de la técnica, su relación con los objetivos y las contribuciones de nuevo conocimiento propuestas en esta tesis. En el cuarto capítulo, se muestran la metodología empleada para el desarrollo del trabajo. En los siguientes capítulos 5, 6 y 7, se muestran los resultados obtenidos en la consecución de los objetivos operativos. El capítulo 8 se centra en la hibridación de procesos convencionales y la impresión 3D. En el capítulo 9, se presenta un análisis de la explotación de los resultados, donde se ha desarrollado un modelo de negocio para la creación de una *Startup* con base tecnológica en proceso de impresión 3D y economía circular. Finalmente, en el capítulo 10 se presentan las conclusiones generales del trabajo, las líneas futuras y la divulgación científica de los resultados.

Capítulo 2

Enmarque científico-tecnológico

CAPÍTULO 2

Enmarque científico-tecnológico

En este capítulo se presenta el estudio bibliográfico y el estado actual de la técnica a fin de llevar a cabo un análisis crítico y encontrar el enmarque de la presente tesis con sus contribuciones de nuevo conocimientos.

2.1. FABRICACIÓN ADITIVA DE COMPOSITES

La fabricación aditiva (AM), y en concreto la fabricación por fusión de filamentos (FFF) o extrusión de material, se ha convertido en una tecnología clave para desarrollar productos altamente personalizados (Figura 1). Este proceso de fabricación permite el uso de materiales avanzados (orientaciones no convencionales, laminados con secuencia de apilamiento dispersa o materiales compuestos con gradientes funcionales) en combinación con geometrías complejas (estructuras celulares, tipo *lattice* o auxéticas).



Figura 1. a) Utillajes y soportes y b) suelas deportivas personalizadas. Tecnología FFF-Markforged [Mark2015].

La impresión 3D composite se puede clasificar de acuerdo con el tipo del refuerzo fibra sea continuo o discontinuo y en función del formato o arquitectura del refuerzo de fibra (tejido, cinta o filamento). Sólo existen tres tecnologías con propiedades mecánicas suficientes para la fabricación de prototipos funcionales en plástico reforzado con fibra continua y matriz termoplástica (cFRTP):

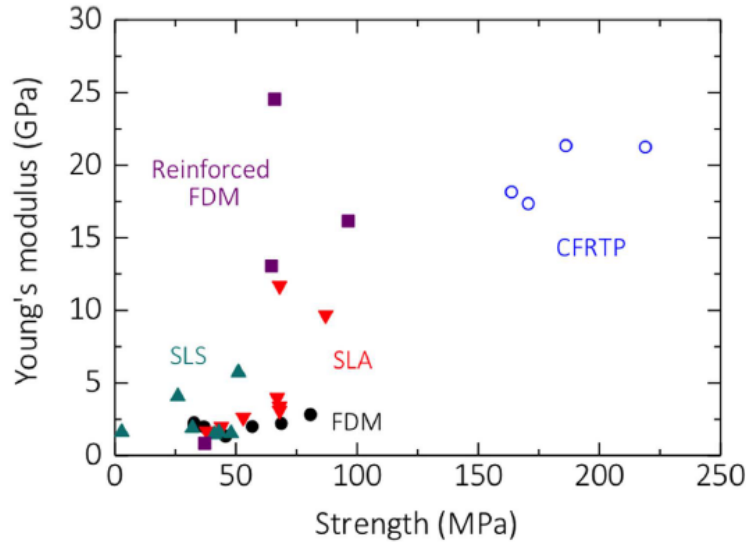


Figura 3. Propiedades mecánicas de las tecnologías impresión 3D [Matzusaki2016].

La impresión 3D – FFF no sólo permite la definición del patrón de impresión de fibra continua (Figura 4a-b) en función de la trayectoria recorrida por el cabezal sino también la distribución de capas en la secuencia laminado, gracias a su proceso capa a capa (Figura 4c). Como resultado, se pueden obtener nuevos conceptos de estructuras de laminado con propiedades mecánicas predefinidas [Dickson2017].



Figura 4. a) Patrón de impresión concéntrico, b) patrón isotrópico y c) secuencia de apilamiento de capas [Dickson2017].

La estructura de las piezas impresas incluye varias estructuras: piel (contorno), contenido sólido, relleno y fibra de refuerzo, como se puede ver en la Figura 5. La parte del contorno no aporta estructuralmente en la pieza impresa, sólo aporta el acabado superficial. El contenido sólido está formado únicamente por la matriz y, por lo general, por capas iniciales y finales. El relleno se encuentra entre las capas sólidas superior e inferior y puede ser de diferentes tipos de formas celulares basadas en los alcances de la impresora como sólido, hexagonal, triangular, rectangular, etc. Las capas de fibra de refuerzo (en este caso Kevlar[®]) son las que aportan las propiedades estructurales a la pieza, en función del número de capas que se añadan [Melenka2016].

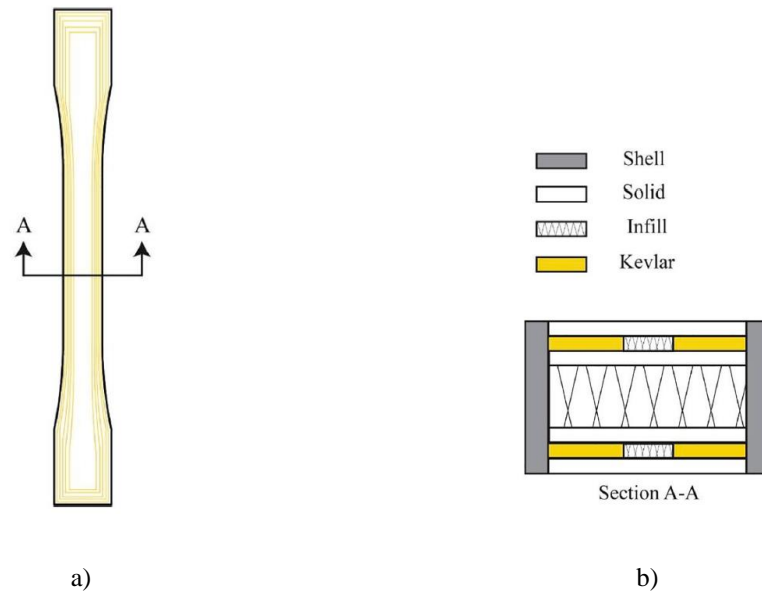


Figura 5. Estructura típica de un composite impreso; a) Probeta de tracción, b) Sección transversal [Melenka2016].

2.1.1. Impresión 3D - FFF de composite de fibra continua

Existen dos aproximaciones (Figura 6) a la fabricación mediante FFF de composites de fibra continua [Parandoush2017b]. La primera es la denominada como impregnación en boquilla, que consiste en alimentar el filamento termoplástico y la mecha de fibra por separado, para fundir e impregnar simultáneamente el composite en el cabezal de extrusión. Este método se ha aplicado con éxito para imprimir composites de matriz ABS y PLA, pero la mala impregnación de las fibras en la zona interna de la mecha reduce las propiedades finales. [LiN2016, TianX2016].

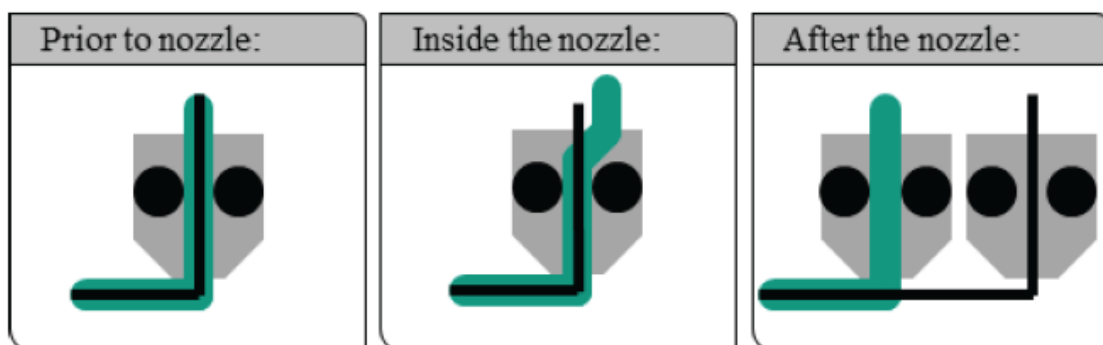


Figura 6. Técnicas de impresión mediante FFF [Baumann2017].

La segunda tecnología de FFF utiliza un filamento en el que la fibra está pre-impregnada, con lo que en el cabezal de impresión se emplea para fundir y dosificar el filamento como en el caso de FFF convencional, evitando así los problemas de impregnación del otro método. Además, se ha aplicado con éxito a compuestos de matriz de PA. Baumann *et al.* [Baumann2017] habla de una tercera tecnología de co-extrusión de la fibra seca y filamento termoplástico, pero con muy malos resultados debido a pobre impregnación y adhesión entre fibra y matriz.

La tecnología de impresión 3D de fibra continua basada en filamentos pre-impregnados es la tecnología FFF composite que mayores propiedades mecánicas y mayores porcentajes de fibra para un menor volumen de poros [Melenka2016, Klift2016, Justo2018, Goh2018, Blok2018].

Sin embargo, la materia prima es más cara y la variabilidad matriz de relleno es limitada. La tecnología cFF de Markforged[®] es la más extendida FFF basada en pre-impregnado [Mark2015]. A continuación, se viene a presentar los estudios de caracterización del material encontrados en bibliografía. Los trabajos se han clasificado en: microestructura, defectos de impresión de la fibra, propiedades mecánicas, naturaleza de los materiales (cCF/PA, cGF/PA y cKF/PA), relación con los parámetros de impresión y modos de fractura.

2.1.1.1. Microestructura

Las propiedades mecánicas obtenidas en las piezas de composite impresas son inferiores a los composites fabricados mediante procesos convencionales (Figura 7) de acuerdo con [Sood2010, Justo2018]. Las diferentes tipologías de defecto encontradas en la microestructura pueden explicar las bajas propiedades mecánicas obtenidas: alto contenido en poros, zonas ricas en resina, mala adhesión entre capas, imperfecciones en la intercara de unión fibra-matriz, desalineaciones de la fibra depositada. Varios trabajos han concluido que las piezas de composite impresas son muy porosas (Figura 8) con un contenido en poros de entre el 12% y el 17% para composites de fibra de carbono y vidrio, respectivamente [Justo2018, Goh2018].

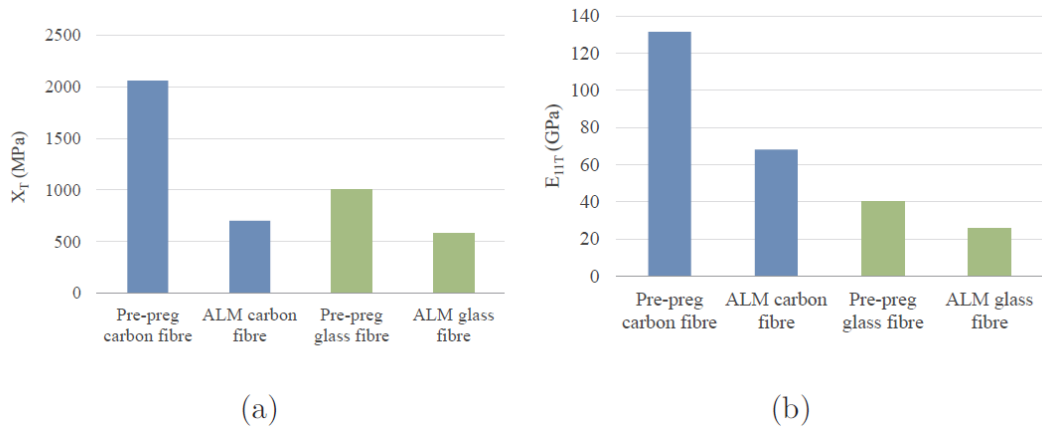


Figura 7. Propiedades mecánicas a tracción de materiales compuestos mediante técnicas convencionales y fabricados mediante impresión 3D – cFF [Justo2018].

Este alto contenido en poros es el resultado de una mala compactación durante el proceso de impresión capa a capa y por lo tanto existe una relación directa entre la baja consolidación del material impreso y la poca resistencia de la unión fibra matriz y la porosidad. Estudios realizados por Ngo *et al.* [Ngo2018] han señalado que la distorsión, producida entre capas durante el proceso de impresión, como causa principal de la debilidad mecánica.

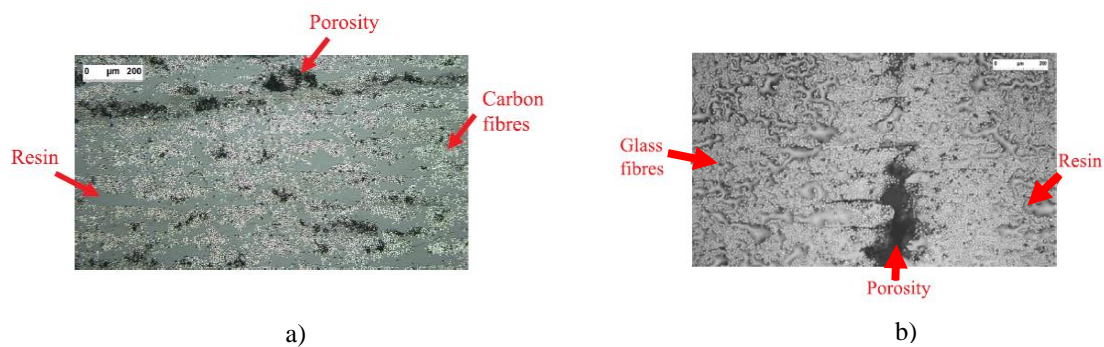


Figura 8. Microscopia óptica defectos de a) cCF/PA y b) cGF/PA [Justo2018].

Varios autores han demostrado que la adhesión entre capas es el factor más importante en las propiedades mecánicas y el rendimiento de los materiales impresos [TianX2016, Parandoush2017b]. De hecho, se ha demostrado que la diferencia en adherencia de las capas conduce a diferentes patrones de fractura, crecimiento de grietas y que, por lo tanto, puede afectar a la capacidad de absorción de energía de los materiales compuestos impresos [Goh2018, Blok2018]. En la Figura 9 se muestran los factores que afectan a la adherencia entre capas.

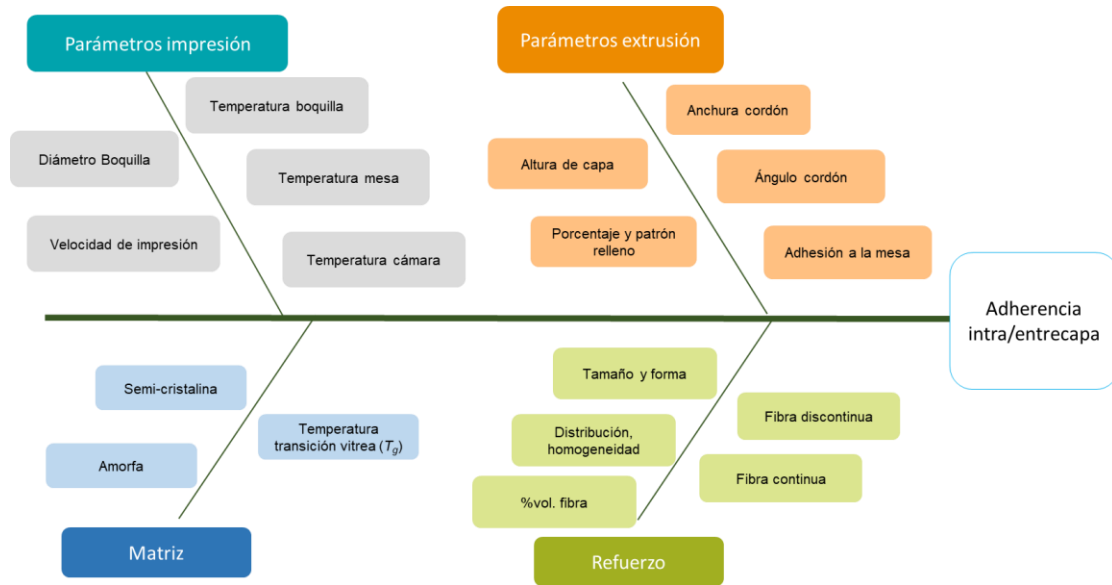


Figura 9. Parámetros que afectan en la adhesión FFF (entre cordones y entre capa).

La calidad de las piezas impresas depende de varios fenómenos físicos subyacentes durante la impresión como son: la solidificación, el gradiente térmico, la cristalización, el comportamiento viscoelástico, la contracción, las tensiones residuales y la distorsión [Penumakala2020].

La integridad y las propiedades de la pieza dependen en gran medida de los fenómenos de adhesión y de la calidad de la unión. La formación de la unión entre dos capas incluye el contacto superficial, el crecimiento del cuello y la cicatrización. Este fenómeno de unión se produce entre los filamentos adyacentes de una capa (intra-cap) y entre las capas sucesivas (inter-cap) [Blok2018]. Durante el proceso de adhesión, el tiempo total disponible para la solidificación es menor y se produce un crecimiento parcial del cuello lo que da lugar a la formación de vacíos (Figura 10) [Rodríguez2011].

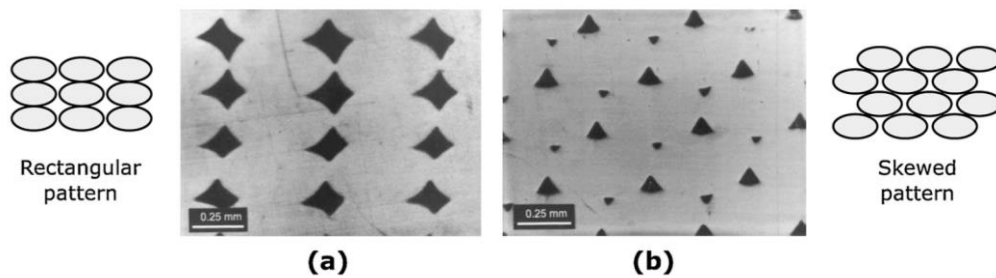


Figura 10. Micrografías y esquemas de dos meso-estructuras diferentes; a) rectangulares y b) en forma de pincho, que muestran la formación de un vacío triangular típico [Rodríguez2011].

Los parámetros de temperatura y velocidad de impresión en la impresora MarkTwo® están predefinidos por Markforged®, buscando un compromiso entre las propiedades mecánicas y capacidad productiva de la impresora [Mark2015].

A continuación (Figura 11), se muestra la distribución de temperatura tras la impresión de un cordón de 40 mm y la variación de temperatura a lo largo del cordón para el mismo instante. El rápido enfriamiento del cordón conlleva la detención del proceso de cicatrización e impide la consolidación de la unión entre capas [Iragi2019].

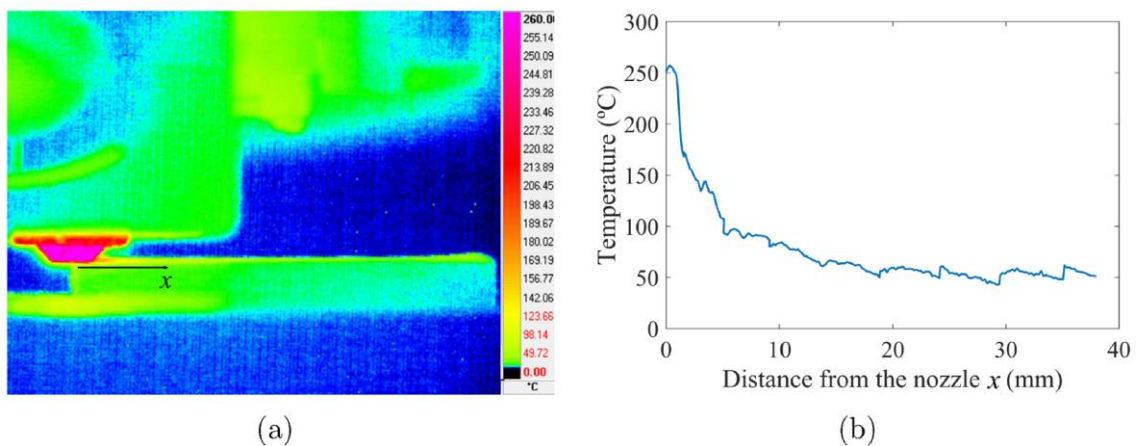


Figura 11. Historial térmico de la impresión de cCF/PA; a) distribución de temperatura tras la impresión de un cordón de 40 mm y b) temperatura a lo largo de cordón para el mismo instante [Iragi2019].

Tian *et al.* [TianX2016] han comprobado que el incremento de la presión debido a la reducción de la altura de capa y la separación entre cordones contribuye en la mejora de las propiedades de adherencia entre las capas y, por ende, en la mejora de las propiedades mecánicas. Asimismo, se han llevado a cabo desarrollos de nuevos cabezales con la integración de rodillos compactadores y calentamiento local [Parandoush2017a, Ueda2020] o micro-tornillos extrusiones que aumentan la compactación entre las capas y la consolidación del material [Liu2020].

2.1.1.2. Defectos de impresión de fibra

La desalineación de fibras, la aparición de arrugas y otros defectos como la torsión y *folding back* de las fibras, han sido analizados extensamente por varios autores. Primeramente, es importante señalar que un patrón de impresión concéntrico magnifica estos defectos, dado que el cabezal sigue una trayectoria en espiral (Figura 12) que comienza en el contorno exterior y termina en el interior de la pieza [Blok2018]. Aunque se han encontrado también evidencias de ellos en patrones isotrópicos, concretamente en los cambios de sentido de la fibra o giros de 180° [Chabaud2019].

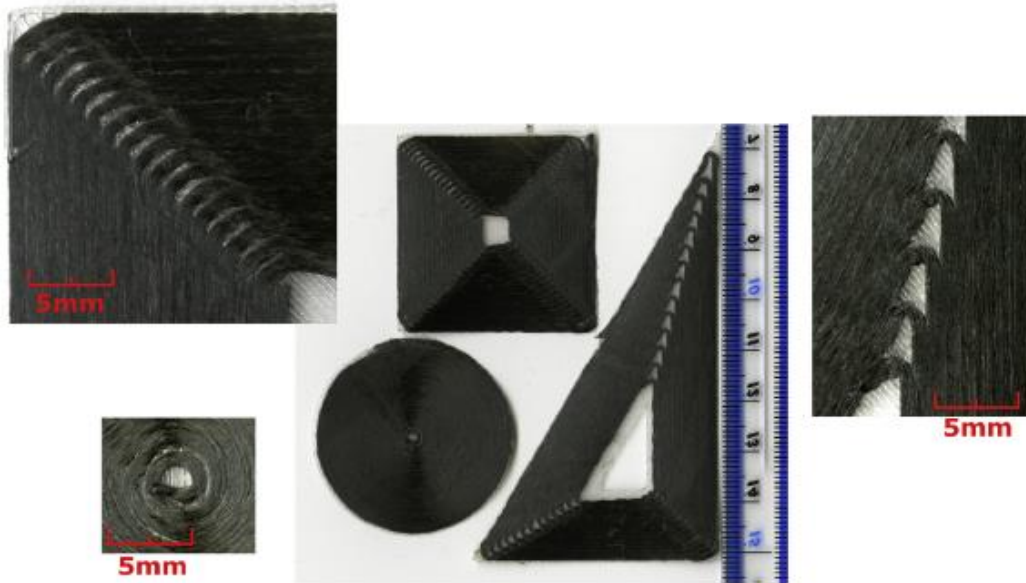


Figura 12. Radios de acuerdo mediante cFF [Blok2018].

Las trayectorias curvas inducen ondulaciones de las fibras, generan poros entre los cordones e incluso provoca la rotura de las fibras [Matsuzaki2018]. ZhangH *et al.* [ZhangH2021] han investigado la presencia de estos defectos en impresión con cCF/PA, y lo analizaron a partir de los parámetros geométricos (ángulo y radio de curvatura) que definen una trayectoria curva (Figura 13).

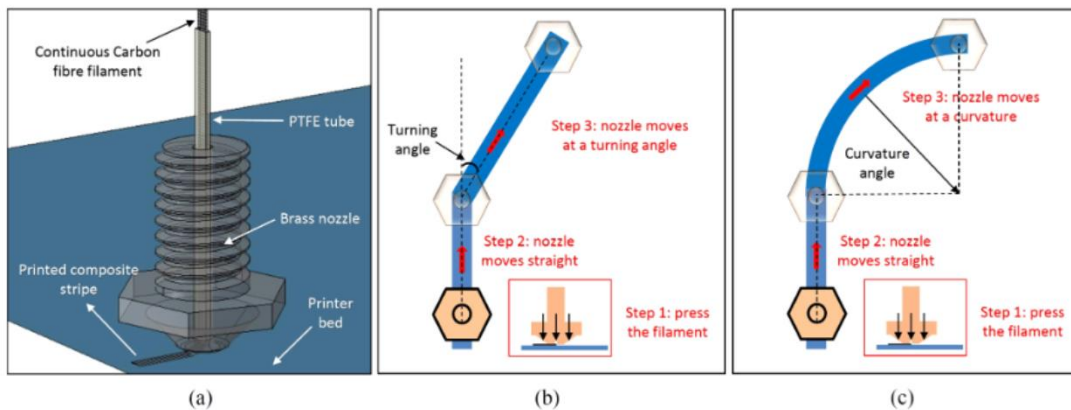


Figura 13. a) Boquilla de impresión para cFF, b) ángulo y c) radio para trayectorias curvas [ZhangH2021].

Matsuzaki *et al.* [Matsuzaki2018] han encontrado evidencias de ambos defectos para radios pequeños de entre 1 y 3 mm, mientras que sólo encontraron signos de torsión (Figura 14) para radios superiores a 3 mm. El fenómeno del *folding back* (Figura 15), supone un giro circunferencial completo (dentro a fuera) del filamento y provoca la fractura de la fibra de carbono durante el proceso de impresión.

Zhang *et al.* [Zhang2021] han observado que los defectos de *folding back* son aún más notables para cambios de trayectoria superiores a 120° y sólo reportaron la rotura de fibra de carbono para valores de giro superiores a 120° y radios inferiores de 2,5 mm.

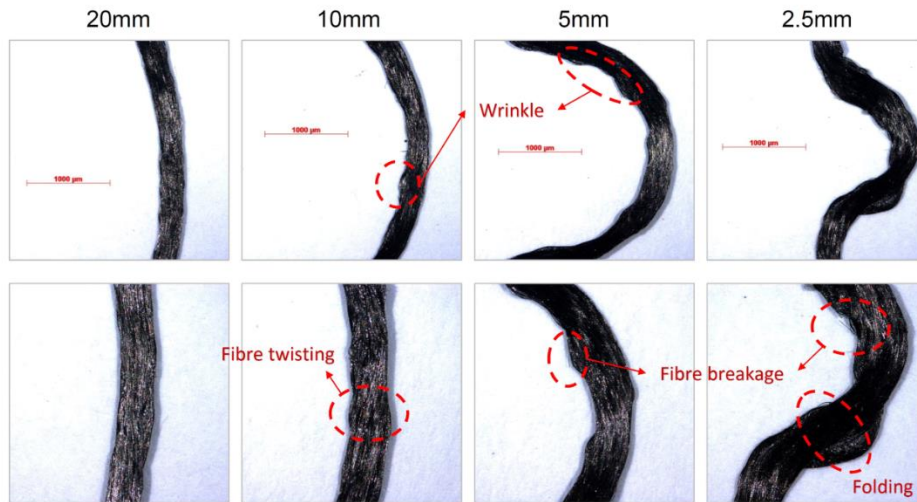


Figura 14. Defectos de impresión de fibra en función del radio de curvatura [ZhangH2021].

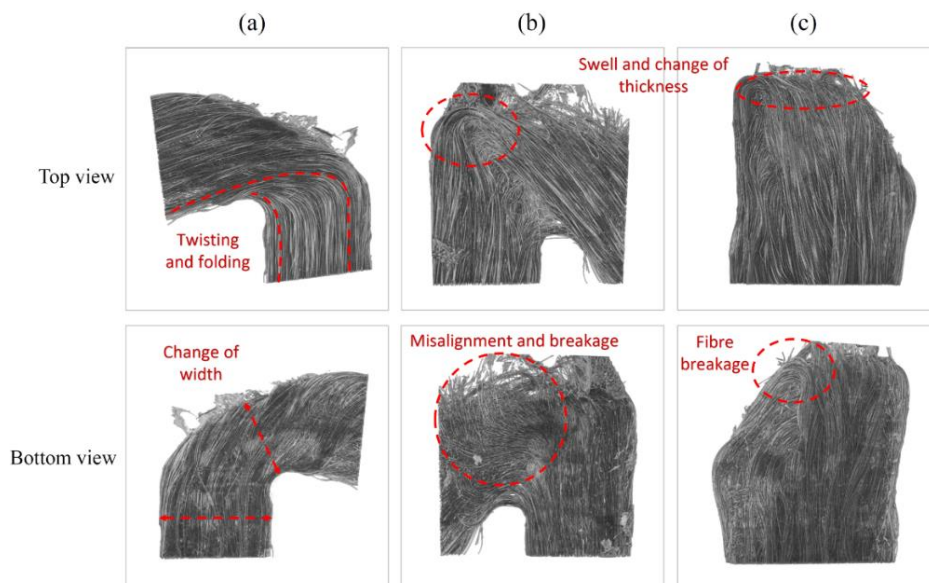


Figura 15. Torsión, *folding back* y rotura de fibras, en función del ángulo de la curva; a) 120° , b) 150° y 180° [ZhangH2021].

A su vez, Matsuzaki *et al.* [Matsuzaki2018] han analizado la rotura de fibras cCF/PA para giros de 180° y encontraron una relación directa entre el diámetro de la mecha y el radio mínimo, a partir del cual se producía la rotura de las fibras. Chabaud *et al.* [Chabaud2019] también han analizado el defecto *folding back* y la rotura de fibras por cambio de trayectoria de 180° . Para cCF/PA y cGF/PA, descubrieron que existe un radio de giro (0,6 mm) predeterminado por Markforged[®] relacionado con la distancia y el solape entre

cordones. De acuerdo con sus observaciones, concluyeron que la rotura de fibra en el caso de cCF/PA se debe a su baja tenacidad a la fractura. Dada la mayor flexibilidad el filamento de cGF/PA no sólo no rompían, sino que tomaban un radio giro más amplio, produciendo una porosidad aún mayor en la zona.

Shiratori *et al.* [Shiratori2020] han cuantificado la pérdida de propiedades mecánicas a compresión secciones impresas en cCF/PA, debido a los defectos de torsión de las fibras en zonas de impresión curva. Sus investigaciones concluyen que la degradación es aún mayor cuanto menor el radio de curvatura. Finalmente, Ichichara *et al.* [Ichichara 2020] han desarrollado un modelo de daño material, basado en modelo de daño progresivo, para piezas impresas en cCF/PA. El tipo de probeta de tracción empleada es curva (tipo “S”), por el cual se promovía el fallo interlaminar. Se analizó su comportamiento y la evolución del daño bajo carga monotónica y cíclica.

2.1.1.3. Caracterización mecánica

La tecnología cFF habilita la fabricación de prototipos funcionales en material compuesto, a pesar de su bajo porcentaje en volumen de fibra con respecto de tecnologías convencionales (Figura 16). Asimismo, la cFF permite el diseño y la fabricación de preformas 3D para posteriormente incorporarlas a procesos de fabricación convencionales como refuerzos de fibra localizados. Por ello, la tecnología tiene potencial suficiente para satisfacer la demanda de nuevos conceptos de estructuras ligeras en la industria del transporte [Goh2019, WangX2016].

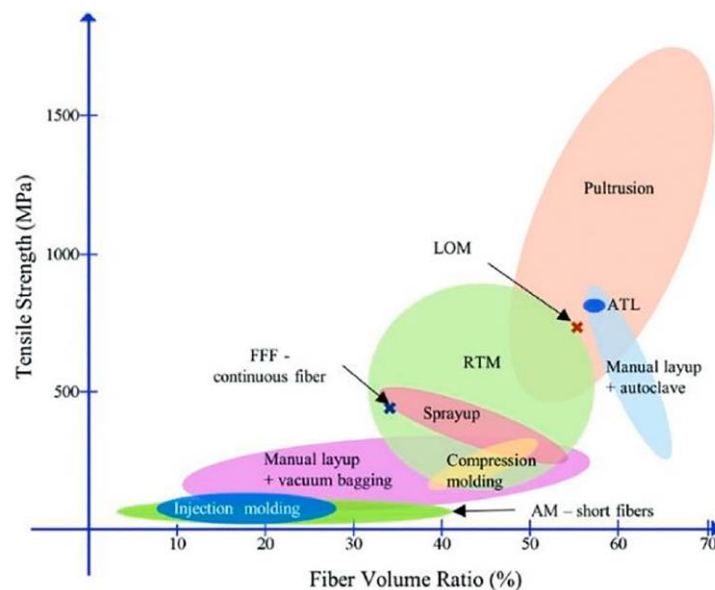


Figura 16. Potencial de la fabricación aditiva. Resistencia a tracción en función del volumen de fibra [Goh2019].

La caracterización de las propiedades mecánicas de materiales impresos cCF/PA, cGF/PA y cKF/PA ha sido realizada por varios autores siguiendo métodos de ensayo estándar como: tracción [Dickson2017, Chabaud2019, Blok2018], compresión [Arayo-Calvo2018], flexión [AlAbadi2018, Chacon2019], cortadura en el plano [Justo2018], cortadura fuera del plano [Yogeshvaran2020], resistencia interlaminar [Caminero2018b], indentación cuasiestática [Goh2018] y fractura interlaminar (Modo I y Modo II) [Iragi2019].

De estos estudios cuasi-estáticos se pueden extraer tres conclusiones principales;

- (i) se observa un modo de fallo similar en cCF/PA y cGF/PA en tracción, pero se observaron diferencias en el comportamiento a compresión,
- (ii) en los ensayos *ILSS* (resistencia a cortadura interlaminar), se demuestra que una adherencia diferente entre capas conduce a diferentes patrones de fractura, crecimiento de grietas y, por tanto, a una capacidad diferente de absorción de energía de los composites cCF/PA, cGF/PA y cKF/PA impresos, y
- (iii) los valores más altos en resistencia y rigidez a la tracción se registraron para probetas de cCF/PA.

A pesar del gran número de publicaciones recientes sobre la caracterización mecánica de 3D-cFF (Figura 17), sólo unas pocas se centran en las propiedades de impacto y absorción de energía [Kabir2020].

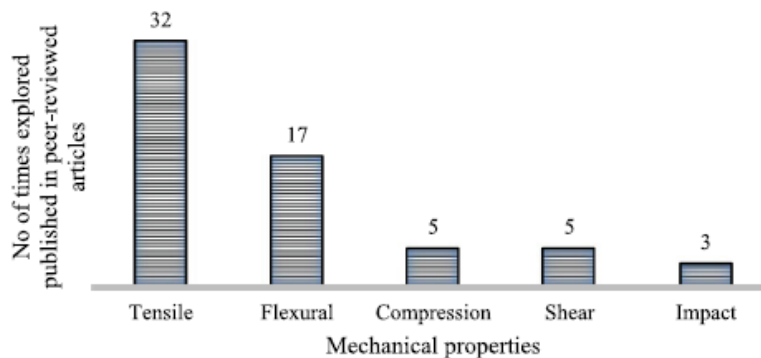


Figura 17. Número de publicaciones sobre la caracterización mecánica en impresión 3D-cFF [Kabir2020].

No obstante, no se han encontrado estudios que investiguen el comportamiento a impacto de geometrías complejas, como por ejemplo el colapso dinámico de perfiles cFRTP impresos. Sólo se han identificado dos trabajos relativos a la absorción de energía (ensayo de flexión) [Peng2020] y a impacto (ensayo de impacto Charpy) de cCF/PA y cGF/PA impresos [Caminero2018], ambos con geometría simple o estandarizada.

En los ensayos de impacto de Charpy llevados a cabo por Caminero *et al.* [Caminero2018b], las probetas de cGF/PA mostraron una mayor resistencia al impacto que las de cCF/PA. La falta de impregnación de las de fibra de vidrio por la matriz PA ha resultado ser el factor principal, por el cual se produce una mayor área delaminada y una reducción de su *ILSS*. No obstante, la resistencia al impacto del cGF/PA mejora. De entre los tres materiales analizados a *ILSS*, el cKF/PA ha mostrado la menor resistencia *ILSS*.

De acuerdo con los ensayos de cortadura fuera del plano llevados a cabo por Yogehvaran *et al.* [Yogehvaran2020] los tres materiales impresos presentan un claro límite de fluencia a diferente nivel de tensión a pesar de utilizar la misma matriz PA (Figura 18). Es por ello, que una diferencia en las propiedades mecánicas de cada una de las matrices implica una formulación de PA diferente para cada compuesto [Yogehvaran2020].

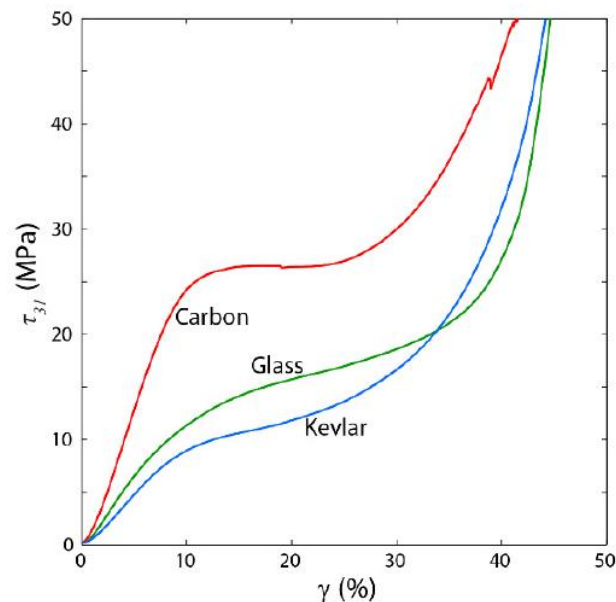


Figura 18. Ensayos de cortadura fuera del plano [Yogehvaran2020].

2.1.1.4. Naturaleza de los filamentos pre-impregnados

La matriz mantiene las fibras firmemente unidas y las protege de agentes externos como la corrosión, la degradación, la abrasión, etc. Además, el papel de la matriz es crucial para soportar la carga de compresión de los materiales compuestos y distribuir la carga entre las fibras en caso de tracción [Goh2018]. Hay que recordar que la matriz del filamento pre-impregnado se funde parcialmente y se solidifica durante el proceso de impresión en periodo de tiempo muy corto [Melenka2016].

La naturaleza de la matriz puede ser amorfa o semi-cristalina, siendo la temperatura T_g la propiedad térmica más interesante al analizar su idoneidad para el proceso de FFF. Las matrices con estructura amorfas son muy adecuadas para imprimir porque se solidifican rápidamente con menor grado de contracción, lo cual permite que la capa impresa se adhiera a la siguiente capa formando una intercara resistente. El tiempo de solidificación de las matrices semi-cristalinas, sin embargo, es largo, dependiendo del grado de cristalinidad y la velocidad de enfriamiento. Por ello, la naturaleza cristalina también provoca un alto grado de contracción y distorsión de la pieza [Penumakala2020].

En cuanto a la matriz de los composites cCF/PA, cGF/PA y cKF/PA empleados, Pascual-González *et al.* [Pascual-Gonzalez2020] han estudiado su composición y su microestructura a partir de filamentos cCF/PA, cGF/PA y cKF/PA pre-extruidos. Pascual-Gonzalez *et al.* han encontrado diferencias en las propiedades térmicas (DSC, TMA) de la matriz de PA que podrían explicar las variaciones en su rendimiento mecánico. La estructura amorfa impresa de cCF/PA y la estructura semi-cristalina de cGF/PA y cKF/PA presentaron una temperatura de transición vítrea (T_g) diferente, 143, 50 y 50 °C, respectivamente.

En el siguiente diagrama (Figura 19) se resumen los factores influyentes en las propiedades mecánicas de los materiales impresos por tecnología cFF:

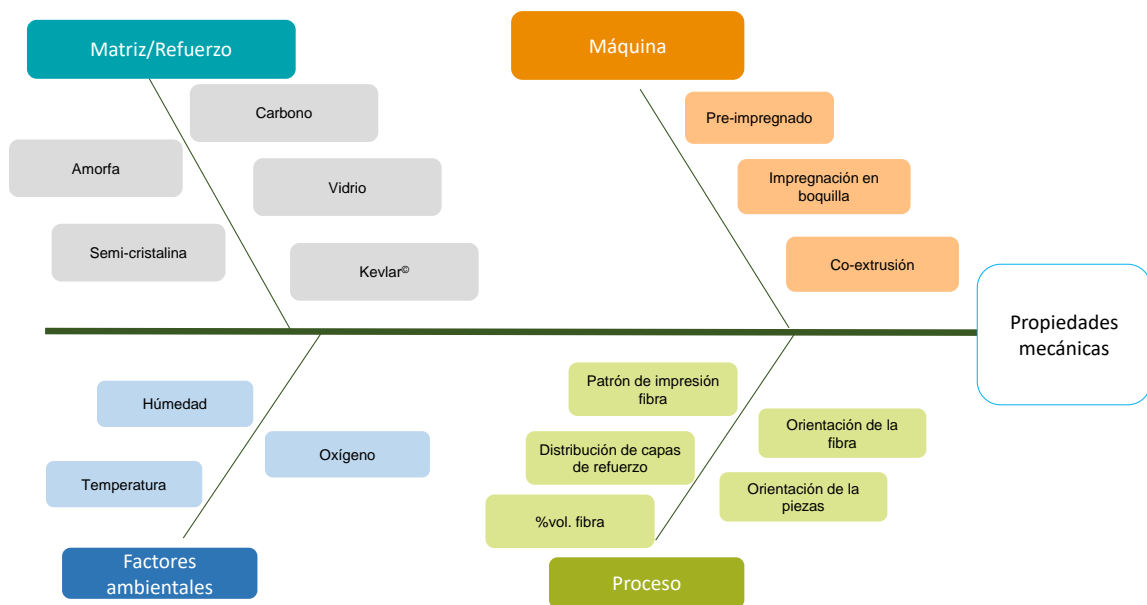


Figura 19. Factores que influyen en las propiedades mecánicas de impresión 3D – cFF.

2.1.1.5. Relación entre parámetros de impresión y propiedades mecánicas

El efecto del patrón de refuerzo, la orientación de la fibra (Figura 20a), el volumen de fibra (v_f), así como la distribución capas (Figura 20b), en las propiedades de compresión y flexión en materiales impresos (cCF/PA) ha sido analizada por Arayo-Calvo *et al.* [Arayo-Calvo2018]. La distribución de capas y el tipo de patrón de refuerzo son los factores que más influyen en las propiedades a compresión, siendo una combinación de patrón concéntrico y capas equidistantes la que mayor módulo de compresión presenta. En cuanto a las propiedades a flexión, el efecto del tipo de patrón y la orientación de la probeta son los que mayor influencia tienen, alcanzando los valores máximos de flexión para un patrón de refuerzo concéntrico con una orientación (eje X) perpendicular de la pieza con respecto de la mesa.

El efecto de la distribución de las capas cCF/PA (o la secuencia del apilamiento) en los laminados impresos, así como el volumen de fibra, ha sido analizado también por Peng *et al.* [Peng2020]. Los autores han observado que las propiedades mecánicas aumentaban al separar las capas de cCF/PA y tener un mayor número de intercaras con material de relleno. No obstante, este efecto positivo se pierda al aumentar el número de capas cCF/PA y se atribuye a la alta concentración de poros en entre capas cCF/PA.

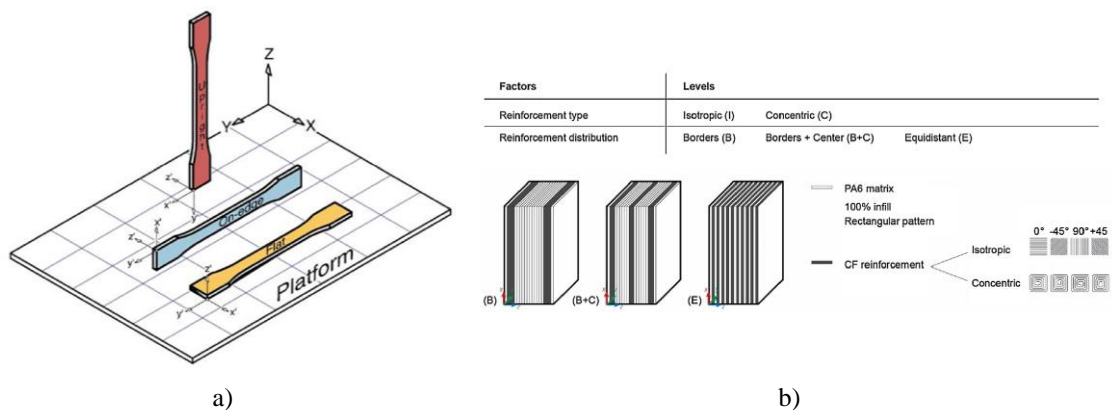


Figura 20. Influencia sobre las propiedades mecánicas; a) Orientación de la pieza con respecto de la mesa impresión [Chacón2019], b) Tipo y distribución de las capas de refuerzo [Arayo-Calvo2018].

La relación de los parámetros de impresión: orientación de la pieza la orientación de la fibra, altura de capa y el volumen de fibra con las propiedades mecánicas (flexión y tracción) en materiales impresos de cCF/PA, cGF/PA y cKF/PA ha sido estudiado por [Chacon2019]. Los resultados de los ensayos de caracterización tracción y flexión tres puntos, arrojan una clara dependencia de la orientación de la pieza, obteniéndose valores más altos para probetas con orientación (eje X) paralela a la mesa.

Adicionalmente, se ha comprobado que la rigidez y resistencia de los materiales compuestos cCF/PA aumenta con el aumento del volumen de fibra y de manera similar pero más moderada en cGF/PA y cKF/PA (Figura 21).

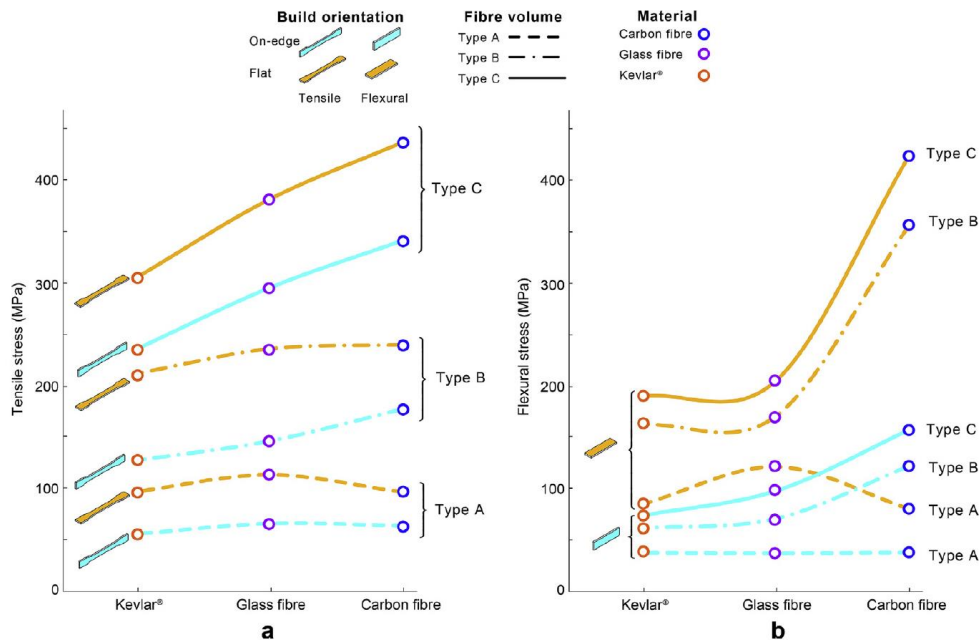


Figura 21. Valores de resistencia; a) tracción y b) flexión con respecto de la orientación, volumen de fibra y material de refuerzo [Chacon2019].

En cuanto a los parámetros que influyen en la resistencia de impacto Caminero *et al.* [Caminero2018a] han analizado la influencia del tipo de material de refuerzo, el volumen de fibra y la orientación de la probeta (tipo Charpy) con respecto de la mesa. La orientación de la pieza impresa resultó ser el parámetro principal junto con el volumen de fibra. Dada la baja tenacidad a la fractura, el cCF/PA ha presentado la resistencia a impacto más baja frente al cGF/PA que presentó la resistencia más alta.

La influencia del espesor de capa, la distribución de las capas de refuerzo, el tipo de fibra de refuerzo y el volumen de fibra en las propiedades interlaminares *ILSS* de compuestos impresos (cCF/PA, cGF/PA y cKF/PA) ha sido estudiado por Caminero *et al.* [Caminero2018b]. A través de los ensayos de *ILSS*, se ha observado que las mejores propiedades interlaminares corresponden a laminados de cCF/PA mientras que el cKF/PA mostraba las peores, con áreas delaminadas más extensas. De hecho, un aumento del volumen de fibra no ha implicado una mejora significativamente el valor de *ILSS* para cKF/PA, al contrario que cCF/PA, cGF/PA. Por ello, la baja adherencia de las capas de cKF/PA se asocia a una falta de impregnación de las fibras de Kevlar®.

La sensibilidad de las propiedades mecánicas de los materiales impresos (cCF/PA y cGF/PA) con respecto de la humedad han sido investigadas por Chabaud *et al.* [Chabaud2019]. Se ha observado una reducción en dirección longitudinal, del 25% en rigidez y 18% en resistencia para cCF/PA y de hasta un 25% en resistencia para el cGF/PA. En cuanto a la dirección transversal, la reducción en propiedades es de un 45% y un 70%, para cCF/PA y de hasta un 80% en rigidez y 45% en resistencia para el cGF/PA.

Peng *et al.* [Peng2020] también han analizado la influencia de la orientación de la fibra, la distribución de las capas de cCF/PA y la dirección de la carga en la capacidad de absorción de energía del material impreso por flexión. Se concluye que el efecto de las capas con orientaciones a $\pm 45^\circ$, separadas y con una orientación perpendicular a la mesa (eje Z), contribuyen a un mejor comportamiento a cortadura del laminado y por ende a una mayor absorción de energía. Los mecanismos de factura que permiten un mayor nivel de absorción de energía son: delaminación entre capas y rotura de fibra.

2.1.1.6. Modos de fractura

El análisis de fallo y fractología se ha llevado a cabo para diferentes modos de carga, bajo norma estándar y geometría simple, pero no se ha encontrado una caracterización completa para los tres materiales cCF/PA, cGF/PA y cKF/PA.

- Fallo bajo carga de tracción

Goh *et al.* [Goh2018] ha descrito los mecanismos de fallo a tracción y flexión de cCF/PA y cGF/PA (Figura 22a). Los micro-mecanismos de fallo detectados en las probetas cCF/PA contempla la rotura transversal de las fibras y la fractura de la matriz por cortadura (Figura 22b). También se ha detectado el fallo por cortadura interlaminar entre capas cCF/PA y entre cordones cGF/PA (Figura 22c-d). La rotura de fibras (Figura 22e) denota la capacidad de transmisión de carga de la matriz y una adecuada impregnación de las fibras cCF/PA mientras que la fractura cGF/PA presenta un menor número de fibras y grietas longitudinales. Las delaminaciones entre capas denotan una intercara débil debido a la falta de consolidación del material (Figura 22f-g). Melenka *et al.* [Melenka2016] ha analizado también los micro-mecanismos encontrados en probetas de cKF/PA, la comparativa entre ambas superficies de fractura muestra un fallo cohesivo para las probetas de cCF/PA y un fallo por arrancamiento de las fibras cKF/PA, lo cual denota una notable diferencia con respecto de la adherencia fibra Kevlar®.

En cuanto a los mecanismos de fallo a tracción transversal, los planos de rotura se localizan en planos perpendicular a la dirección de la carga y básicamente se componen de modos de factura de la matriz, rotura de fibras y delaminación entre cordones [Iragi2019].

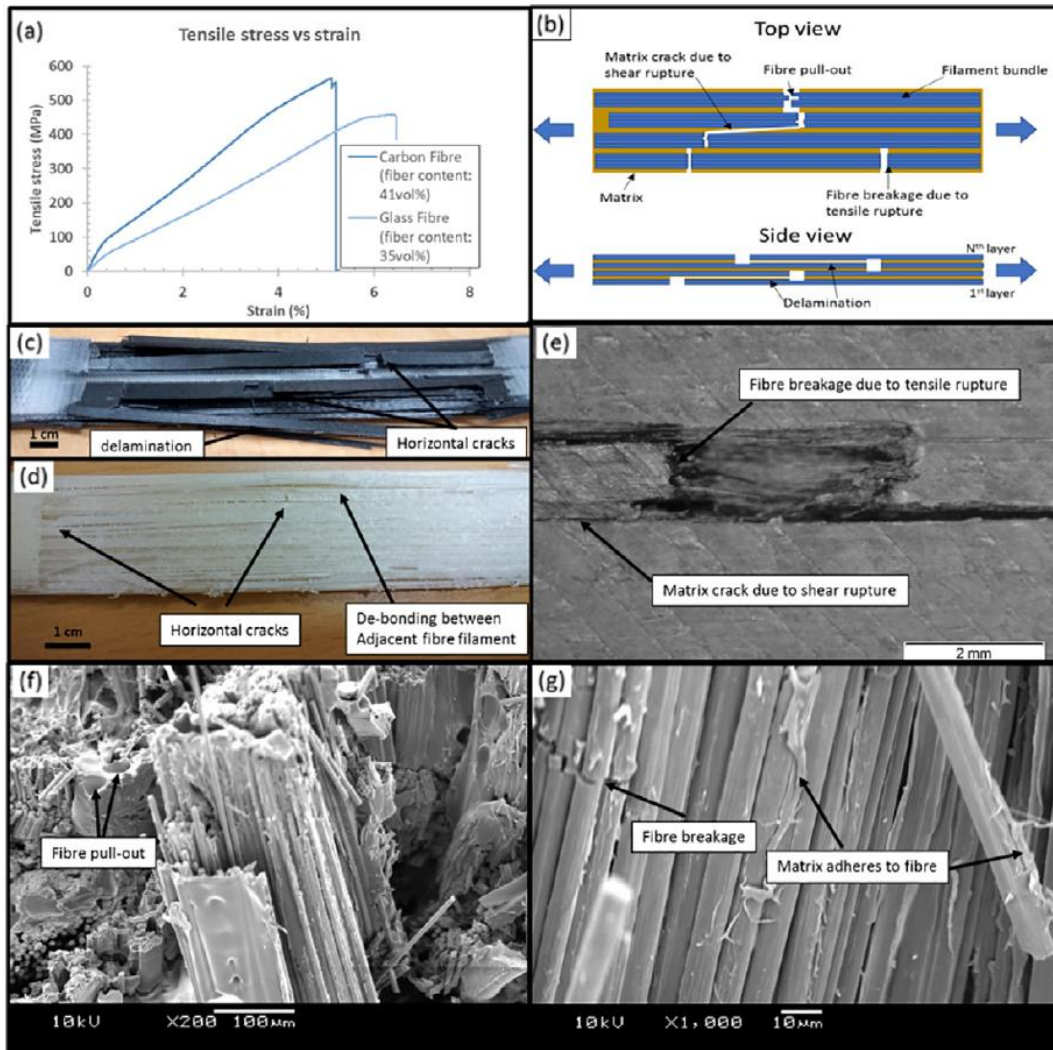


Figura 22. a) Curvas tensión-deformación de probetas de tracción cCF/PA y cGF/PA, b) mecanismos de fractura presentes en la probeta tracción, c) fractura transversal de fibras y delaminaciones entre capas a tracción (cCF/PA), d) delaminaciones entre cordones y grietas longitudinales (cGF/PA), e) fractura de la matriz por cortadura y rotura de fibras, f) Fibre pull-out y g) fractura transversal de fibras y residuo de matriz adherido a las fibras [Goh2018].

Dickson *et al.* [Dickson2017] relaciona el fallo interlaminar de las probetas de cKF/PA con una mayor concentración de poros en la intercara, añadida a la mencionada insuficiente impregnación (Figura 23) de las fibras de Kevlar[®]. En general, la fractura de las probetas a tracción de cCF/PA se puede considerar frágil dada su corta alargamiento (1,27%) a rotura [Iragi2019].

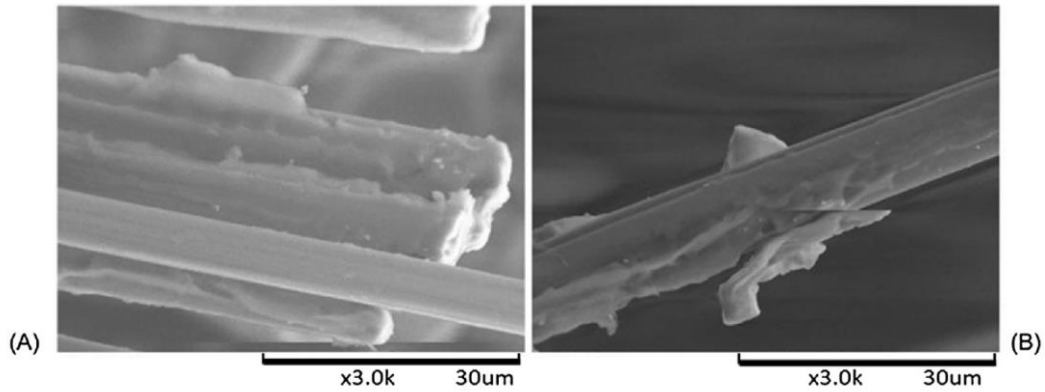


Figura 23. Imágenes de SEM de probetas de tracción fracturadas. a) cCF/PA y b) cKF/PA [Dickson2017].

- Fallo bajo carga de flexión

Los micro-mecanismos de fractura por carga de flexión han sido documentados por [Goh2018, Arayo-Calvo2018, Iragi2019] y se muestran en la Figura 24. Se ha observado una notable diferencia entre los mecanismos de fallo de cCF/PA y cGF/PA. Para el caso de cCF/PA, a pesar de que el inicio de grieta comienza en la parte comprimida de la probeta, la carga de flexión sigue aumentando progresivamente hasta la rotura de fibras en parte inferior. Para el cGF/PA, el fallo por flexión no se debe a la rotura de fibra vidrio sino por un pandeo localizado Figura 24a) y delaminación entre cordones de fibras en la parte superior Figura 24b-d), seguido de pandeo por cortadura de la parte central (Figura 24c) y fallo de la matriz [Goh2018].

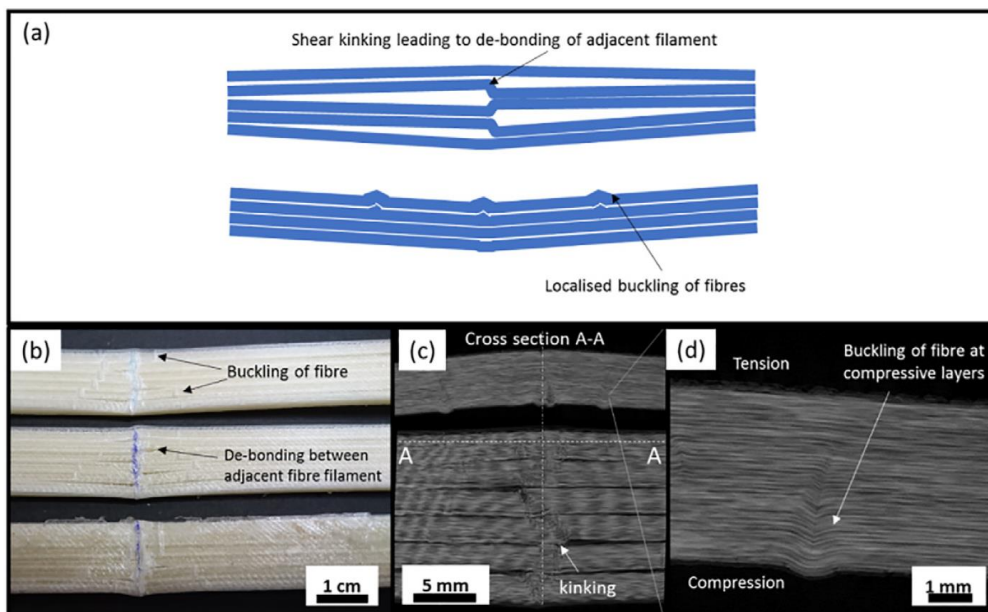


Figura 24. a) Mecanismos de fractura presentes en probetas de flexión cGF/PA. b) pandeo de las fibras de vidrio (vista superior probeta), c) Pandeo de fibras por cortadura (centro de a probeta), d) bandas pandeo de fibras en las capas sometidas a compresión (vista lateral) [Goh2018].

- Fallo por cortadura

Durante el ensayo de cortadura en el plano, la reorientación de las fibras a $\pm 45^\circ$ permite alcanzar deformaciones a rotura de más del 50% [Justo2018]. No obstante, las imágenes de microscopio muestran signos de una fractura frágil para probetas de cCF/PA mientras que las probetas de cKF/PA presentan una fractura dúctil (Figura 25) con un mayor alargamiento y distorsión a rotura [Oztan2019]. Iragi *et al.* [Iragi2019] han analizado la superficie de fractura de las probetas fracturadas a cortadura en el plano y han observado el fallo por cortadura entre los cordones (Figura 26), delaminaciones entre capas y rotura y arrancamiento de las fibras de carbono.

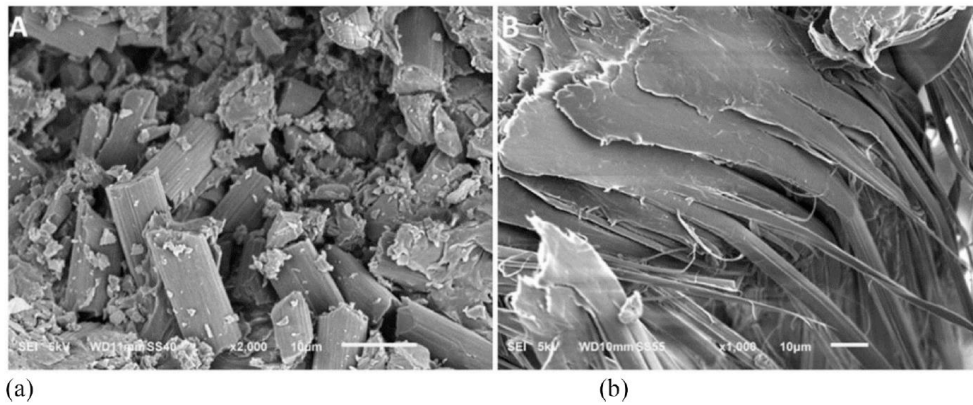


Figura 25. Imágenes de SEM de probetas de cortadura fracturadas; a) comportamiento frágil de cCF/PA y b) dúctil cKF/PA [Oztan2019].

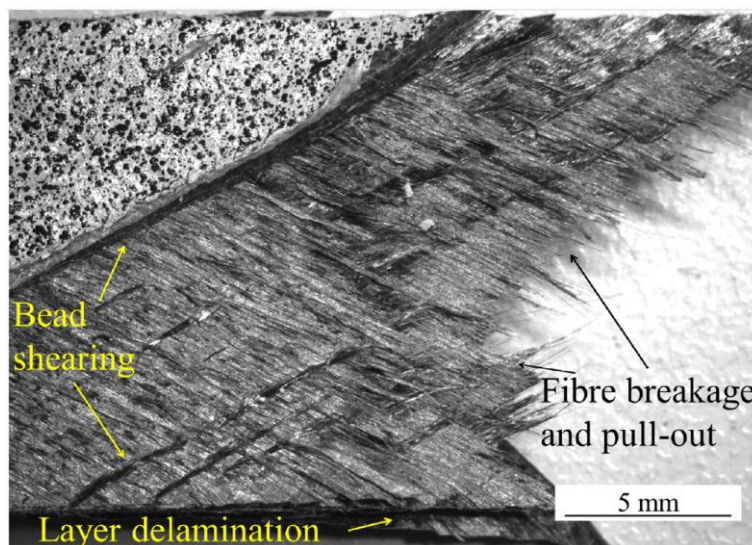


Figura 26. Imágenes de macroscópicas de la superficie de fractura de las probetas de cortadura (cCF/PA) [Iragi2019].

- Fallo bajo carga de compresión.

El comportamiento a compresión del material unidireccional impreso se ha analizado por [Iragi2019, Arayo2018, Justo2017]. En la Figura 27 se muestran los micro-pandeos producidos en la probeta de compresión cCF/PA, bajo carga de compresión en dirección de la fibra. En el caso de compresión perpendicular a la fibra, se encontró una diferencia significativa entre el fallo por delaminación fibra-matriz para cCF/PA y micro-pandeos [Iragi2019, Arayo-Calvo2018], y el fallo por inestabilidad lateral observado en la cGF/PA [Justo2018].

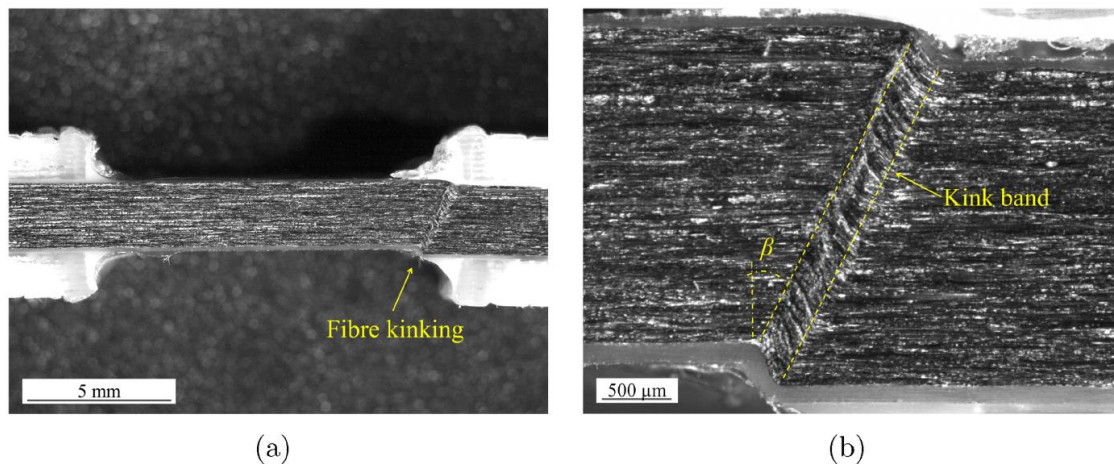


Figura 27. Imágenes de macroscopio (vista lateral) fractura longitudinal: a) pandeo de fibras en las cercanías de las sufrideras, b) bandas de pandeo e inclinación β [Iragi2019].

- Impacto

Los mecanismos de fallo presentes en las probetas post-impactadas, se muestran en la Figura 28, dependen de la naturaleza del material refuerzo (cCF/PA, cGF/PA y cKF/PA). Para el caso del carbono y vidrio, los principales modos de fractura se corresponden con mecanismos de rotura de fibras y fractura de matriz (Figura 28a-b). La baja impregnación de las fibras de Kevlar[®] puede explicar el bajo porcentaje de fibras rotas encontradas en las probetas post-impactadas y la mayor cantidad de fibras arrancadas debido la baja adherencia fibra-matriz (Figura 28c).

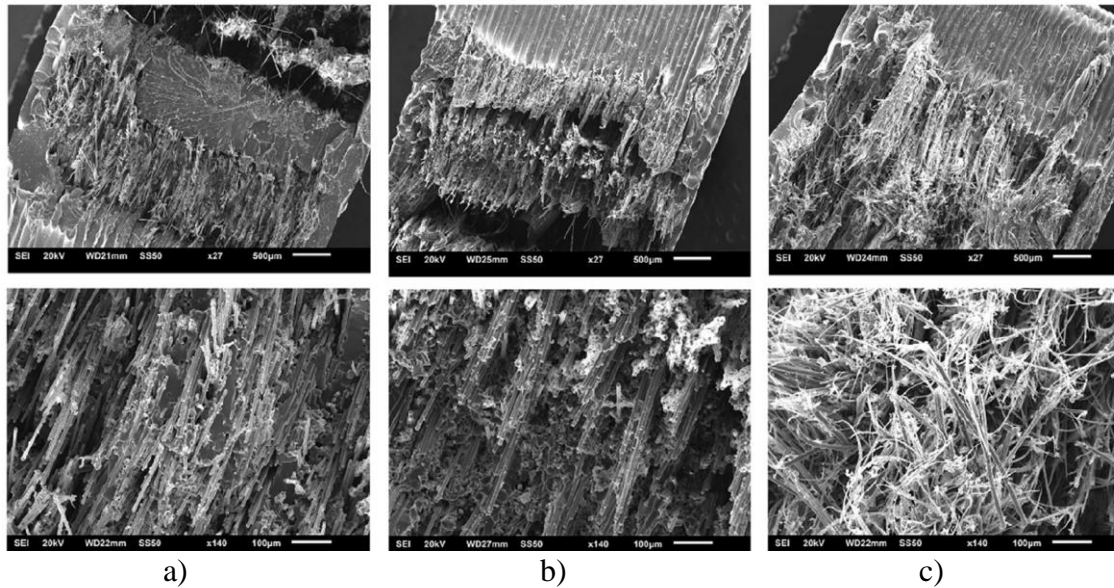


Figura 28. Imágenes de SEM de las superficies fracturadas (probetas tipo Charpy). Probeta con orientación perpendicular y distribución separada de capas; a) cCF/PA, b) cGF/PA y c) cKF/PA [Caminero2018b].

2.1.2. Laminated Object Manufacturing

El proceso de impresión 3D *Laminated Object Manufacturing* (LOM) es el proceso mediante el cual láminas apiladas se unen y se cortan para formar una estructura 3D (Figura 29).

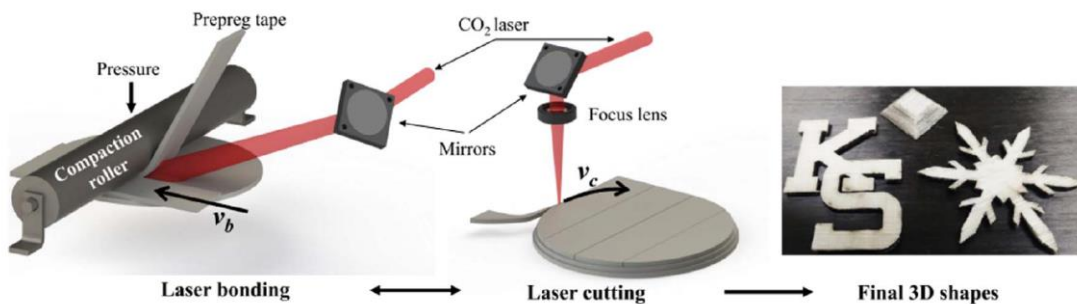


Figura 29. Esquema proceso LOM [Parandoush2017a].

A pesar de que esta tecnología de AM 3D, ya era conocida en la década de los noventa para la fabricación de mapas topográficos mediante el apilamiento de láminas de madera. LOM es la única tecnología aditiva capaz de imprimir piezas 3D con porcentajes en volumen de fibra de hasta 52-55%, ya que utiliza pre-impregnados de material compuesto reforzados con fibra de continua en formato de lámina o cinta [Parandoush2017a].

A pesar de los esfuerzos en mejorar la consolidación del material y las propiedades de la intercara aplicando presión mediante rodillo compactador o vacío en la mesa de impresión [Rosselli1997]. La tecnología LOM tiene el mismo inconveniente que las tecnologías de FFF, una adherencia baja entre las láminas apiladas [Klosterman1998].

La tecnología LOM actual, también conocida como AM de materiales termoplásticos reforzados con fibra continua asistido por láser presenta una mejora en la adhesión interlaminar gracias a la eliminación de poros entre laminas. Parandoush *et al.* [Parandoush2017a] han propuesto un proceso (Figura 29) que asegura la unión entre capas de substrato (capas del PP semi-cristalino) a partir de la aplicación de un calentamiento localizado y aplicación de presión mediante un rodillo compactador. El proceso de calentamiento de la matriz incluye su paso a un estado viscoso, permitiendo que las cadenas poliméricas se intercalen/entremezclen a través de un mecanismo de difusión. A posterior el material se acaba enfriando, dando lugar a su consolidación (Figura 30).

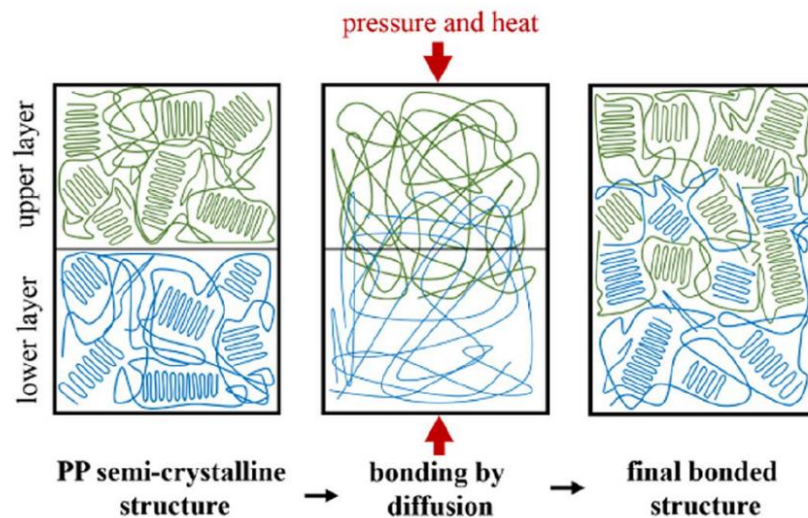


Figura 30. Mecanismo de difusión entre capas LOM asistido por láser. [Parandoush2017a].

2.2. ESTRUCTURAS LIGERAS SOMETIDAS A IMPACTO

El diseño sostenible es actualmente una de las directrices en el desarrollo de componentes de automoción, siendo el diseño ligero, el ahorro de energía y el uso eficiente de las materias primas objeto de muchas investigaciones. Sin embargo, paralelamente a la preocupación por el medio ambiente, la seguridad sigue siendo un factor crítico, y los fabricantes deben esforzarse por garantizar o mejorar la seguridad de los ocupantes del vehículo en situaciones de impacto [Kaluza2017].

En este contexto, los polímeros reforzados con fibras (FRP) han ganado terreno en la industria del automóvil debido a sus propiedades de ligereza, resistencia y rigidez específicas, resistencia a la corrosión, coste y facilidad de fabricación [Gonzalez2017]. Otra ventaja es que los mecanismos de absorción de energía de estas estructuras compuestas se basan en el colapso progresivo del material de un modo frágil, a diferencia de las estructuras metálicas, que están diseñadas para absorber energía por deformación plástica [Hull1991]. Desde el punto de vista del diseño, la mayoría de los componentes de resistentes al impacto se conciben como estructuras espaciales de pared delgada ya que estos perfiles son capaces de disipar niveles altos de energía en escenarios de impacto [Mamalis1998, Palanivelu2011].

Varios autores [Aguirre2012, Hamada1992, Belingardi2013, Esnaola2016b, Saenz-Dominguez2019, LiS2020, Zhao2020] han concluido que los principales parámetros que afectan a la absorción específica de energía (*SEA*) de las estructuras de materiales compuestos son la sección transversal del perfil, el diseño de iniciadores del colapso y su ubicación, la arquitectura del refuerzo, la orientación de las fibras y el contenido de fibras y poros. En la Figura 31, se resumen los parámetros identificados con relación a la capacidad de absorción de energía de los perfiles tubulares.

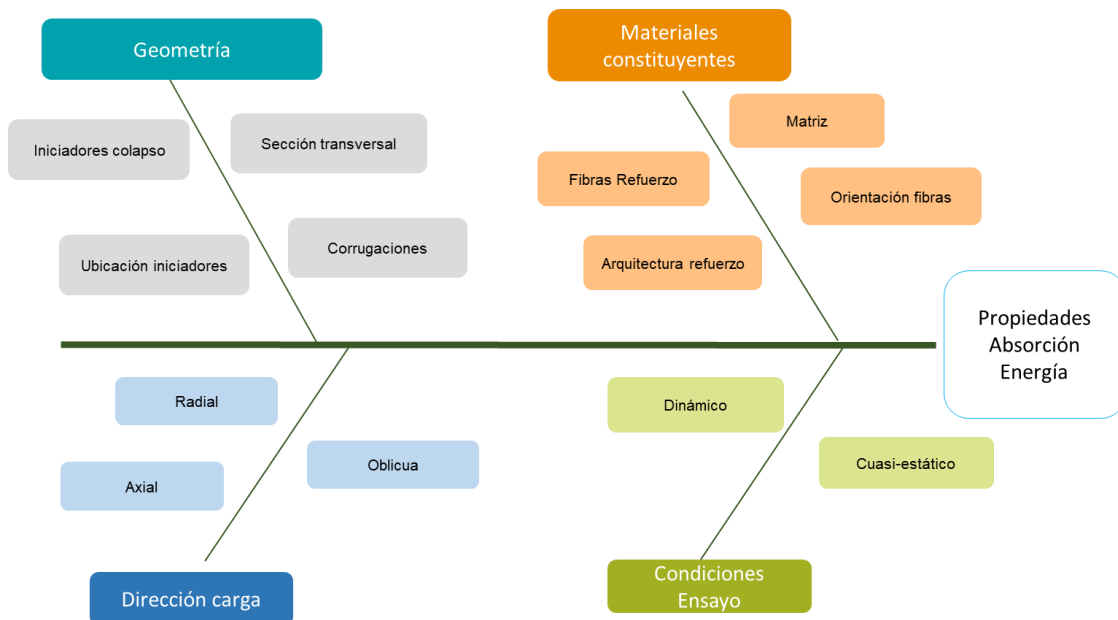


Figura 31. Identificación de los parámetros que influyen en las propiedades de absorción.

La mayoría de los estudios encontrados en la bibliografía relacionada con el diseño de estructuras de impacto se centran en polímeros termoestables reforzados con fibras continuas (cFRP) con secciones transversales no complejas fabricadas por laminado a mano [Palanivelu2011, LiS2020], pultrusión curva [Saenz-Dominguez2019], autoclave [Hamada1992] y prensa en caliente [Zhao2020].

Los materiales compuestos de matriz termoplástica y reforzados con fibras continuas (cFRTP) están sustituyendo a los compuestos termoestables convencionales debido a su menor tiempo de ciclo de proceso, a su mayor tasa de reciclaje y al *SEA* (Figura 32) para los componentes estructurales con carga de impacto [ParkCK2012, Frketic2017]. Se ha explorado su uso en una serie de procesos de fabricación convencionales, como el moldeo por compresión y el termoformado, para algunos componentes de la estructura primaria del automóvil. No obstante, sus restricciones en términos de diseño complejo, orientación no convencional de las fibras o costes, limitan su uso [Striewe2018, Zarei2007].

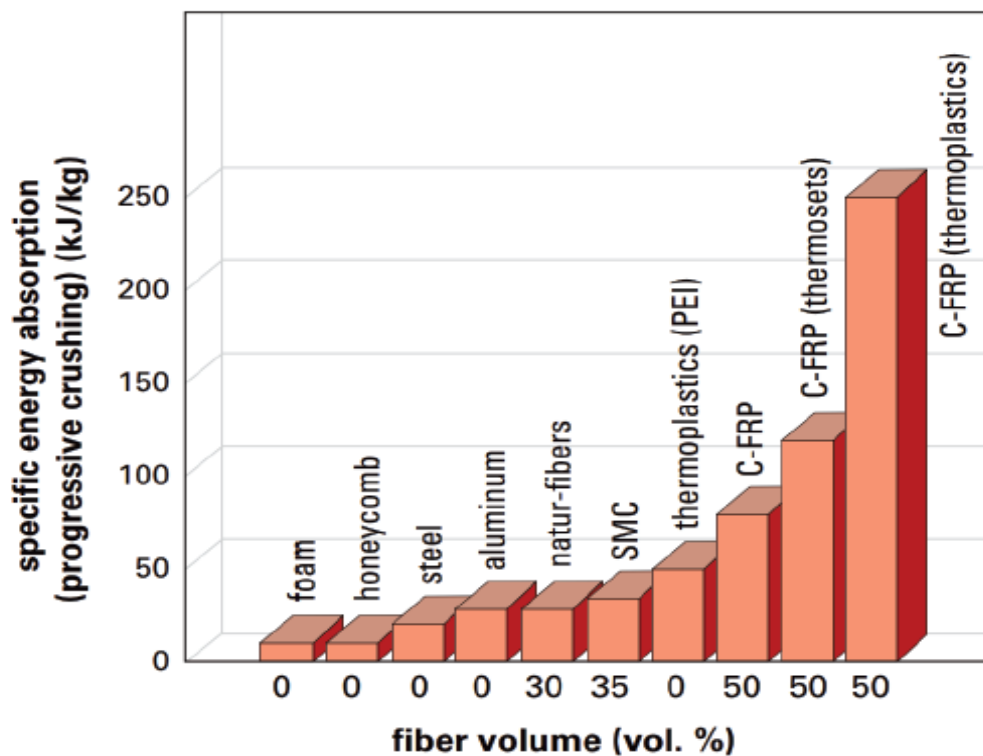


Figura 32. Valores de absorción de energía (*SEA*) en automoción [ParkCK2012].

2.2.1. Estructuras tubulares

La tendencia actual en el diseño de componentes para la seguridad pasiva en vehículos se centra en diseñar una zona delantera y trasera colapsable, no sólo para absorber la energía en el impacto sino también para minimizar la deceleración y el índice de daño de los ocupantes a bordo. Para ello, Belingardi *et al.* [Belingardi2013] han planteado una optimización geométrica de la sección transversal (Figura 33) y en la curvatura de la viga del parachoques. Análogamente Mahdi *et al.* [Madhi2012] han concluido que absorbedores como los “crash-box” deben proporcionar una longitud de colapso amplia que reduzca progresivamente esa deceleración durante el impacto.

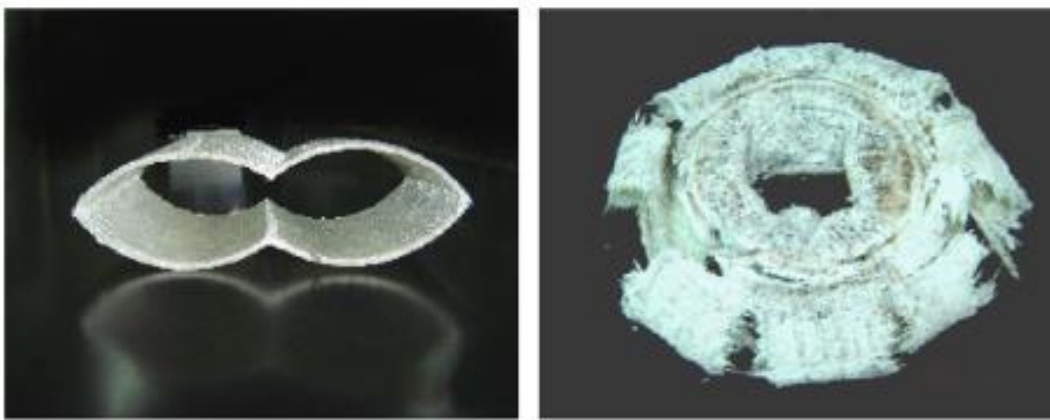


Figura 33. Influencia de la geometría de la sección transversal en el valor del SEA [Abdewi2008].

2.2.1.1. Geometría del perfil e iniciadores del colapso

En este sentido, Esnaola *et al.* [Esnaola2015] han estudiado los mecanismos de inicio del colapso en *crash-box* cargadas axialmente mediante el mecanizado de *trigger* o muescas (Figura 34a) en el extremo del perfil, así como la influencia del volumen de fibra en las propiedades de absorción de energía. La sección trasversal del perfil, así como el ángulo del bisel mecanizado se muestra en la Figura 34b. Los valores de SEA obtenidos para un volumen de fibra de entre 40-47% son de 56 kJ/kg, para volúmenes de fibra superior al 47% no se ha encontrado un aumento significativo de la absorción de energía.

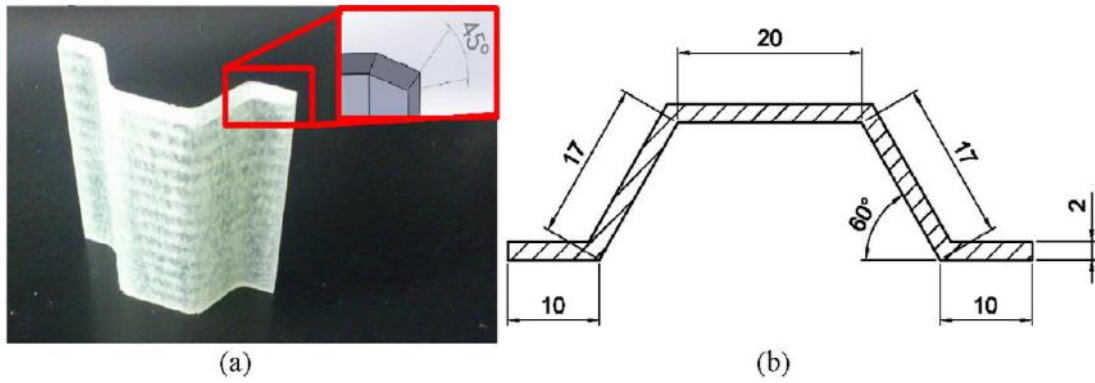


Figura 34. a) Sección perfil semi-hexagonal y bisel mecanizado. b) Dimensiones de la sección [Esnaola2018].

Por otro lado, Palanivelu *et al.* [Palanivelu2011] han investigado la influencia de sección transversal (Figura 35), incluyendo geometrías con corrugaciones axiales, en el comportamiento a *crush* axial de los tubos. Los autores han demostrado que las secciones más eficientes son la rectangular y hexagonal y que el mecanizado de iniciadores de tipo tulipa en el extremo de perfil reduce el valor de la carga máxima de colapso.

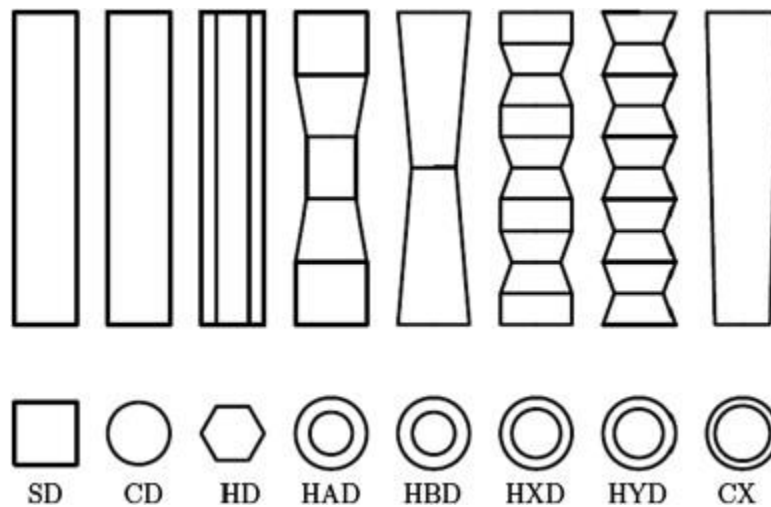


Figura 35. Diferentes geometrías de tubo en material compuesto [Palanivelu2011].

Rouzegar *et al.* [Rouzegar2015] han analizado la influencia de la presencia de discontinuidades en el comportamiento a *crush* de estructuras tubulares, no sólo han encontrado la mejor tipología de las discontinuidades sino también su mejor disposición en el absorbedor para maximizar su absorción de energía (Figura 36).

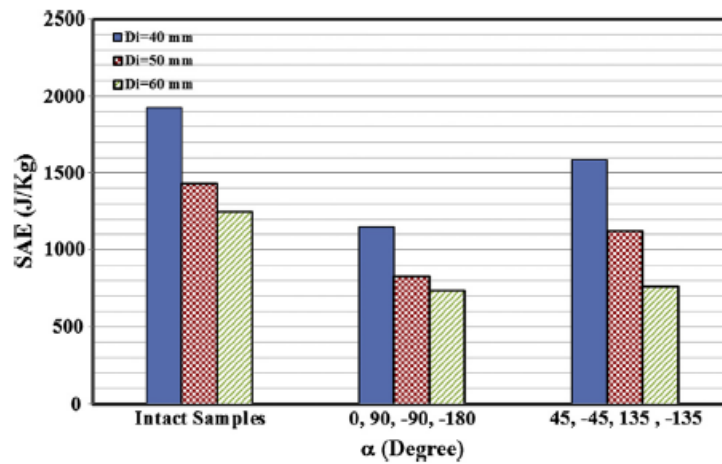


Figura 36. Valores de SEA, diámetro (D_i) del perfil de composite y ángulos (α) de los iniciadores de colapso [Rouzegar2015].

De manera adicional, Belingardi *et al.* [Belingardi2013] han propuesto diseñar zonas de concentración de tensiones, como vértices o corrugaciones, en la sección transversal de viga (Figura 37) del parachoques que formen largas grietas longitudinales para la absorción de energía de manera progresiva, en componentes sometidos a cargas transversales/radiales.

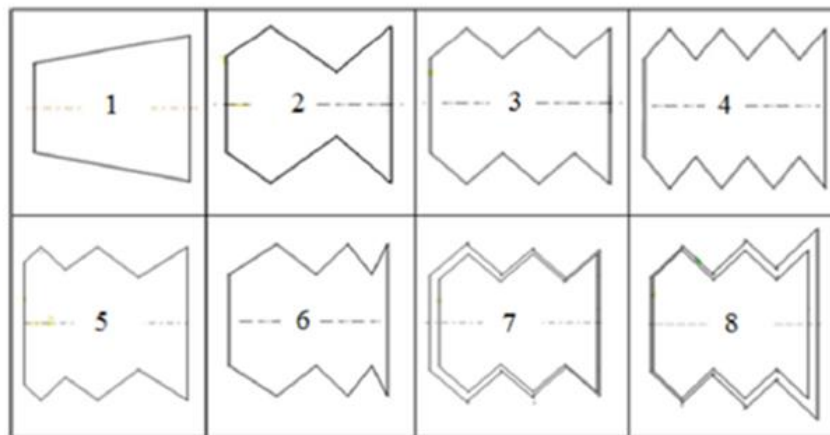


Figura 37. Diferentes conceptos de sección transversal de parachoques [Belingardi2013].

Abdewi *et al.* [Abdewi2008] han estudiado, por su parte, la mejora en la compresión quasi-estática (axial y radial) de perfiles de GFRP, fibra en formato tejido y con corrugaciones radiales (Figura 38). Los perfiles con corrugados radiales mostraron un modo de colapso axial estable y con un SEA superior comparado con el perfil tubular. No obstante, no se observó mejora alguna en el comportamiento a compresión en dirección radial.

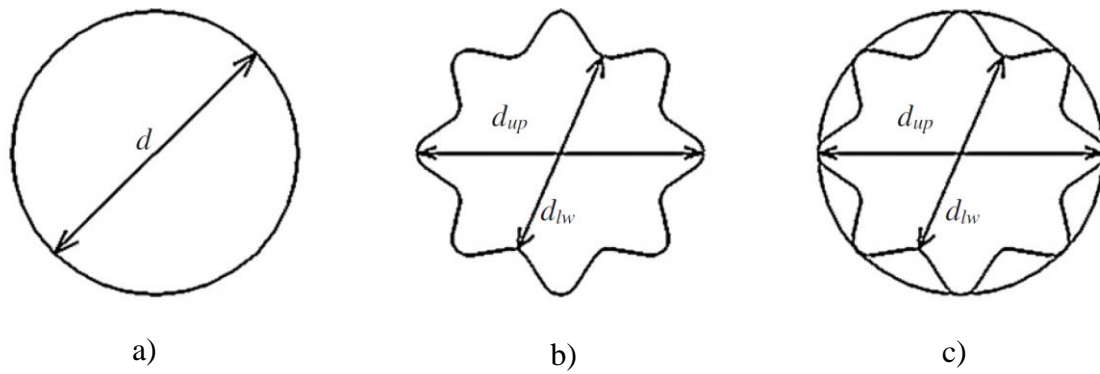


Figura 38. Sección transversal; a) Perfil tubular, b) corrugado y c) compuesto [Abdewi2007].

2.2.1.2. Materiales constituyentes y proceso de fabricación

Farley *et al.* [Farley1989] ha analizado la relación entre propiedades mecánicas y capacidades de absorción de energía de perfiles CFRP (Figura 39), de acuerdo con sus materiales constituyentes y la arquitectura de la fibra de refuerzo: orientación y secuencia de apilamiento.

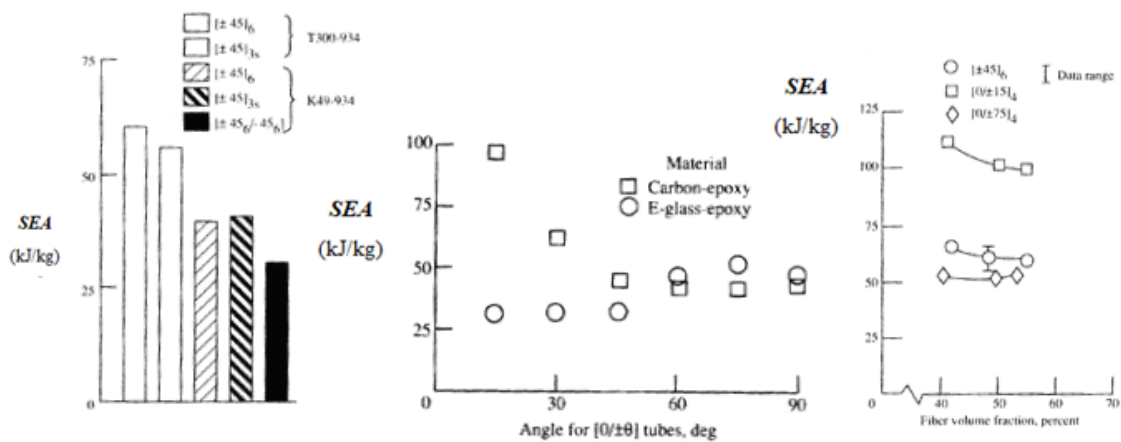


Figura 39. Valores de SEA axial; a) fibra de refuerzo; b) la orientación de la fibra, c) volumen de fibra [Farley1989].

Por otro lado, Esnaola *et al.* [Esnaola2018] han analizado el efecto del proceso de fabricación en la capacidad de absorción de perfiles de fibra de vidrio (GFRP) fabricados mediante métodos convencional frente a la pultrusión ultravioleta (UV). De su trabajo se extrae que existe una relación directa entre el contenido en poros y propiedades mecánicas como el *ILSS* y el valor *SEA*, resultando que para el valor obtenido de *ILSS* más bajo corresponde con el valor *SEA* más bajo también.

Las investigaciones llevadas a cabo por Esnaola *et al.* [Esnaola2018] y Saenz-Dominguez *et al.* [Saenz-Dominguez2019] han identificado el proceso de pultrusión UV como el proceso más eficiente para la fabricación de perfiles (Tabla 1). Existe un amplio abanico de aplicaciones para el proceso de pultrusión UV ya que ofrece ventajas sobre la pultrusión tradicional a pesar de las bajas propiedades que ofrece en la dirección transversal.

Tabla 1. SEA quasi-estático y axial para diferentes procesos de fabricación de composites [Esnaola2018].

Ref.	P_{mean} (kN)	P_{max} (kN)	CFE (%)	SEA (kJ/kg)	Modo fallo
Infusión convencional	8,3 ($\pm 0,4$)	15,2 ($\pm 0,3$)	54,3 ($\pm 2,9$)	31,1 ($\pm 1,7$)	Estable
Infusión UV	8,4 ($\pm 0,6$)	13,4 ($\pm 0,9$)	63,0 ($\pm 7,4$)	31,4 ($\pm 1,0$)	Estable
Laminado a mano	15,6 ($\pm 0,4$)	21,7 ($\pm 0,8$)	72,0 ($\pm 0,7$)	52,0 ($\pm 1,8$)	Estable
Pultrusión UV	13,8 ($\pm 0,6$)	17,9 ($\pm 0,7$)	77,3 ($\pm 2,8$)	48,6 ($\pm 1,3$)	Estable

2.2.1.3. Dirección de la carga

El colapso lateral en perfiles tubulares de composite ha sido estudiado por varios autores y todos ellos han constatado unas propiedades de SEA radiales muy inferiores a las obtenidas en dirección axial, debido a la falta de rigidez lateral del perfil y la orientación de la fibra preferentemente longitudinal [Gupta2000, Abdewi2008, Madhi2012].

Los estudios de Madhi *et al.* [Madhi2012] han encontrado una relación directa entre la sección transversal del perfil, la dirección radial de la carga y la capacidad de absorción de energía en perfiles huecos hexagonales. Madhi *et al.* han demostrado que la incorporación de fibras en dirección circunferencial mejora la capacidad de absorción de energía de los composites GRFP. Esto se debe a que la presencia de fibras en dirección circunferencial controla el crecimiento de grietas interlaminares.

Gupta *et al.* [Gupta2000] han analizado el colapso lateral quasi-estático de perfiles tubulares (cilíndricos) y han identificado la relación entre la baja absorción de energía y el modo de colapso lateral inestable de los perfiles compuesto (GFRP). A su vez han desarrollado un modelo matemático, en función de parámetros geométricos del perfil, para la estimación de la carga de colapso. Los puntos de generación de grietas longitudinales que conllevan el colapso inestable del perfil se muestran en la Figura 40.

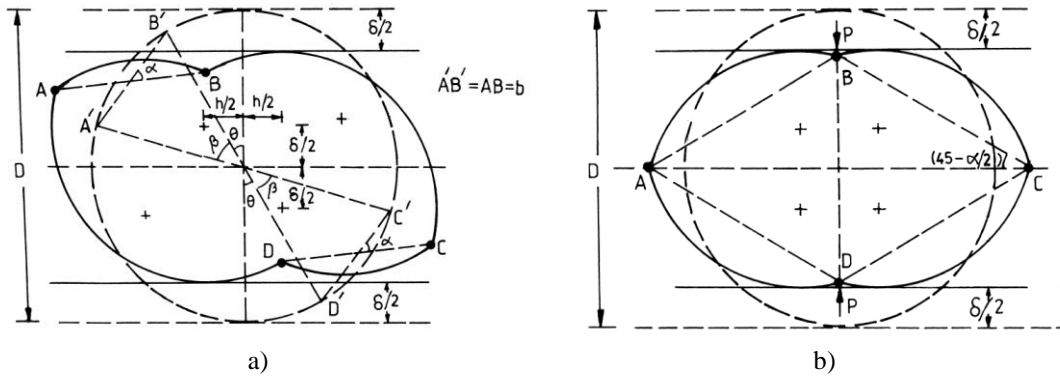


Figura 40. Modos de colapso radial inestable en perfiles tubulares. Ratio entre diámetro exterior (D) y espesor (t); a) $D/t < 10$ y b) $D/t > 10$ [Gupta2000].

2.2.1.4. Velocidad de ensayo

La influencia de la velocidad del ensayo sobre el comportamiento a *crush* de los perfiles cFRP ha sido estudiada por varios autores [Arao2012, Harding1983, Farley1991]. Se concluye que la sensibilidad de las propiedades de absorción de energía con respecto de la velocidad de deformación depende de los materiales constituyentes del composite: fibra y matriz.

La viscoelasticidad de la matriz termoplástica influye en el comportamiento del perfil de composite cFRTP: por un lado, existe el fenómeno de endurecimiento por deformación y, por otro lado, un efecto contrapuesto de reblandecimiento provocado por un calentamiento adiabático producido durante impacto [Siviour2016]. Además, se ha relacionado una mayor influencia de la velocidad del ensayo para materiales compuestos con zonas ricas en resina, dado que las zonas con mayor concentración de resina son susceptibles a mayores niveles de deformación y plastificación [Vieille2013].

En impacto fuera de plano, la integridad estructural y mejora en la tolerancia al daño se consigue a través del mecanismo de fallo como la delaminación. Por lo tanto, la influencia del rendimiento interlaminar influye en el comportamiento a impacto de los composites cFRTP. Se ha comprobado que matrices termoplásticas como el PEEK que tienen valores de *ILSS* superiores, tienen un comportamiento a impacto menor ya que una mejor adherencia interlaminar impide un crecimiento de grieta estable. Sin embargo, las matrices PPS que tienen una resistencia interlaminar menor con respecto del PEEK, promueven un crecimiento de grieta estable en la zona delaminada y por ello mejora su rendimiento a impacto [Shah2019].

De acuerdo con los estudios realizados por Arao *et al.* [Arao2012], las propiedades a tracción de las fibras de carbono son insensibles a la velocidad del ensayo, dada su baja tenacidad a la fractura. En cuanto a la sensibilidad de las fibras de vidrio, Arao *et al.* sostiene que su comportamiento quasi-estático es frágil, pero presentan cierta sensibilidad a la velocidad de ensayo, dado que su crecimiento de grieta es más lento que el carbono. En la Figura 41, se muestra el efecto de endurecimiento por la velocidad de deformación mostrado por las fibras de vidrio. Por el contrario, las fibras de Kevlar[®] tienen un comportamiento dúctil y la dependencia a la velocidad del ensayo es más notable con respecto a los otros dos.

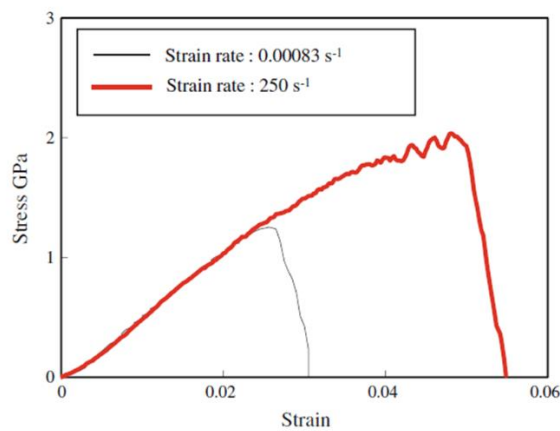


Figura 41. Sensibilidad a la velocidad de deformación de la fibra de vidrio [Arao2012].

En cuanto a estudios llevados a cabo por Harding *et al.* [Harding1983] que analizan el comportamiento a impacto de perfiles de CFRP y GFRP, se comprueba que la velocidad de impacto no influye en las propiedades de absorción de energía en perfiles de carbono por unidad de volumen (Tabla 2). No obstante, se concluye que en perfiles de GFRP no sólo existe una dependencia positiva de la velocidad, sino que se consigue una mejora en absorción de energía en perfiles con orientaciones a $\pm 45^\circ$ de entre 2 y 3 veces con respecto a perfiles a 0° .

Tabla 2. Energía absorbida por unidad de volumen (MPa) en perfiles de CFRP y GFRP [Harding1983].

ϵ	CFRP	GFRP	
		0°	45°
Bajo	4,6	4,1	11,3
Intermedio	5,3	10,5	19,8
Impacto	5,0	18,5	32,9

El aumento de la capacidad de absorción de energía observado en los perfiles GFRP se corresponde no sólo por una respuesta más rígida del material (efecto endurecimiento) sino también en un aumento en el alargamiento a rotura. Durante la tracción, se produce una realineación de las fibras de vidrio a $\pm 45^\circ$ promoviendo un comportamiento no lineal y dúctil del composite y permitiendo alcanzar valores alargamiento superior con respecto a perfiles a 0° .

Farley *et al.* [Farley1991] también han analizado el efecto de la velocidad de ensayo (Figura 42) con respecto del SEA tubos de CFRP y KFRP. Para los perfiles de CFRP, Farley *et al.* han comprobado que la influencia es positiva para tubos CFRP con orientaciones diferentes a 0° , ya que el fallo de la matriz controla el mecanismo de colapso (Figura 42a). Las propiedades de los perfiles de KFRP mientras tanto, muestran una dependencia positiva a la velocidad para cualquier ángulo de orientación de la fibra (Figura 42b). No obstante, se ha demostrado que este efecto se incrementa para orientaciones de fibra cercanas 0° , dado que la fibra está sometido a mayor tensión y el perfil es capaz de absorber más energía.

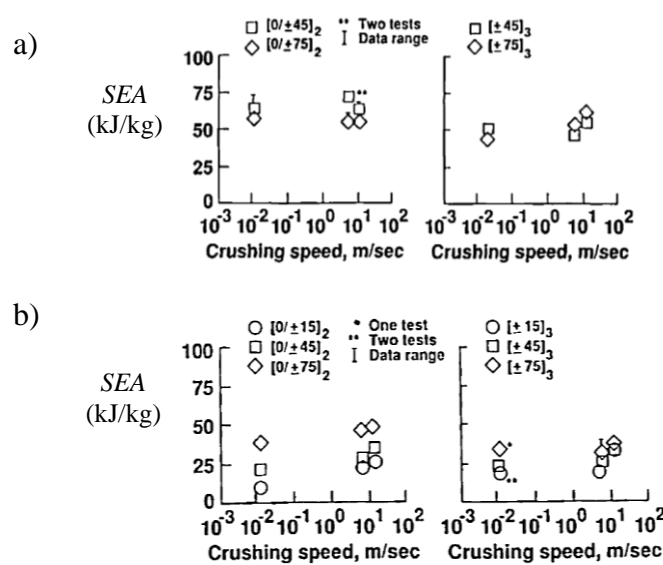


Figura 42. Influencia a la velocidad de ensayo en el de perfil a) CF/Epoxi y b) KF/Epoxi [Farley1991].

Saenz-Dominguez *et al.* [Saenz-Dominguez2019] han analizado la influencia del espesor y la velocidad del ensayo en el comportamiento de perfil pultruidos bajo carga axial, así como la viabilidad del diseño estructuras celulares fabricadas a partir de estos perfiles (Figura 34). En cuanto a la caracterización a impacto se concluye que existe una reducción entre el valor de SEA quasi-estatico (64 kJ/kg) y dinámico (45 kJ/kg), asociado a un cambio en el modo de fractura durante su colapso estable.

No obstante, los valores en el perfil son extrapolables para el diseño de estructuras celulares sometidas a impacto, siempre que se mantenga el espesor y la velocidad en el ensayo.

2.2.1.5. Mecanismos de colapso estable

El comportamiento a *crush* de los perfiles cFRP sometidos a cargas axiales de compresión se pueden clasificar en progresivos (absorción de energía estable) o catastrófico (absorción de energía inestable) [Hull1991]. Las curvas de colapso inestables se caracterizan por una caída repentina de la carga una vez que se ha iniciado el colapso, o tras alcanzar el pico máximo de carga. Los modos de colapso progresivo, sin embargo, se caracterizan por mantener una carga de colapso estable, casi constante tras el pico de carga. Un colapso estable y progresivo se caracteriza por iniciar en su extremo y progresa a lo largo del perfil. En el siguiente diagrama (Figura 43) se presenta los mecanismos de fallo (y su evolución) presentes durante en el proceso de colapso de perfiles (estables e inestables).

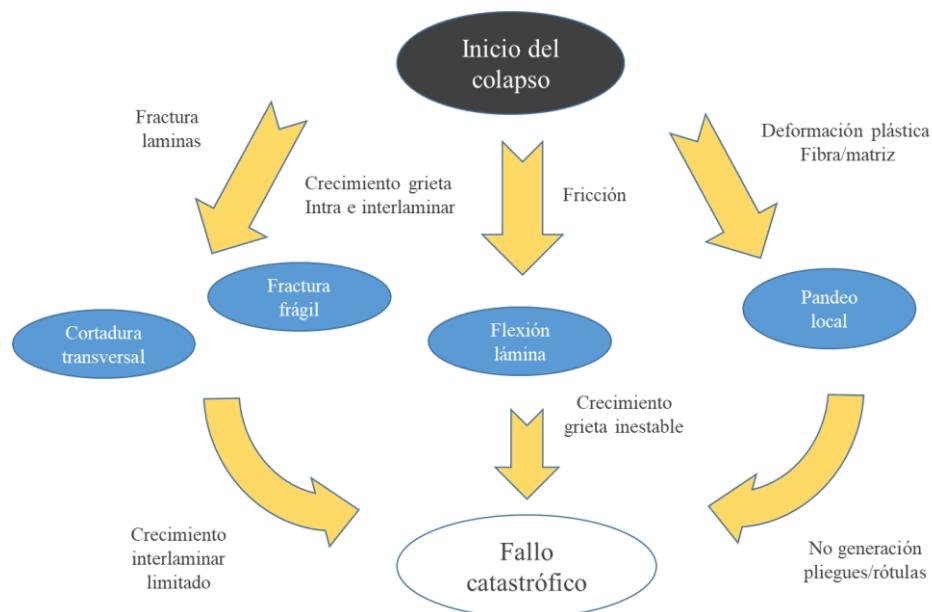


Figura 43. Diagrama de flujo: proceso de colapso de perfiles cFRP. Adaptado de [Farley1992].

Mamalis *et al.* [Mamalis1997] han analizado el comportamiento de perfiles a *crush* en función de parámetros (geométricos, orientaciones de fibra, secuencias de laminado y las propiedades de los materiales constituyentes) y han identificado los diferentes mecanismos de fractura intra/interlaminares (Figura 44) presentes en el colapso de perfiles cFRP.

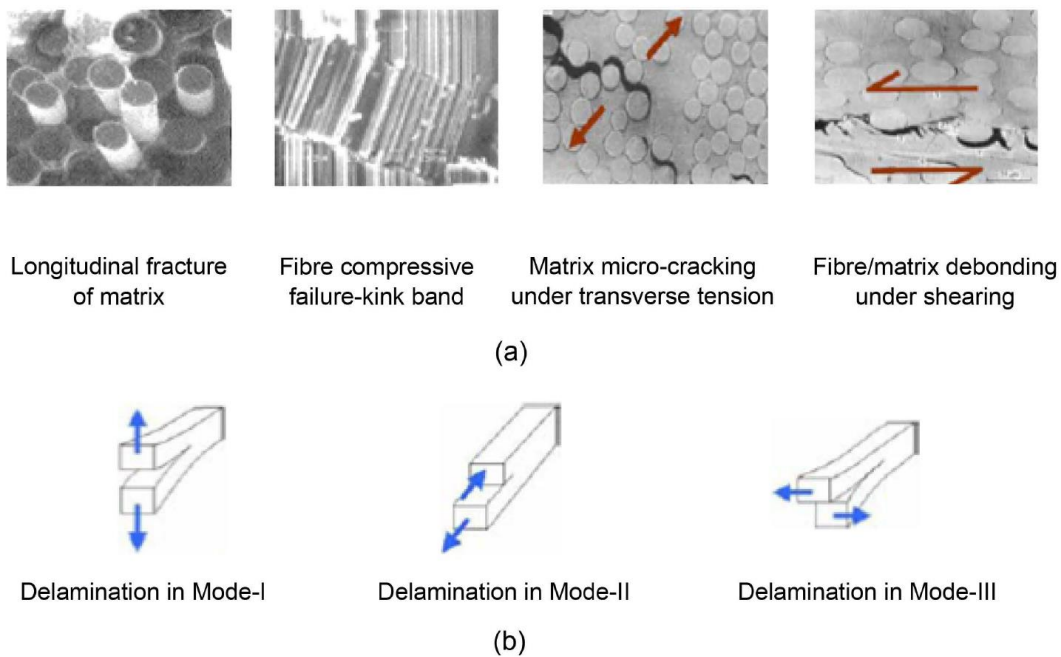


Figura 44. Mecanismos de fractura observados en laminados CFRP; a) Fallo intralaminar y b) Interlaminar [Mamalis1997].

Farley *et al.* [Farley1992] y Hull *et al.* [Hull1991] han descrito los modos de colapso presentes durante la compresión axial estable en perfil CFRP. Estos modos de fallo se han clasificado en cuatro grupos (Figura 45): cortadura transversal, flexión de lámina, fallo fractura frágil y plegado, y sus principales características son las siguientes:

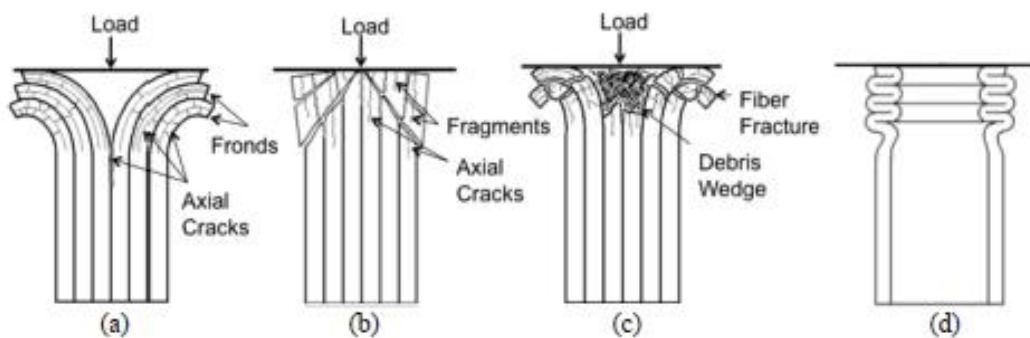


Figura 45. Modos de colapso estables en perfiles CFRP. a) Flexión de lámina, b) cortadura transversal, c) fractura frágil y d) pandeo local [ParkCK2012].

- Flexión de la lámina: genera grietas axiales (interlaminares e intralaminares), de longitud superior mayores que el espesor del laminado y que separa las fibras en tiras o laminas. Estas laminas flectan hacia el interior o el exterior de la pared del tubo, pudiendo haber una pequeña cuña de fragmentos (Figura 45a).

- Cortadura transversal o fragmentación: forma de grietas interlaminares, intralaminares y axiales cortas (inferiores al grosor del laminado), sin cuña de fragmentos (Figura 45b).
- Fractura frágil: combina el modo de flexión de lámina con el de cortadura. Las láminas flectan y se fracturan, generando una gran cuña de residuos (Figura 45c).
- Pandeo local: formación de rótulas de forma análoga al modo de colapso del tubo metálico de pared fina (Figura 45d).

Por otro lado, se encuentran los modos de colapso inestables (Figura 46) entre los que se incluyen: el pandeo, la interpenetración y el embarrilamiento.

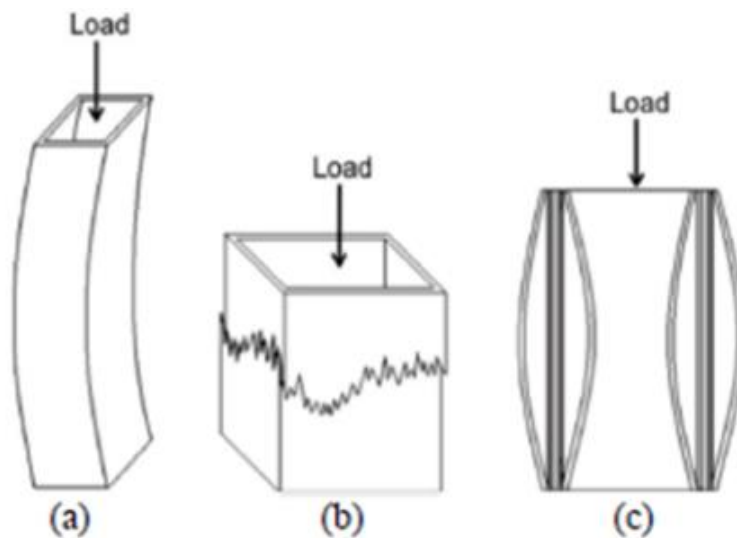


Figura 46. Modos de fallo a crush no estables. a) Pandeo, b) interpenetración y c) embarrilamiento (pandeo) [ParkCK2012].

Mamalis *et al.* [Mamalis2005] han identificado los modos de absorción de energía como una combinación de mecanismos de deformación, fractura (fibra y matriz) y fricción, siendo los más energéticos aquellos que permiten la flexión gradual de la lámina, el daño progresivo de las paredes y un deslizamiento relativo entre las capas fracturadas. Los materiales compuestos reforzados con fibras dúctiles (como el Kevlar[®]) en cambio, se deforman plásticamente en zonas comprimidas, formando pliegues o rótulas. Mientras que en las zonas traccionadas se produce la fractura de la matriz, separación de fibras y la delaminación entre capas [Farley1989, Mamalis1997].

Esnaola *et al.* [Esnaola2015] han observado un modo fallo progresivo por flexión de lámina y crecimiento de grieta axial estable en perfiles GFRP (Figura 47a-b), a los que previamente se les había mecanizado un bisel. Así mismo, se han identificado mecanismos de fractura de delaminación y rotura de fibras (Figura 47c-d).

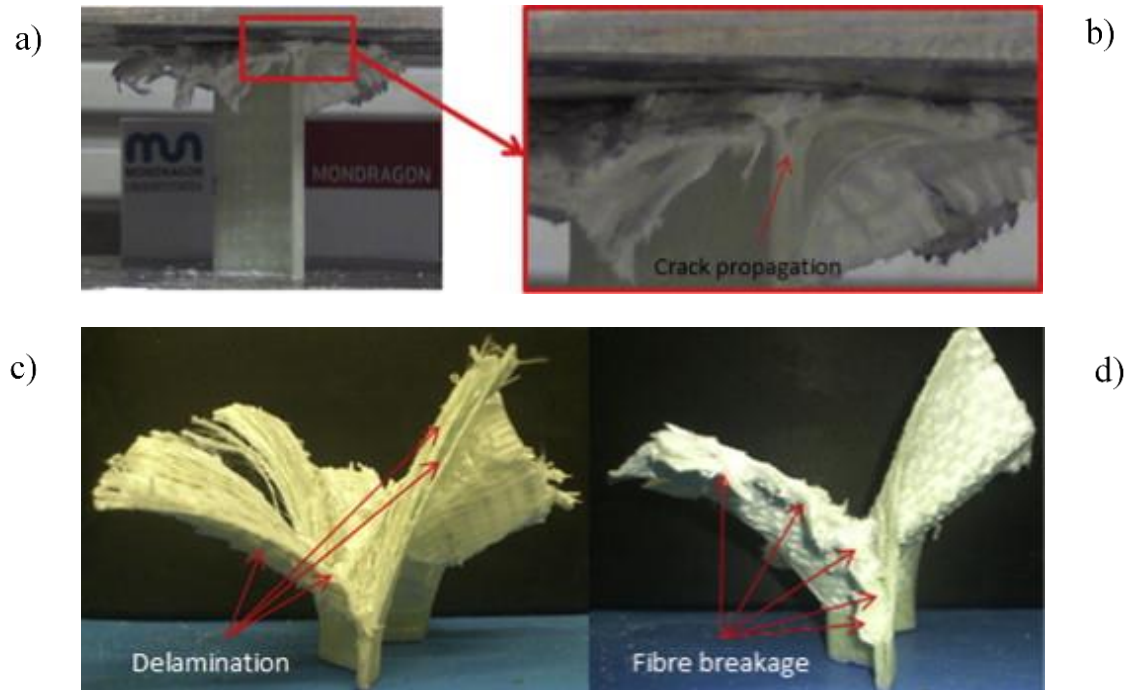


Figura 47. Modo fallo progresivo por a) flexión de lámina y b) crecimiento estable de grieta axial. Mecanismos de c) delaminación y d) fractura de fibras [Esnaola2015].

Saenz-Dominguez *et al.* [Saenz-Dominguez2019] han reportado que los modos de colapso cuasi-estáticos basados en la fractura frágil tienen una mayor capacidad de absorción de energía en comparación con los modos dinámicos que están asociados con inestables (pandeo) y delaminaciones.

2.2.1.6. Estructuras tubulares impresas mediante tecnología cFF

No se han encontrado en literatura evidencias de estructuras tubulares impresas mediante 3D - cFF.

2.2.2. Estructuras celulares y núcleos

Las investigaciones realizadas sobre las estructuras celulares han demostrado su eficacia en componentes de absorción de energía de impacto, y se han identificado los metamateriales y las estructuras auxéticas como candidatas prometedoras (por ejemplo, como estructura de relleno en perfiles cFRTP) en términos de baja densidad, rigidez y resistencia específica [Ren2018]. El coeficiente de Poisson negativo (NPR) de las estructuras auxéticas induce una alta densificación del material bajo carga de compresión [Lakes1987, Clausen2015], dando lugar a la mencionada mejora del rendimiento a impacto.

2.2.2.1. Tipos y familias de estructuras auxéticas

En la literatura (Figura 48) se reportan varios tipos de estructuras auxéticas (reentrantes, quirales o rotacionales), ya que sus propiedades efectivas son programables en función de su estructura interna, así como del comportamiento del material base [Saxena2016].

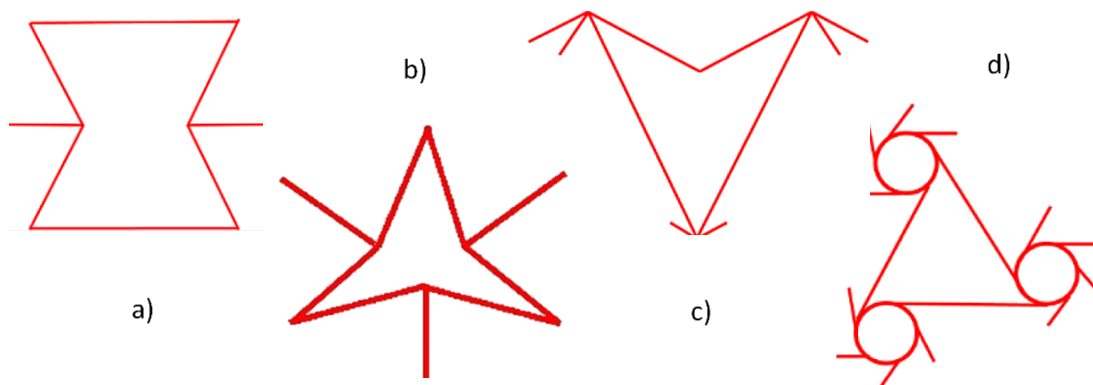


Figura 48. Estructuras 2D auxéticas. Reentrante a) hexagonal, b) triangular, c) tipo-estrella y d) quiral [Saxena2016].

Entre estas geometrías, se ha prestado un especial interés a la reentrante hexagonal, la cual ha sido empleada con éxito, como núcleo en paneles tipo sándwich, para mejorar la resistencia al impacto fuera del plano [LiT2018, Yazdani2018].

Recientemente, se han analizado y comparado nuevos conceptos de reentrante hexagonal (RH) o estructuras híbridas basadas en estructuras RH regulares, que mejoran su comportamiento a cortadura. Algunos ejemplos incluyen el panel de tipo punta de flecha (DAH) [WangXT2017], con forma de estrella (RSH) [WangH2019] o panel de abeja modificado (ASH) [Ingrole2017].

Sin embargo, la mayoría de estos estudios se basan únicamente en análisis teóricos y numéricos. Estas nuevas configuraciones auxéticas no han sido ensayadas ni validadas bajo carga de impacto o explosión. Las dificultades relacionadas con los ensayos, el proceso de fabricación de las muestras y los costes podrían explicar esta falta de datos de ensayos experimentales [Burnett2018, Imbalzano2016, Ju2009, Lira2010, Harkati2017, Huang2017].

2.2.2.2. Identificación y diseño de estructuras auxéticas

Para la identificación y el diseño de estas estructuras [Körner2015] han propuesto el análisis de los modos propios de estructuras formadas a partir de geometrías básicas como hexágono, cuadrado o triángulo. El análisis de modos propios de una estructura básica representa todos los posibles modos de colapso de la estructura a los que la estructura tenderá a deformarse en caso de compresión. Körner *et al.* [Körner2015] han concluido que la rotación es un mecanismo de deformación fundamental en estructuras con comportamiento auxético, como por ejemplo la estructura quiral. Además, el valor absoluto del coeficiente de Poisson depende del espesor, así como de la amplitud del modo propio. Körner *et al.* han demostrado que el mecanismo de plegado de las estructuras reentrantes se extrae de la proyección de estos modos propios de rotación (Figura 49).

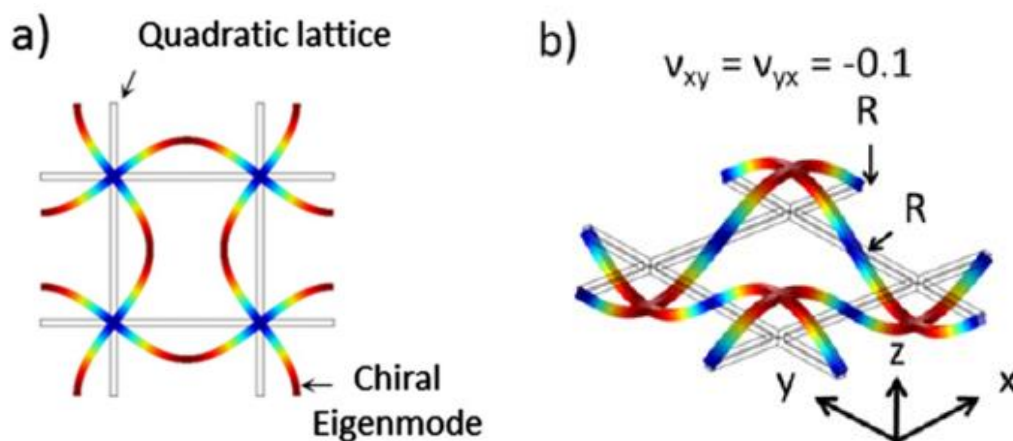


Figura 49. Estructural auxéticas a) Chiral y b) Reentrante [Körner2015].

Como alternativa, Sigmund *et al.* [Sigmund2000] y Bendsøe *et al.* [Bendsøe2004] han planteado el uso de la optimización topológica en la identificación y el diseño de estructuras auxéticas (Figura 50) con Poisson programable. No obstante, los modelos de material empleados en problemas de optimización topológica clásica asumen un comportamiento lineal del material y los diseños obtenidos no presentaban un valor de Poisson constante para un rango amplio de deformación. En la Figura 51, se muestran las diferencias entre las propuestas de diseño de celda unitaria para modelo lineal y no lineal. El modelo no lineal considera la no linealidad geométrica en el proceso de optimización topológica [Wang2014, Clausen2015].

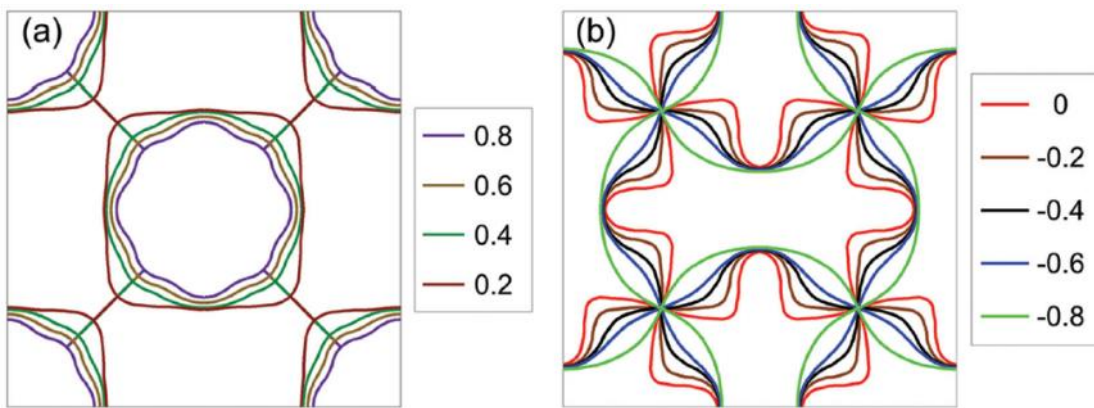


Figura 50. Diseño de celda unitaria con Poisson programable mediante TO [Clausen2015].

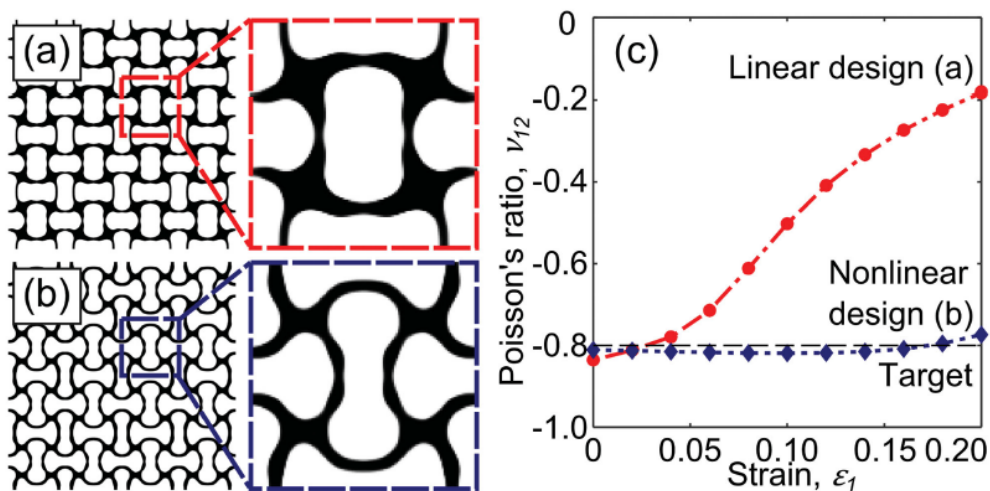


Figura 51. Optimización topológica de una estructura quiral auxética. a) modelo lineal, b) no lineal y c) variación del módulo de Poisson con respecto del nivel de deformación [Clausen2015].

Los modelos constitutivos de materiales hiperelásticos reales [Ju2011] no son adecuados para reproducir grandes deformaciones, inestabilidades como el pandeo o el colapso de las estructuras reentrantes. Ju *et al.* [Ju2009] han desarrollado un modelo constitutivo para el diseño de estructuras hexagonales en policarbonato (PC) con módulo de cortadura similar al de un elastómero. Mediante el empleo de estructuras auxéticas se puede diseñar estructuras con propiedades a cortadura programadas (Figura 52) para su aplicación en la banda de rodadura (concepto de rueda Tweel[®]) o bien para el diseño de estructura de geometría variable (*morphing* en aeronáutica) [ChangL2018, ChenY2020].

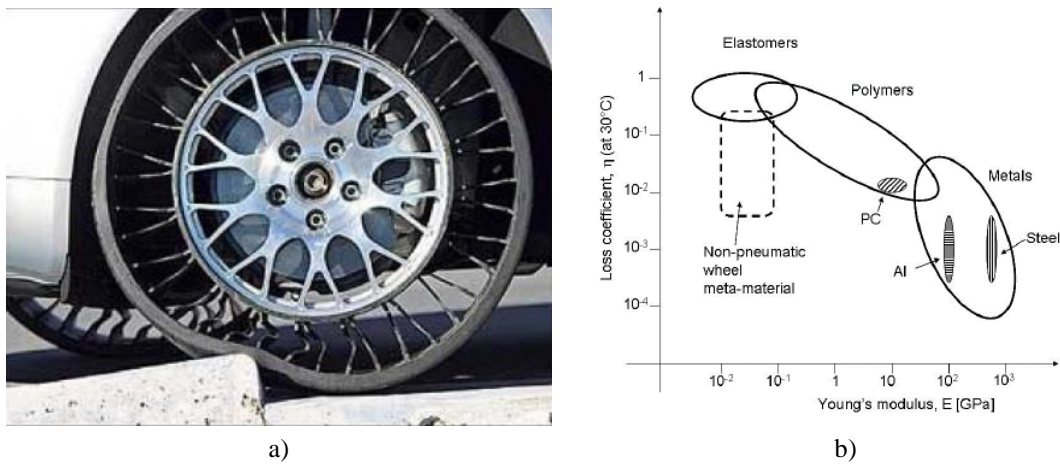


Figura 52. a) Concepto de rueda sin cámara de aire comprimido. b) Propiedades mecánicas programadas [Ju2009].

2.2.2.3. Núcleos sometidos a impacto

La industria del transporte siempre está en busca de nuevos desarrollos de aligeramiento, tolerancia al daño y absorción de impacto [Evans2010]. En la siguiente imagen se muestra la capacidad de absorción de una estructura *microlattice* en base níquel con una densidad (ρ) menor de 0.9 mg/cm^3 , capaz de recuperarse completamente tras alcanzar una deformación a *crush* (ϵ) de hasta el 50% y con capacidad de absorción de energía similar al de un elastómero. En la Figura 53a, se muestran las propiedades elásticas a compresión y Figura 53b, se muestra los valores de absorción de energía de las estructuras *microlattice* frente a otros típicos núcleos celulares empleados en aeronáutica [Schaedler2013].

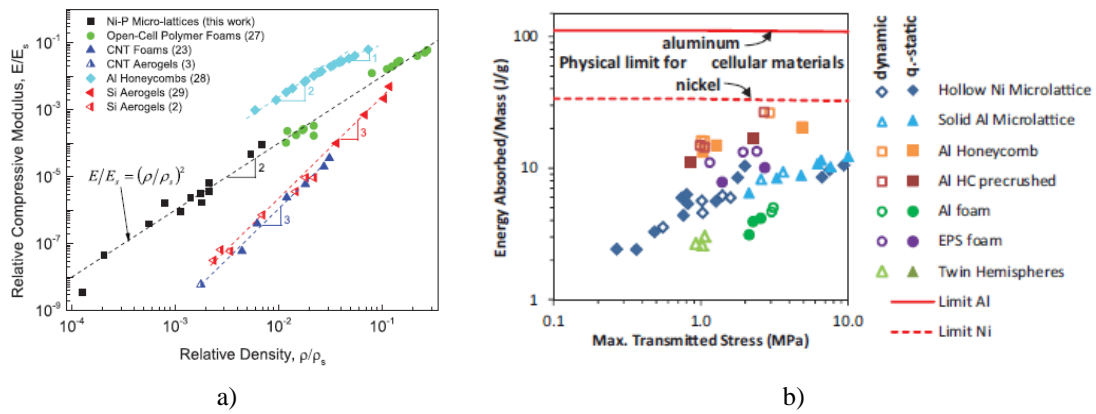


Figura 53. Propiedades *microlattice* a) Módulo de compresión relativa b) Valores de absorción de energía específica frente a la máxima tensión transmitida [Schaedler2013].

2.2.2.4. Estructuras celulares y núcleos impresos

Compton *et al.* [Compton2014] han analizado mediante ensayos de *crush*, la influencia de la incorporación de fibras discontinuas de carbono relleno microestructuras fabricadas mediante impresión de tinta. Las estructuras celulares analizadas se corresponden a geometrías regulares (triangular, cuadrada y hexagonal). Concluye que las propiedades mecánicas de las estructuras celulares son independientes de tamaño y que únicamente le influye las propiedades del material base, su geometría y densidad relativa (Figura 54). El alineamiento de las fibras se produce en dirección de impresión debido a un efecto de cortadura en flujo de tinta. Esto permite orientar la fibra en dirección de los contornos de los componentes impresos, reduciendo la concentración de tensiones en puntos críticos como agujeros o incluso lograr gradientes funcionales de las propiedades elásticas.

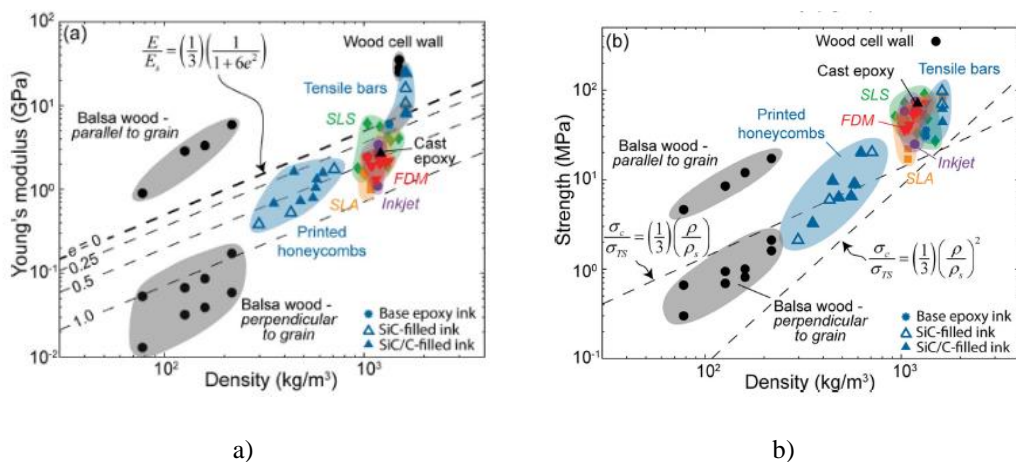


Figura 54. Propiedades de las estructuras celulares fabricada mediante impresión de tinta a) Módulo de Young, b) Resistencia frente densidad [Compton2014].

Los estudios basados en el comportamiento frente a carga de compresión e impacto encontrados en literatura se basan también en conceptos de estructura hexagonal o tipo *honeycomb* fabricados en material termoplástico de plásticos no reforzados, por ejemplo, PLA [Bates2016], ABS [Pollard2016] o TPU (poliuretano termoplástico) [Tsouknidas2016]. Pollard *et al.* [Pollard2016] han analizado núcleos hexagonales fabricados en ABS y PLA mediante impresión FFF, se han caracterizado a tracción y compresión uniaxial. Los resultados obtenidos se han comparado con un tipo *honeycomb* comercial (Nomex[®]). Se ha observado por un lado un comportamiento más dúctil en espesores de pared gruesos (3 mm) frente espesores finos (1 mm). Y, por otro lado, se ha obtenido un límite elástico más bajo para espesores finos, siendo su mecanismo de fallo la cortadura entre capas. A pesar de que la carga a compresión en los núcleos impresos es mayor, la resistencia específica calculada es mayor para el *honeycomb* comercial, siendo el espesor de Nomex[®] 0,08 mm.

2.2.3. Perfiles rellenos y paneles tipo sandwich

Los perfiles rellenos y los paneles tipo sándwich son composites celulares que están formados por un núcleo y una piel o capa de material denso que lo rodeada. El núcleo mejora las propiedades de los paneles ya que permite la absorción de energía de forma eficiente, gracias a la distribución de las tensiones en caso de impacto.

2.2.3.1. Perfiles rellenos

Los perfiles rellenos son estructuras formadas por perfiles tubulares rellenos de un núcleo que viene a mejorar su comportamiento lateral, dado que la rigidez, capacidad de carga y absorción de energía de los perfiles huecos son limitadas [Belingardi2013, Palanivelu2010, Madhi2014]. Los núcleos de refuerzo pueden estar formados por espumas, rigidizadores o una mezcla de ambos (Figura 55).

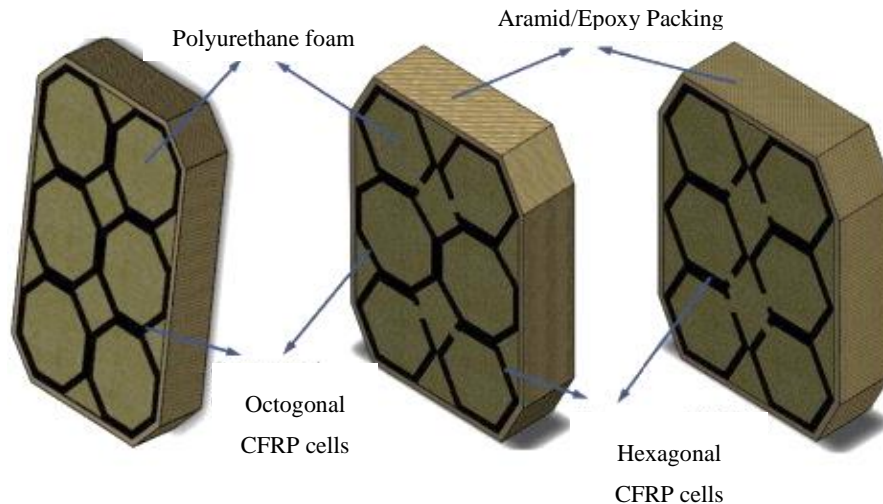


Figura 55. Arquitectura de perfil relleno [Madhi2014].

Palanivelu *et al.* [Palanivelu2010] han analizado el efecto de la espuma poliuretano de poro cerrado en el comportamiento a compresión quasi-estática axial de perfiles huecos GFRP. La incorporación de la espuma permite mejorar la estabilidad del colapso, así como aumentar su carga máxima. No obstante, la presencia de la espuma impide la delaminación en el tubo de composite y, por ende, reduce su capacidad de absorción de energía.

Mahdi *et al* [Mahdi2014] han investigado la mejora en el comportamiento a *crush* radial de perfiles KFRP con estructuras celulares de relleno (hexagonales/octogonales) CFRP y espuma de poliuretano. De los resultados obtenidos se extrae que la capacidad de absorción de energía del perfil KFRP se debe a mecanismos de delaminación y deformación plástica, sin aparente rotura de fibras. La configuración de perfil KFRP con relleno octogonal CFRP ha presentado el mayor nivel de *SEA* (3 kJ/kg).

2.2.3.2. Paneles sándwich

La forma de trabajar de las arquitecturas tipo sándwich es principalmente flexión, donde las pieles deben soportar los esfuerzos de axiales debidos al momento flector, mientras que el núcleo es el responsable de soportar los esfuerzos de cortadura. Por lo general, el núcleo está fabricado en un material económico [Castaine2020].

Wei *et al.* [Wei2019] han llevado a cabo la caracterización a *crush* y cortadura de paneles sándwich (piel y núcleo) fabricados a partir de tejido pre-impregnado CFRP (Figura 56a-b). Los niveles de *SEA* (40 kJ/kg) obtenidos a compresión en el plano son prometedores. En la Figura 56c se comparan estos resultados con los valores de *SEA* obtenidos para núcleos de diferentes geometrías y materiales, así como el mecanismo de colapso dominante para cada uno de ellos. El fallo por cortadura de las celdas provoca una pérdida rápida de su capacidad de carga, limitando su absorción de energía en el plano.

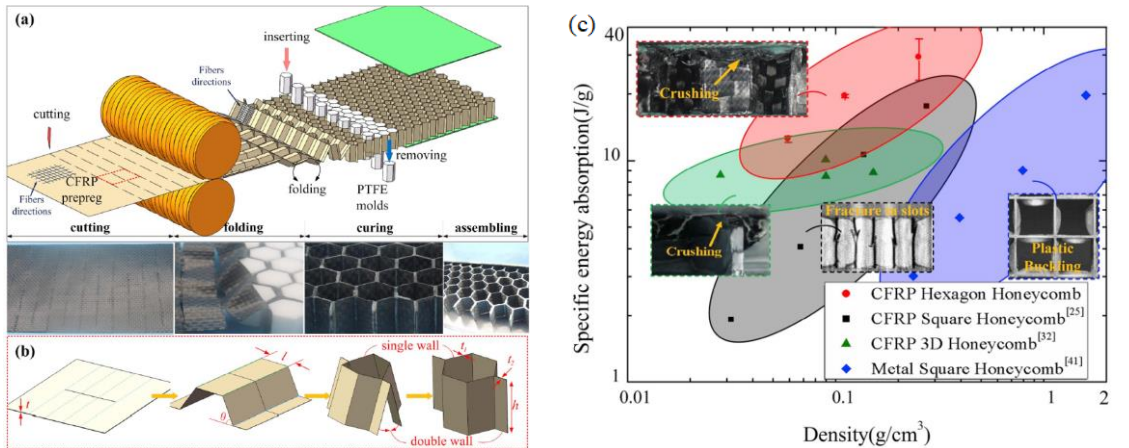


Figura 56. a) Proceso de fabricación de panel sandwich CFRP (piel y núcleo hexagonal), b) esquema de proceso de doblado de la celda unitaria y c) modos de colapso y valores de *SEA* [Wei2019].

La caracterización a compresión fuera de plano de paneles con núcleos corrugados CFRP, se ha llevado a cabo por SunY *et al.* [SunY2017]. Las muestras han sido fabricadas a partir de un proceso de compresión en caliente de tejidos pre-impregnados. Se ha constatado que la respuesta del núcleo y los modos de fractura presentes durante el colapso dependen de la orientación de la fibra. Durante los ensayos se han observado modos de fractura de la matriz y generación de grietas transversales, así como mecanismos de delaminación y generación de rótulas plásticas que controlan el colapso por pandeo del núcleo.

La mejora del comportamiento a impacto en el plano de paneles sándwich CFRP ha sido estudiada por Blok *et al.* [Blok2017]. A través de la incorporación de refuerzo de Kevlar[®] en dirección del espesor se ha mejorado la estabilidad del panel durante el colapso, evitando el pandeo global del panel. Se ha incrementado los valores de *SEA* y de *CFE* en un 78% y 129%. Sin embargo, una mayor fuerza de adherencia entre las pieles y el núcleo limita los mecanismos de delaminación y produce una fractura más localizada en las pieles durante el colapso.

2.2.3.3. Paneles sándwich impresos mediante cFF

De acuerdo con LiN *et al.* [LiN2020], la trayectoria de impresión determina la forma geométrica, la rugosidad y la resistencia de los paneles impresos. Por ello, las estructuras fabricadas por impresión de 3D - cFF se pueden clasificar en función de la trayectoria de fibra o patrón de impresión (Figura 57).

La mayor parte de los trabajos encontrados en bibliografía se centran en (Figura 57a) orientaciones en el plano y sin fibras entrelazadas [Sugiyama2018, Quan2020]. Algunos patrones tratan de entrelazar las fibras [Dong2020, Dickson2018, Ekoi2021] formando estructuras planas (Figura 57b), mientras que sólo unos pocos se salen del plano formando estructuras espaciales (Figura 57c). Las estructuras espaciales fabricadas mediante *free-hanging method* se denominan *lattice-truss sandwich* [LiuS2018].

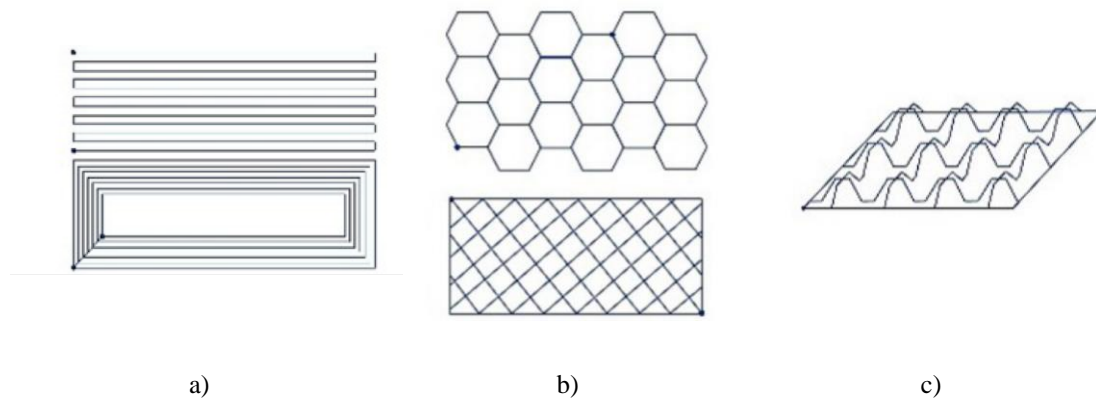


Figura 57. Patrones de impresión cFF; en plano a) sin fibras entrelazadas, b) con fibras entrelazadas y c) fuera de plano [LiN2020].

Solamente se han encontrado unos pocos trabajos que estudian el comportamiento a compresión e impacto de estructuras sándwich en composite impresas mediante 3D – cFF (Figura 58). De entre los trabajos encontrados existe dos aproximaciones en cuanto a su fabricación: 1) panel completamente impreso (piel y núcleo) [Sugiyama2018, HouZ2018] y 2) núcleo impreso y pieles convencionales [HouS2018, LiT2017].

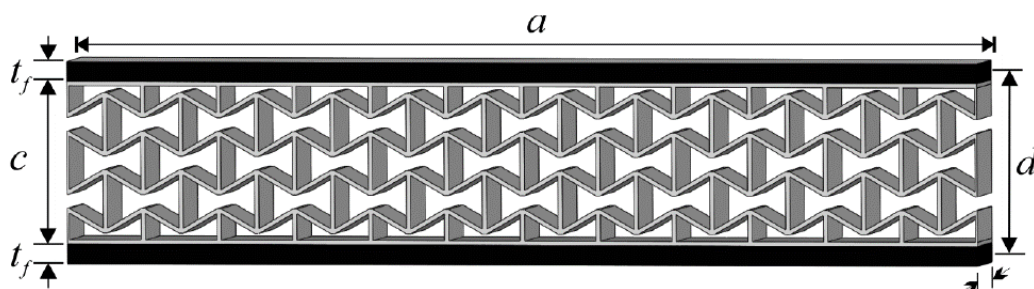


Figura 58. Paneles sándwich formado por pieles convencionales y núcleo impresión 3D [LiT2017].

Sugiyama *et al.* [Sugiyama2018] han analizado la viabilidad del proceso de impresión integral de un panel sándwich en cFRTP, sin la necesidad de soportes intermedios mediante el correcto diseño del núcleo (espaciado entre apoyos) y con la ayuda de la tensión de la fibra de carbono (Figura 59).

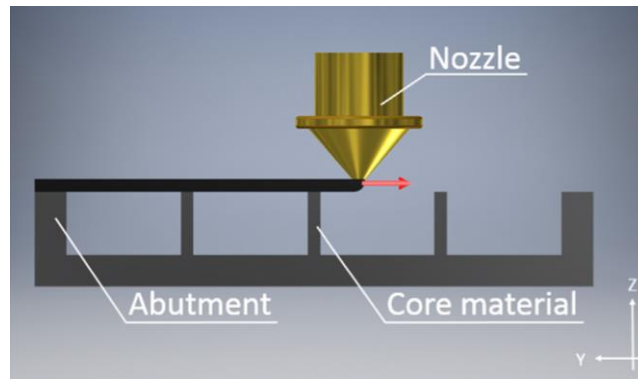


Figura 59. Proceso de impresión integral de un panel cFRTP [Sugiyama2018].

Para la validación conceptual del proceso, se han llevado a cabo ensayos de flexión 3 puntos sobre cuatro tipos de núcleos diferentes (Figura 60). A partir de los resultados obtenidos, se ha demostrado que a través de la impresión 3D y la libertad en el diseño permite fabricar paneles con propiedades mecánicas predefinidas [Sugiyama2018].

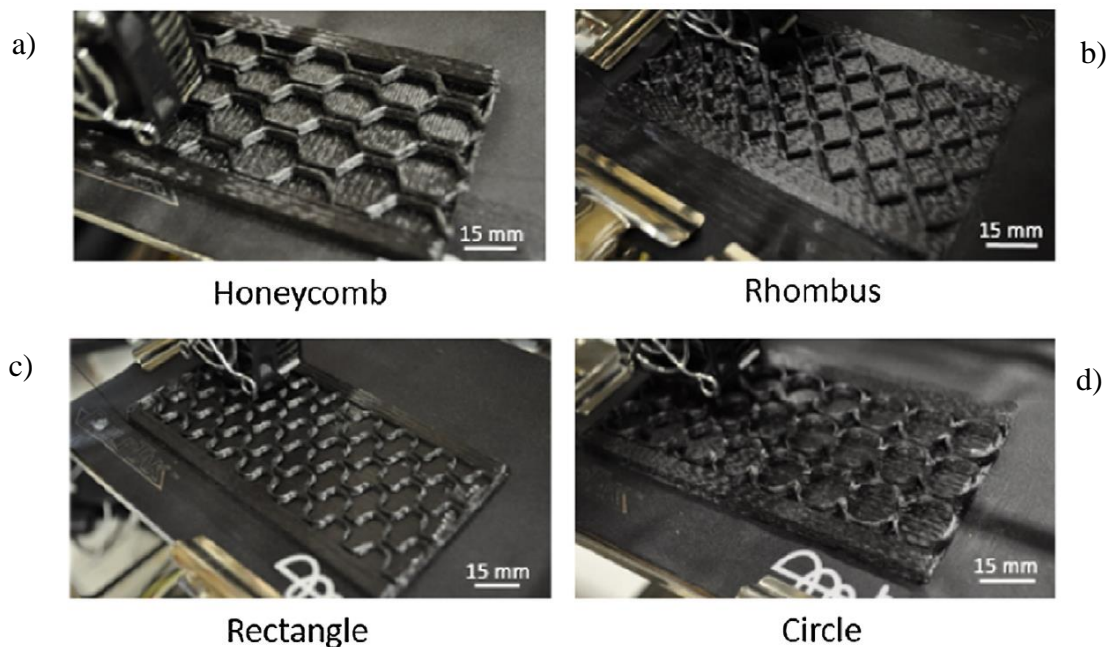


Figura 60. Núcleos impresos mediante cFF; a) Hexagonal, b) rombo, c) rectangular y d) circular [Sugiyama2018].

Zheng *et al.* [Zheng2021] han analizado la capacidad de absorción de energía bajo compresión en el plano y fuera de plano de tres tipologías de estructuras con núcleos celulares a partir de un proceso de coextrusión de fibra continua cCF/PLA. Las trayectorias de impresión de fibra no se entrelazan en la capa. No obstante, la fibra es continua entre las capas (sin cortes de fibra al finalizar cada capa), comenzando y acabando siempre en el mismo punto, como se puede observar en la Figura 61.

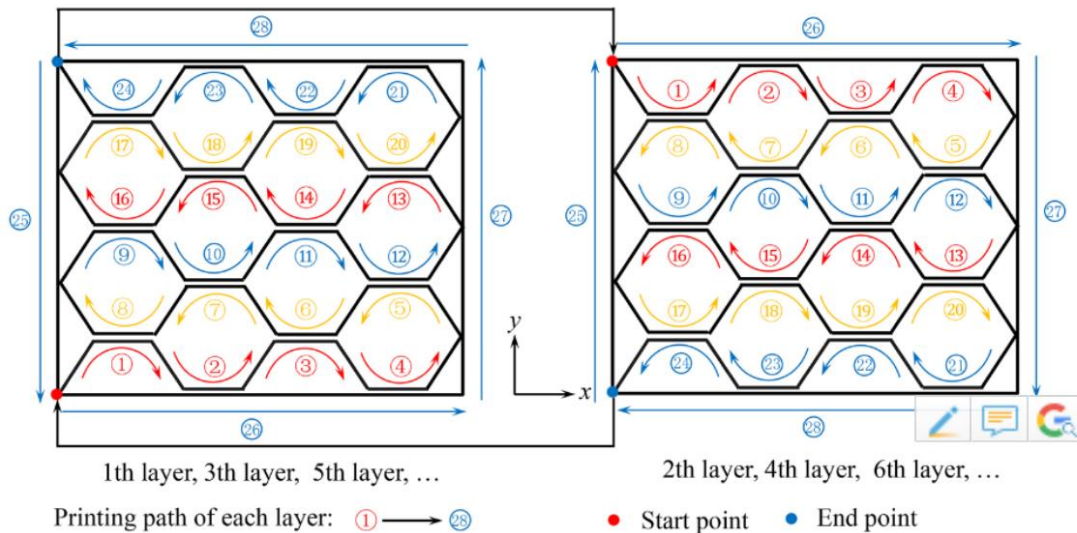


Figura 61. Trayectorias de impresión para las capas impares y las capas pares [Zheng2021].

En Figura 62 se presentan las propiedades absorción de energía (compresión en el plano y fuera del plano), comparando con otras tecnologías convencionales para la fabricación de núcleos. La excelente absorción de energía específica en el plano revela el gran potencial de esta tecnología para aplicaciones a impacto. Los mayores valores de *SEA* en el plano se han alcanzado para la tipología de núcleo hexagonal (15 kJ/kg).

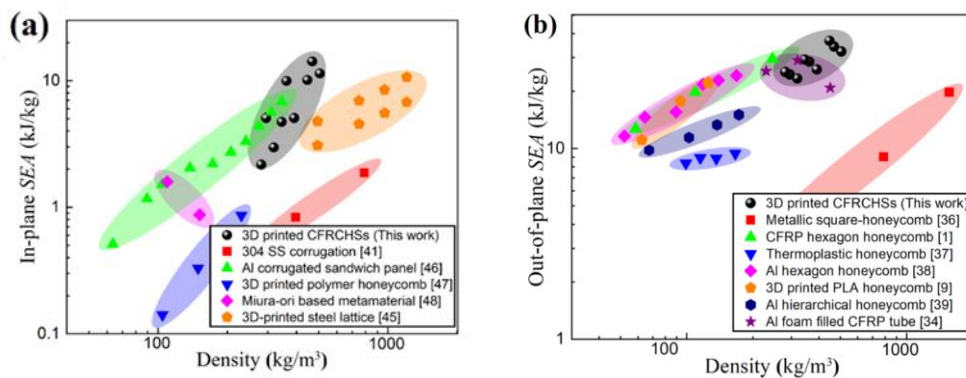


Figura 62. Valores de *SEA*; a) compresión en el plano y b) fuera del plano [Zheng2021].

Dong *et al.* [Dong2020] han desarrollado una nueva estrategia de impresión para la fabricación de composites celulares (tipo romboide), basado en el entrelazado o solape entre fibras, a fin de evitar la debilidad de la estructura celular en los nodos de unión. Los patrones de impresión se correspondían con trayectorias triangulares, rectangulares y trapezoidales. Las trayectorias trapezoidales han mostrado las mejores propiedades mecánicas a tracción.

Este mismo sentido HouZ *et al.* [HouZ2018] han desarrollado un panel tipo sándwich basado en un núcleo corrugado (Figura 63a) y fabricado en cKF/PLA. El diseño de las trayectorias de impresión plantea el solapamiento entre fibras del núcleo y las pieles mientras que se produce un entrecruzamiento de las fibras del núcleo corrugado (Figura 63b). La resistencia alcanzada es de 17,17 MPa para una densidad de 335 kg/mm³ y un contenido en volumen en fibra 11,5%.

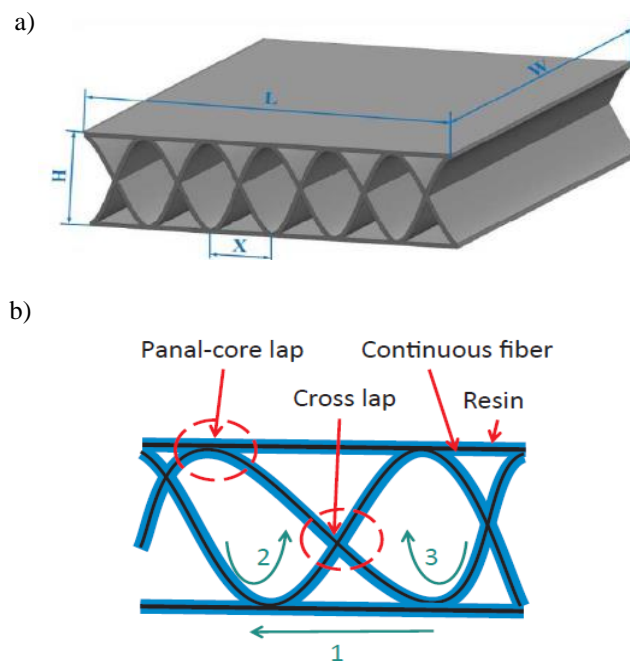


Figura 63. a) Panel sandwich con núcleo corrugado y b) trayectorias de impresión y zonas de solapamiento y entrecruzamiento de fibras [HouZ2018].

HouS *et al.* [HouS2018] han planteado una comparativa en cuanto al comportamiento a impacto de paneles con tres tipos de núcleos diferentes impresos en material flexible (FLX9795-DM de Stratasys[®]): reentrante hexagonal (auxético), hexagonal convencional y tipo romboide (no auxético). Las pieles convencionales (formato fibra unidireccional) han sido fabricadas en un proceso convencional previo al proceso pegado con el núcleo impreso.

El panel reentrante ha presentado las mejores propiedades de resistencia frente a impacto y disipación de energía (Figura 64). El efecto del núcleo no sólo estabiliza la carga durante la indentación sino que mejora su comportamiento frente a impactos sucesivos [HouS2018].

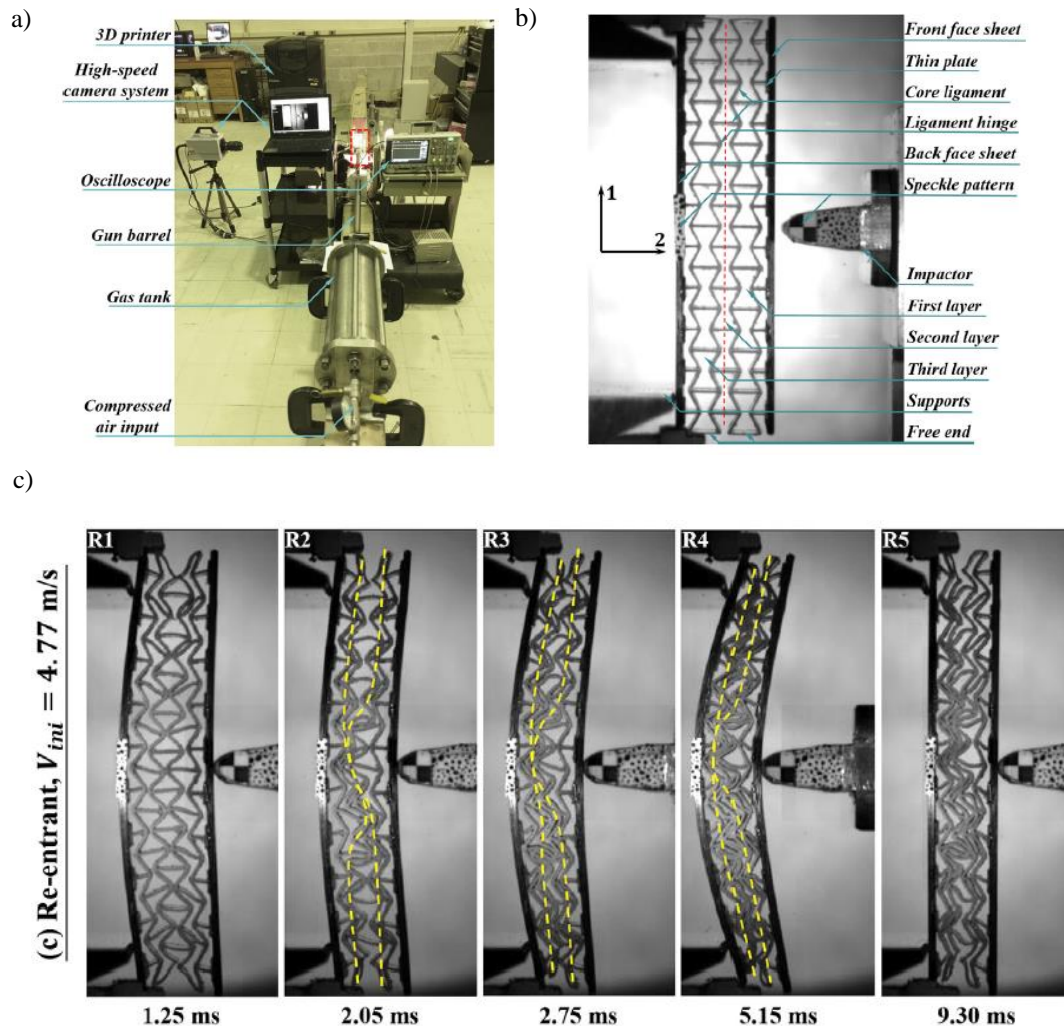


Figura 64. a) Esquema de ensayo de impacto (flexión 3 puntos), b) panel sándwich auxético y c) patrón colapso [HouS2018].

Quan *et al.* [Quan2020] han analizado el comportamiento a compresión en plano de un núcleo reentrante hexagonal impreso en cKF/PLA. La adición de fibras de Kevlar[®] han aumentado las propiedades mecánicas en comparación con el núcleo sin reforzar; módulo a compresión (25-32 MPa) y capacidad de absorción de energía (0,5-0,6 kJ/kg). La presencia de la fibra continua previene la fractura de la matriz de PLA. No obstante, se han observado mecanismos de fractura de fibra y de delaminación entre cordones de fibra, que permiten el plegado del núcleo durante su colapso.

2.3. HIBRIDACIÓN EN PROCESO

La selección de la tecnología más adecuada para la fabricación de piezas en material compuesto depende de muchos factores, como el volumen de producción, la complejidad geométrica del componente y las propiedades mecánicas necesarias [Bannister2001].

La optimización estructural de componentes de composites termoplásticos se enfrenta a un dilema a la hora de seleccionar el binomio material/proceso de fabricación. Los composites reforzados con fibras continuas son los que mejores propiedades presentan, pero la libertad de diseño es pequeña y se limita a piezas de tipo cáscara [Trudel2018]. Por el contrario, los procesos de fabricación de composites con fibra discontinua permiten la obtención de geometrías complejas, pero sus propiedades mecánicas son sustancialmente más bajas [Nishikawa2018].

La hibridación en tecnologías de fabricación de materiales compuestos termoplásticos responde a una necesidad no sólo de alcanzar cotas más altas de aligeramiento y aprovechamiento del material sino también en reducir el coste operacional de las piezas, así como el aumento de la productividad [Gardiner2019]. La hibridación de composites de fibra continua con composites de fibra discontinua se presenta como una vía prometedora para obtener un efecto sinérgico de ambas tecnologías [Henning2019]. Existen dos estrategias para la hibridación; la inserción de refuerzos parciales de fibra continua en una pieza de composite de fibra discontinua, y el moldeo de geometrías complejas de fibra discontinua sobre la pieza de composite de fibra continua estampada (Figura 65) [Bouwman2016].

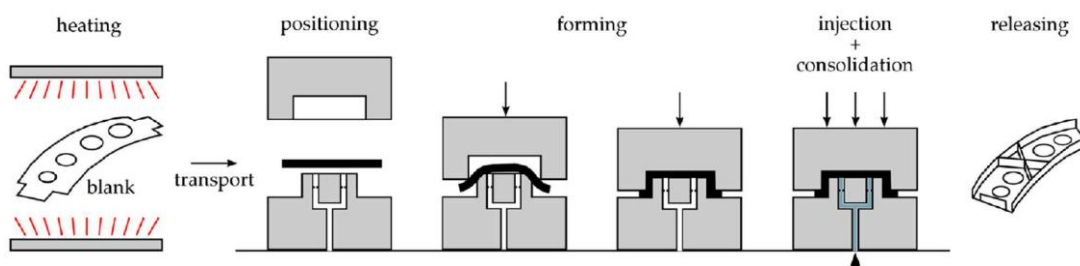


Figura 65. Esquema del proceso de sobremoldeo de *organosheet* [Bouwman2016].

2.3.1. Integración de refuerzo de fibra continua

Los procesos de fabricación de composites reforzados con fibras discontinuas más importantes son el GMT (*Glass Mat reinforced Thermoplastic*) y LFT (*Long Fibre reinforced Thermoplastic*) [Henning2019, Bondy2017].

Wakeman *et al.* [Wakeman2002] han estudiado la integración de una mecha de fibra de vidrio continua depositada mediante un brazo robótico en el proceso de GMT (Figura 66a), consiguiendo doblar el módulo de tracción y triplicar la resistencia a la tracción. Behrens *et al.* [Behrens2020] han reforzado una bandeja de batería de coche de GMT (Figura 66b) con bandas de fibra continua posicionadas en las zonas de máxima tensión.

Todos los trabajos publicados hasta fecha se han centrado en reforzar las zonas estructuralmente más exigentes, pero la rotura prematura del componente puede suceder en zonas de menor tensión en las que se ha generado algún tipo de defecto. En el caso concreto de la tecnología de GMT, no es posible asegurar el flujo de las fibras hasta el extremo de los nervios (Figura 66c), generando una zona rica en resina en la zona de máxima tensión del nervio [ParkCH2012].

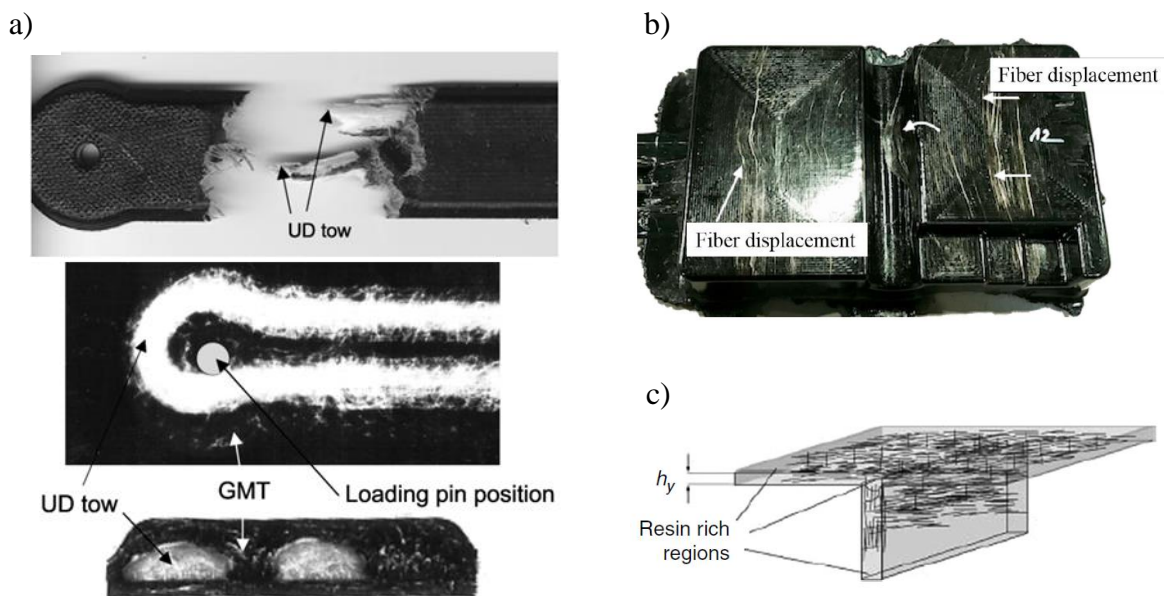


Figura 66. a) Refuerzo en forma de mechas de fibra continua en GMT [Wakeman2002], b) bandeja de batería de coche de GMT reforzada con bandas unidireccionales [Behrens2020], y c) esquema de la distribución de fibras en una placa nervada de GMT [ParkCH2012].

Las estrategias de hibridación son similares en el caso de la tecnología de LFT. Joo *et al.* [Joo2020] han propuesto reforzar una viga del parachoques de LFT con mechas de fibra continua (Figura 67a), aumentando su carga máxima admisible en un 44%.

Alwaker *et al.* [Alwaker2021] han estudiado el efecto de la posición y el espesor de bandas con fibras unidireccionales sobre el comportamiento a flexión e impacto (Figura 67b), concluyendo que el espesor de la banda debe ser menor al 50% del espesor del componente. El aumento en las propiedades ha sido más que sustancial, obteniendo una mejora en el módulo (70%) y la resistencia (130%) a flexión y en el umbral de energía de penetración (370%).

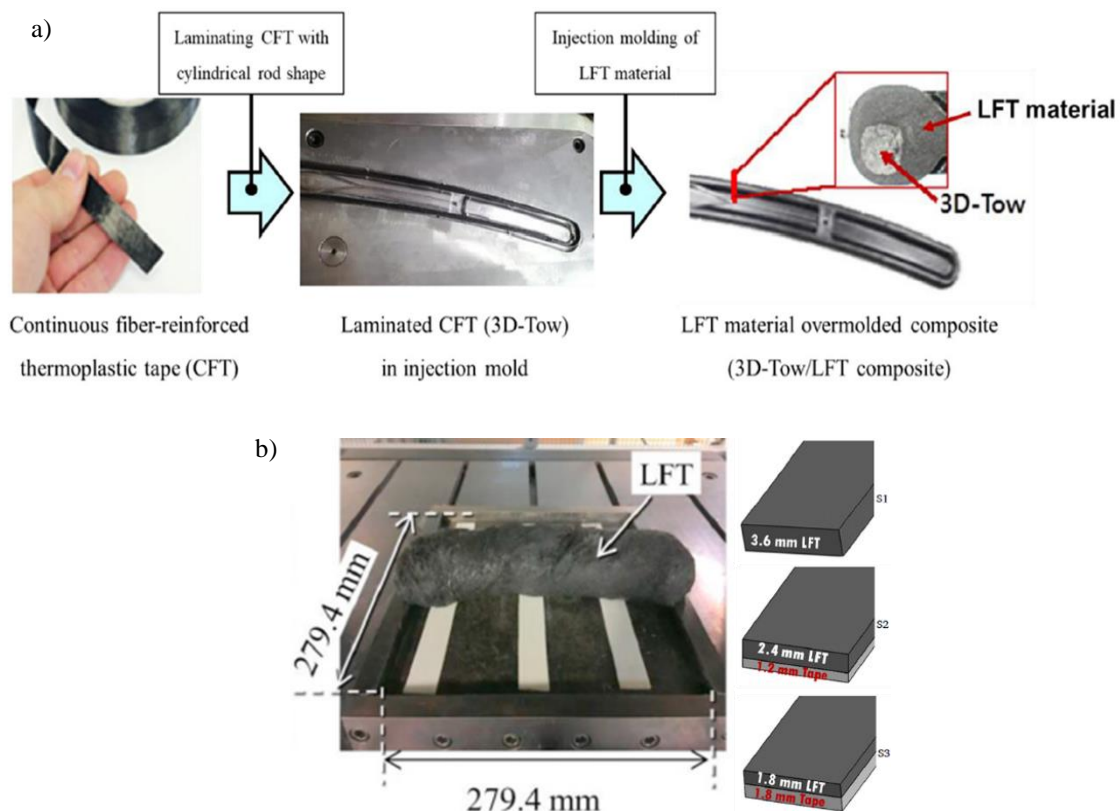


Figura 67. a) Refuerzo en forma de mechas de fibra continua en LFT [Joo2020] y b) diferentes diseños de refuerzo con bandas unidireccionales [Alwaker2021].

2.3.2. Integración de elementos funcionales mediante sobremoldeo

La estampación de *organosheet* es una de las tecnologías más prometedoras [Valverde2020] en cuanto a su rentabilidad, como por ejemplo la fabricación de vigas de intrusión para automóviles. Sin embargo, la estampación de *organosheet* no permite fabricar estructuras con geometrías complejas y, por tanto, son necesarias varias piezas y operaciones de montaje [Trudel2018].

Dado que los fallos de la pieza estampada se produjeron en los puntos de fijación en los prototipos ensayados por Trudel *et al.* [Trudel2018], sugieren la necesidad de reforzar localmente estas zonas. Una posible alternativa a este enfoque es combinar el conformado por estampación con el moldeo por sobreinyección, consiguiendo una alta integración funcional aparte de obtener una pieza final de geometrías más complejas [Aurreko2006, Sauer2016, Hurkamp2020, Akkerman2020].

Existen dos variantes de tecnologías de sobremoldeo: la inyección y el GMT (Figura 68).

La inyección es la tecnología más habitual y madura, y por la cual principalmente se añaden nervios o rigidizadores con diferentes diseños (Figura 68a-b) por [Akkerman2020, Valverde2020]. Un indicador del elevado grado de madurez de esta tecnología de hibridación es la fiabilidad de los modelos de inyección, además de la gran cantidad de ensayos experimentales realizados, que han permitido emplear algoritmos de inteligencia artificial para la optimización del proceso híbrido [Hürkamp2020].

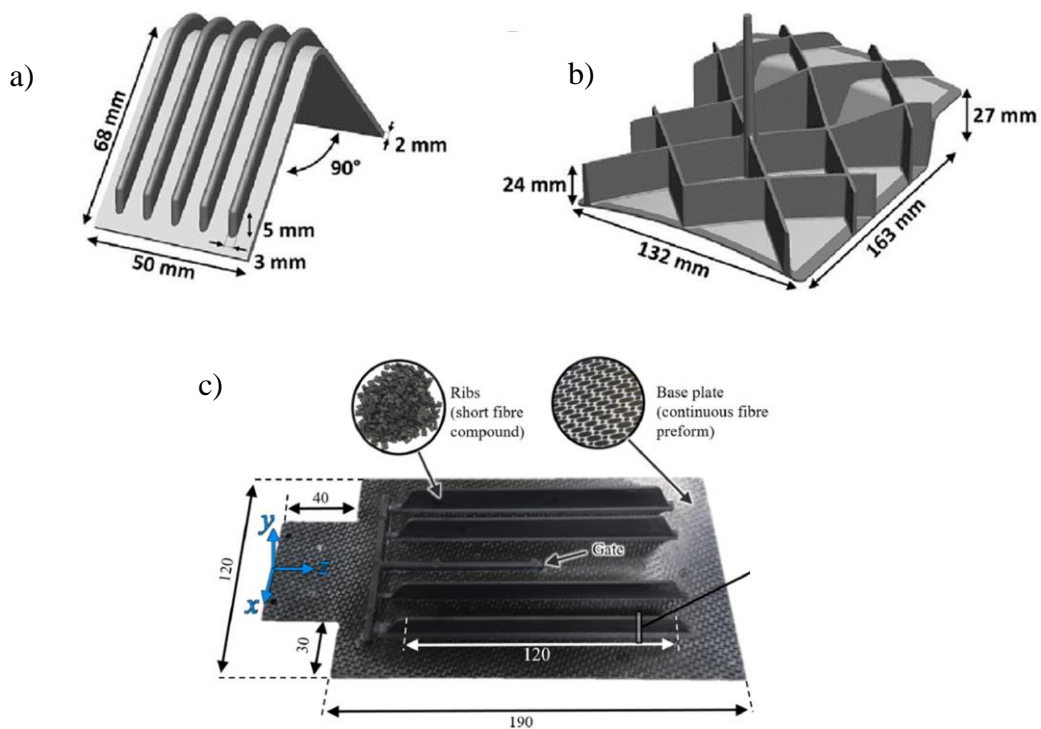


Figura 68. Estructura de nervios sobremoldeados propuesto por a) b) [Akkerman2020] y c) [Valverde2020].

En todos los trabajos publicados, la resistencia de la adhesión entre el nervio sobreinyectado y el sustrato aparece como un aspecto clave, y para ello se han utilizado configuraciones de ensayos estandarizados como la cortadura convencional (Figura 69a) [Aurrekoetxea2006] y/o Iosipescu (Figura 69b) [Akkerman2020].

Así como nuevas configuraciones como la planteada por Akkerman *et al.* [Akkerman2020] de caracterizar la resistencia de unión (Figura 69c-d) mediante la tracción sobre los nervios directamente.

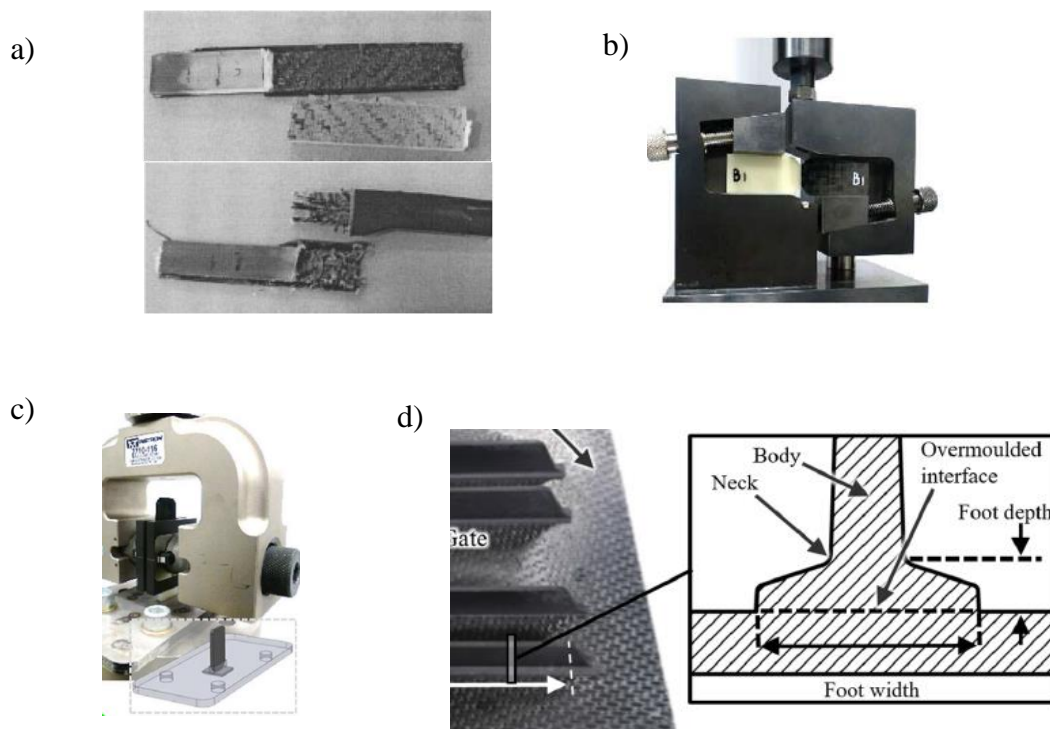


Figura 69. Ensayos propuestos para estudiar la adhesión en la intercara sobremoldeada; a) cortadura [Aurrekoetxea2006], b) Iosipescu [Akkerman2020] y tracción sobre nervio c) [Akkerman2020] d) [Valverde2020].

La segunda variante de sobremoldeo es con GMT [Behrens2017], cuya principal ventaja es la posibilidad de integrar fibras de mayor longitud (hasta 40 mm) que en la inyección. El proceso se realiza en una sola operación (Figura 70a); para iniciar el ciclo se coloca el GMT en la cavidad en la que se generará la geometría compleja, posteriormente se carga el *organosheet* y se estampa todo el conjunto, para finalizar con el desmoldeo de la pieza híbrida. La fabricación de una carcasa para batería de coche tarda menos de 20 s (Figura 70b).

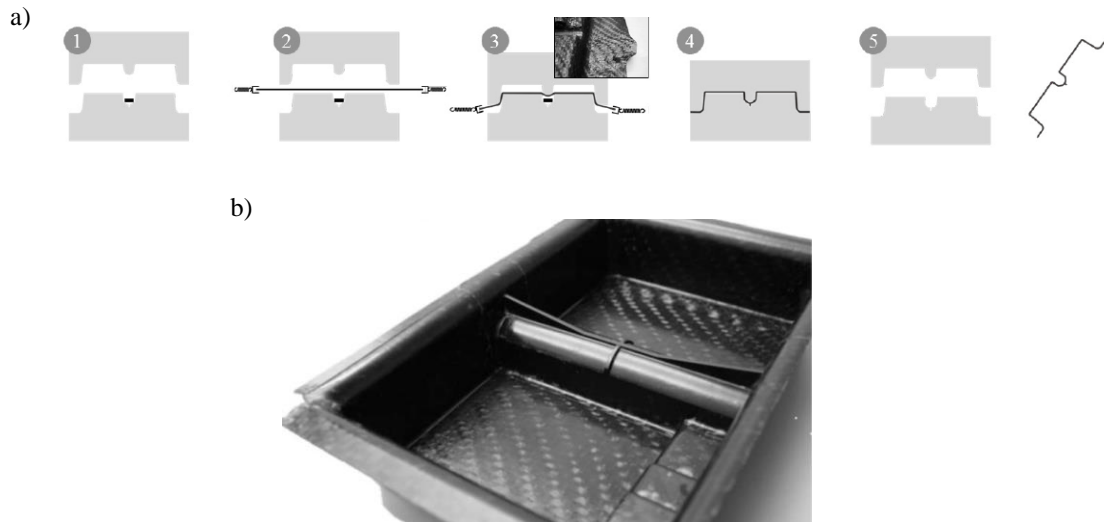


Figura 70. a) Proceso híbrido estampación/GMT y b) carcasa de batería de coche fabricado con dicho proceso [Behrens2017].

2.3.3. Impresión 3D insertos

El desarrollo de los materiales y equipos de fabricación aditiva para la extrusión de filamento con fibra continua (como la impresión 3D-cFF) permite obtener estructuras de geometrías complejas y composites con arquitecturas de refuerzo no-convencionales [Li2020].

La velocidad de producción de estas tecnologías está lejos de los procesos convencionales, por lo que la estrategia se debe orientar hacia insertos de pequeñas dimensiones y geometrías complejas. Para contextualizar mejor el potencial de la impresión 3D - cFF debe considerarse las características de los principales sectores prioritarios para los composites; en aeronáutica las piezas/componentes suelen ser de grandes dimensiones, pero de poca complejidad dimensional, mientras que en automoción el escenario es el contrario, piezas pequeñas, pero de geometría muy compleja [Henning2019]. Por lo tanto, los procesos de fabricación de composites termoplásticos como los insertos de impresión 3D parecen especialmente adaptados al sector de la automoción.

Conceptualmente se podrían desarrollar insertos de dos tipos: a) refuerzos para los nervios o rigidizadores, que se asemejan a vigas o tirantes acordes a los diferentes conceptos propuestos por Nomura *et al.* [Nomura2015] o Daynes *et al.* [Daynes2017] y b) refuerzos localizados en puntos de amarre, como el propuesto Li *et al.* [Li2020] (Figura 71).

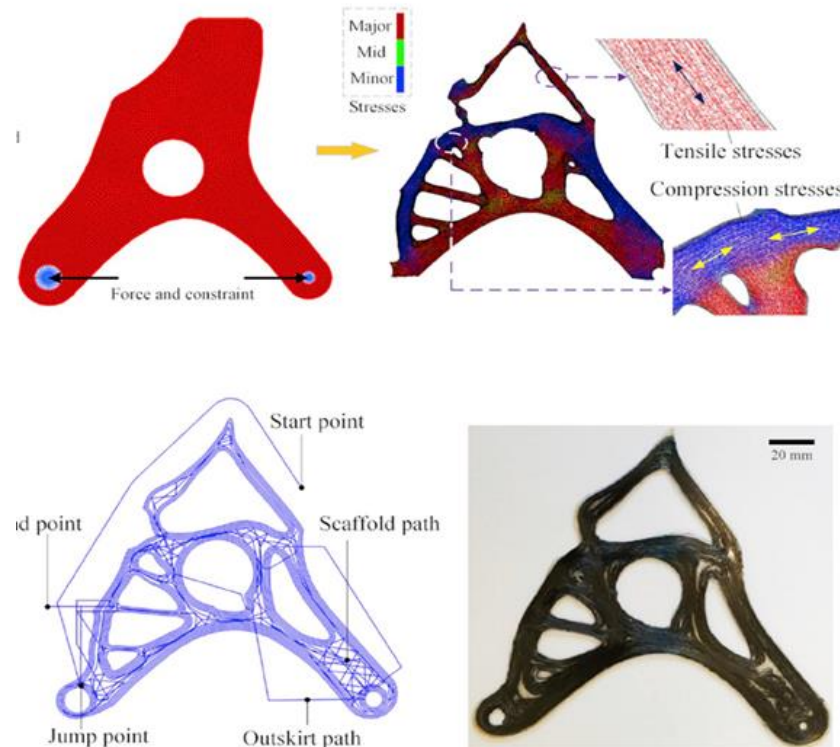


Figura 71. Optimización topológica para la base de una placa de suspensión [Li2020].

2.3.4. Sobreimpresión

La fabricación aditiva, y más concretamente el proceso cFF de materiales compuestos reforzados con fibras continuas y su combinación junto con la estampación de *organo-sheet* está aún por explorar y/o desarrollar. Mientras que la estampación cubre la necesidad de una amplia área proyectada con un alto contenido en fibra de la estructura, la impresión 3D pretende fabricar zonas con geometrías complejas, celulares y orientaciones no convencionales.

En un proceso híbrido de fabricación se compone de tres pasos. En primer lugar, se coloca el *organo-sheet* en la mesa de la impresora 3D y se sobreimprimen parte de la geometría de la estructura final (nervios, refuerzos localizados, etc.). A continuación, la placa sobreimpresa se recoge y se introduce en la estación de calentamiento por infrarrojos. Por último, una vez que el material adquiere la temperatura óptima de procesamiento, se consigue la forma final mediante un proceso final estampado, el cual consolida el material y elimina los poros provenientes del proceso de impresión 3D. La consecución de una adherencia de unión entre el sustrato y el material termoplástico sobreimpreso con propiedades resistentes es esencial para el éxito al igual que el enfoque propuesto por Akkerman *et al.* [Akkerman2020].

2.4. ECONOMÍA CIRCULAR E IMPRESIÓN 3D

2.4.1. Reciclado del plástico desde la perspectiva de la Economía Circular

El vertido, la incineración y la conversión de residuos en energía no forman parte del objetivo de la economía circular. El reciclaje, por tanto, es la mejor solución establecida para tratar los plásticos postconsumo. Sin embargo, las tendencias históricas en el reciclaje de polímeros se han orientado hacia las grandes instalaciones centralizadas para aprovechar las economías de escala en la producción de productos básicos de bajo valor, lo que puede tener un impacto medioambiental significativo, ya que exige la recogida y el transporte de plásticos residuales de densidad relativamente baja a los centros de tratamiento y a las instalaciones de recuperación para su separación y reutilización. Así que, el reciclaje centralizado de plásticos no suele ser ni económico ni ecológico. En comparación con el reciclado tradicional, el reciclado distribuido tiene el potencial de reducir el consumo de energía del transporte necesario en el reciclado centralizado. Los residuos también pueden reciclarse más eficazmente cuando se procesan en pequeños volúmenes a partir de fuentes únicas para los mercados locales, evitando la pérdida de información y la mezcla con agregados provenientes de fuentes de residuos muy distribuidas, lo que conduce a una mejor calidad del material y a un ahorro de costes relacionados con la clasificación de los residuos (Figura 72). Desde la perspectiva de la economía circular, los plásticos son especialmente interesantes para ser utilizados como material reciclado localmente: las tasas de reciclaje de plásticos siguen siendo bajas, y la baja densidad de valor del material provoca mayores costes de transporte en comparación con otros materiales. Teniendo en cuenta el potencial de suministro de materiales distribuidos, los plásticos ya están muy distribuidos y producen flujos de residuos constantes, ya que se encuentran en muchos bienes de consumo de rápida rotación. [Garmulewicz2018]

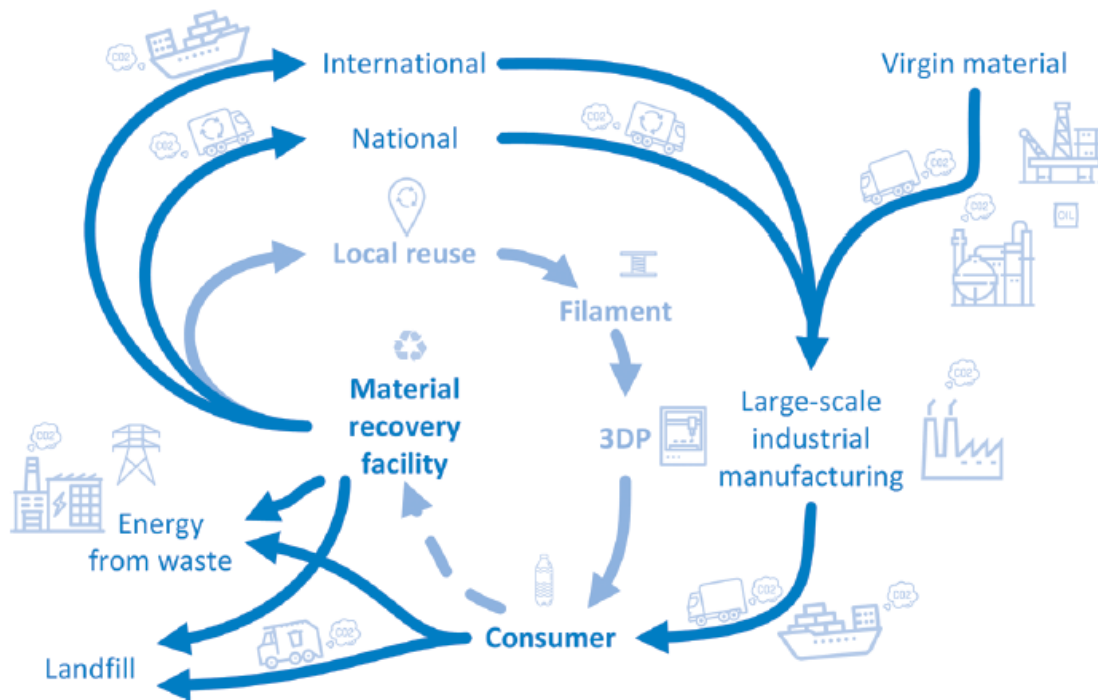


Figura 72. Reciclado, Revalorización y Reutilización local de los plásticos [Garmulewicz2018].

2.4.2. Oportunidades de la Fabricación Aditiva en el entorno EC

La fabricación de bienes de consumo en la Unión Europea contribuye a la creación de 30 millones de puestos de trabajo directos, y el doble de puestos indirectos. Contribuye al 80% del total de las exportaciones de la Unión Europea y al 80% del gasto privado en I+D. La fabricación avanzada contribuye actualmente a 1,6 millones de puestos de trabajo y al 11% de la producción total de la Unión Europea [Tofail2018]. Casi la mitad de las empresas manufactureras europeas no han utilizado tecnologías de fabricación avanzada en el pasado y no tienen previsto utilizarlas en los próximos años. La fabricación aditiva se ve como una clave para asegurar una base industrial sólida, y como una de las tecnologías habilitadoras físicas para el paradigma de la Industria 4.0. Sin embargo, las empresas siguen siendo cautelosas en cuanto a su implantación debido a sus beneficios son aún desconocidos y a la falta de conocimiento sobre cómo, dónde y por qué emplear las tecnologías aditivas. En términos monetarios, se espera que la AM a nivel mundial alcance el tamaño de 45 mil millones de euros entre 2029 y 2031, y 90 mil millones de euros entre 2031 y 2044. La adopción de la AM parece anunciar un futuro en el que las cadenas de valor serán más cortas, más pequeñas y localizadas, en el que serán factibles modelos de negocio más colaborativos e innovadores con importantes beneficios de sostenibilidad [Tofail2018].

Varios estudios han demostrado que la adopción de la AM por parte de la industria necesitará de esfuerzos para resolver dos inconvenientes: la velocidad y los costes de producción. Inicialmente, los investigadores sostenían que la velocidad de producción y el coste por unidad de la AM todavía no eran competitivos con los de la fabricación convencional; sin embargo, estos argumentos estaban relacionados con la AM como una tecnología de producción en masa. Es por ello, que la mayoría de las aplicaciones exitosas de la AM han sido productos innovadores y personalizados fabricados en lotes de producción únicos o muy pequeños.

Los costes directos han sido identificados como uno de los factores que más sobrecargan el precio final. El coste de las máquinas de AM oscila entre el 50% y el 75% del coste total de producción [Tofail2018]. Sin embargo, este coste ha ido disminuyendo paulatinamente (entre 2001 y 2011 el precio medio disminuyó un 51%) [Thomas2016]. El coste de los materiales oscila entre el 10% y el 40% [Tofail2018, Thomas2016, Gebler2014]. Los precios de los materiales de AM son significativamente más altos que los de las materias primas de los procesos convencionales, pero se amortizan debido a una mayor eficiencia de los materiales. Por último, el coste de la mano de obra oscila entre el 5% y el 30%. La reducción de estos costes puede tener un efecto significativo en la adopción de las tecnologías de AM en términos de calidad, validación del rendimiento y ampliación de las capacidades de tamaño. En cuanto a la velocidad de producción, el tiempo de impresión requerido para un producto específico se ha reducido en aproximadamente un 450% desde 2004 hasta 2014 [Niakia2019].

2.4.3. Fabricación Aditiva como tecnología habilitadora de la EC

Dada la atención que suscita la fabricación aditiva, las organizaciones quieren saber si sus productos deben fabricarse mediante AM. Existen diferentes tecnologías de fabricación que pueden crear una pieza capa a capa, como la extrusión de material, la fusión de lecho en polvo, *binder jetting*, *material jetting*, fotopolimerización, *directed energy deposition* y *sheet lamination*. Cada tecnología de AM tiene sus propias capacidades de procesamiento, ventajas y limitaciones, incluidos los materiales, el volumen de construcción, la velocidad de procesamiento, las operaciones de post-procesamiento y la calidad de la pieza en relación con el rendimiento mecánico, la precisión dimensional o el acabado superficial. Nos centraremos en los procesos de extrusión de materiales, que utilizan filamento termoplástico en bobina o en pellets para

impresión de objetos, ya que es la tecnología de AM más distribuida debido a su menor coste de capital y, por tanto, ofrece oportunidades para utilizar materiales reciclados que están ampliamente disponibles a escala local.

- Mercado y oportunidades de negocio para AM

La globalización ha cambiado drásticamente el panorama productor-comprador. En combinación con otras tendencias destacadas como la servitización, la personalización y el prosumo, la aparición de la AM como proceso de fabricación directa está llevando a las empresas a replantearse dónde y cómo realizan sus actividades de fabricación. Los consumidores desean cada vez más comprar productos únicos que reflejen con precisión sus preferencias y necesidades individuales. Además, ha aumentado la frecuencia con la que se introducen nuevos productos con ciclos de vida más cortos. Por lo tanto, es inevitable acercarse a la era de la individualización masiva, en la que los productos del mercado único podrían fabricarse a un coste similar al de los productos personalizados en masa. Un factor fundamental que permite la individualización y la personalización del producto es la flexibilidad de la tecnología de fabricación en cuanto a la variedad de productos. [Garmulewicz2018, Gu2018, Rauch2018, Tofail2018, Jiang2017, Ford2016, Weller2015, Conner2014]

Una de las tecnologías emergentes que parece garantizar el cumplimiento de estos requisitos es la fabricación aditiva, ya que la AM permite la producción económicamente viable de lotes pequeños, o incluso lotes unitarios personalizados. Se ha reconocido que el modelo tradicional de economía de escala no es relevante para la AM (Figura 73a), dando lugar a lo que se denomina “economía de uno” [Gu2018]. De hecho, la ventaja competitiva de las empresas está pasando de las capacidades de fabricación y de la cadena de suministro a las capacidades de diseño. La fabricación aditiva no consiste en sustituir la fabricación en serie convencional, que puede producir, si es necesario, miles de piezas idénticas a bajo coste. Se trata de fabricar formas y productos que no son posibles o rentables mediante las tecnologías convencionales. Sin embargo, la tecnología AM tiene el potencial de perturbar incluso los mercados relativamente maduros. De hecho, los precios de los productos pueden aumentar potencialmente si la individualización basada en la AM se utiliza para ofrecer productos funcionalmente optimizados o altamente personalizados a la medida de las necesidades de los clientes (Figura 73b), y los productores podrán exigir una prima de precio en comparación con los productos no personalizados [Conner2014].

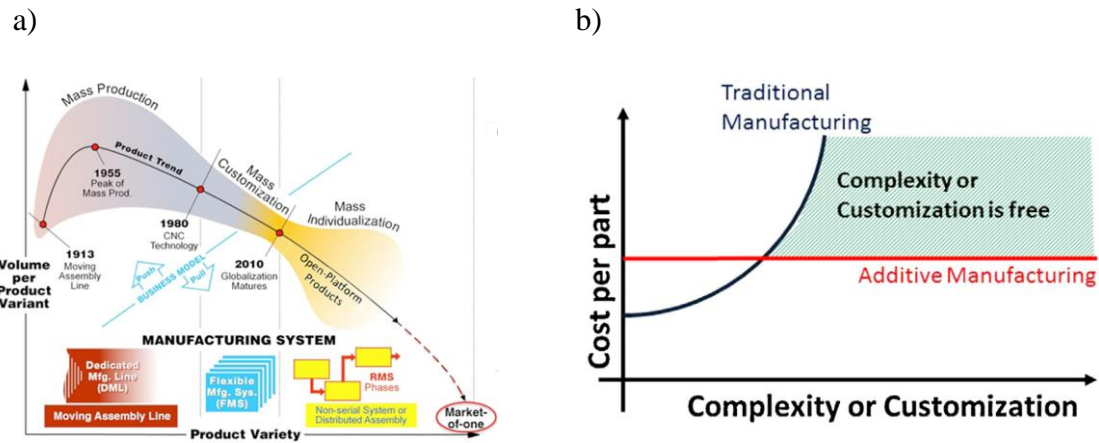


Figura 73. a) Fabricación aditiva [Gu2018] y b) personalización de producto [Conner2014].

Rauch *et al.* [Rauch2018] analizaron los sectores industriales prometedores en los que la integración de las tecnologías de AM tenía sentido como estructura de fabricación descentralizada. Llegaron a la conclusión de que son éstos, por orden de oportunidad; Instrumentos y suministros médicos y dentales; Joyería; Piezas y maquinaria relacionada con sector aeronáutico y aeroespacial; Reparación y mantenimiento en estructuras aeronáuticas y aeroespaciales; Calzado; Artículos deportivos; Automoción; Prendas de vestir y accesorios; Motocicletas; Bicicletas y vehículos de transporte para discapacitados; Reparación de maquinaria (Figura 74).

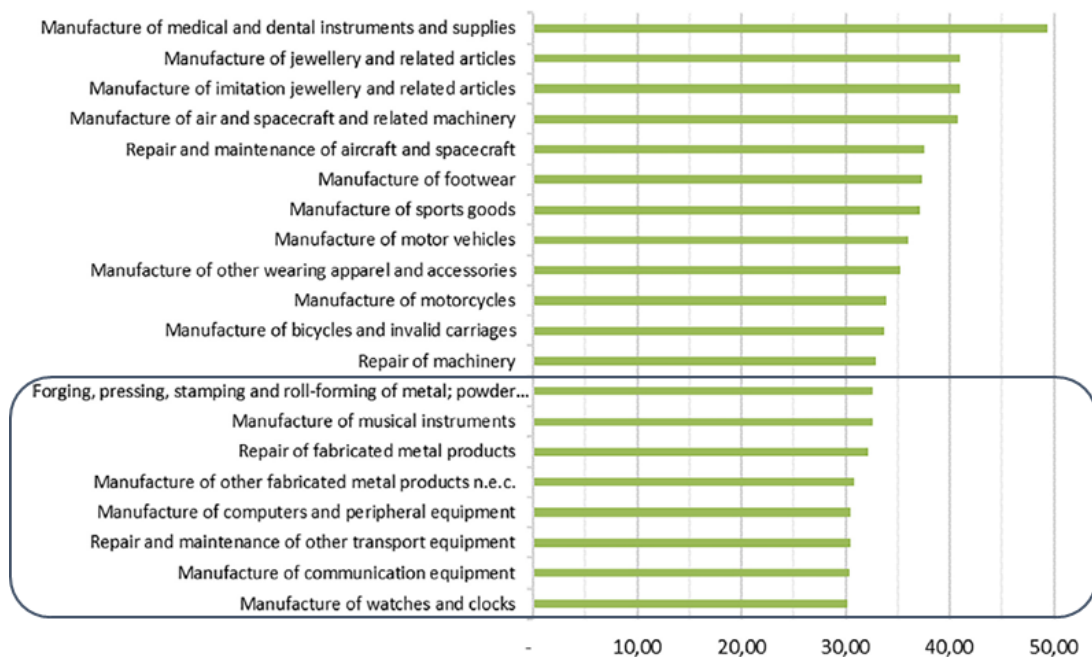


Figura 74. Oportunidades de negocio y sectores para la integración de AM [Rauch2018].

La AM representa una tecnología relativamente novedosa y está actualmente relacionada a procesos de fabricación que impulsan el desarrollo sostenible. Niakia *et al.* [Niakia2019] estudiaron por qué los fabricantes adoptan las tecnologías de AM. Sus resultados indicaban que los factores determinantes son factores económicos ya que los motivos más valorados fueron la capacidad de la tecnología para proporcionar un ahorro de costes y de tiempo, un 24% y un 23%, respectivamente. A parte de los indicadores económicos, los indicadores medioambientales (6%) y sociales (menos del 1%) presentaban una ligera influencia en la decisión de integración de las tecnologías AM. En consecuencia, es necesario y fundamental crear una economía efectiva de plásticos posconsumo para incentivar la interiorización de los objetivos de la Economía Circular.

- Ventajas y beneficios de la integración AM y la EC

Entre los numerosos beneficios potenciales de la fabricación aditiva en materia de sostenibilidad, se destacan tres. En primer lugar, la eficiencia del producto, el proceso y la cadena de suministro; en segundo lugar, la prolongación de la vida útil del producto mediante la personalización, la reparación o la remanufactura; y, en tercer lugar, el uso de plásticos de reciclaje.

El primer beneficio de la fabricación aditiva está relacionado con la eficiencia del producto, y más concretamente con la desmaterialización:

La reducción (optimización) de peso en transporte puede llevar también a ahorrar materia prima y energía en todo el ciclo de vida del producto. La libertad de diseño (para casi cualquier diseño geométrico complejo), sin penalización de costes en la fabricación, es probablemente una de las ventajas más apreciadas de la fabricación aditiva [Despeisse2017]. La complejidad del producto se refiere al número de funcionalidades que contiene una pieza, así como a la geometría y la ubicación de estas funcionalidades. En general, cuanto más compleja es una pieza, más difícil y costosa es su fabricación con las tecnologías tradicionales.

Mediante la optimización de la topología, se puede optimizar una pieza teniendo en cuenta la tensión aplicada y la rigidez requerida, lo que da lugar a productos más ligeros con estructuras huecas o celulares. Además, un aumento de la complejidad del diseño no implica mayores costes de producción, al contrario de lo que ocurre con las tecnologías convencionales, en las que los costes unitarios de producción suelen aumentar con una mayor complejidad del diseño del producto.

La fabricación aditiva permite a los diseñadores reducir el número de componentes integrando más funcionalidades en una pieza, como piezas móviles o sistemas de refrigeración [Weller2015]. Por lo tanto, al sustituir un conjunto integrado por varios componentes, se simplifican las líneas de montaje y se reducen los costes, el tiempo y los problemas de calidad. GE Aviation puede producir eficazmente boquillas de combustible para motores a reacción utilizando la fabricación aditiva. Imprimen esta pieza con un peso un 25% menor y una durabilidad hasta cinco veces mayor que la producida mediante fabricación convencional. La AM permitió que la boquilla, que antes se ensamblaba a partir de 20 piezas de fundición separadas, se fabricara en una sola pieza, reduciendo el coste en un 30%.

Por último, dado que productos digitales están en una fase prueba o “beta” continua, la AM también permite realizar iteraciones de diseño más frecuentes y modificaciones constantes para mejorarlos [Tofail2018, Jiang2017, Weller2015].

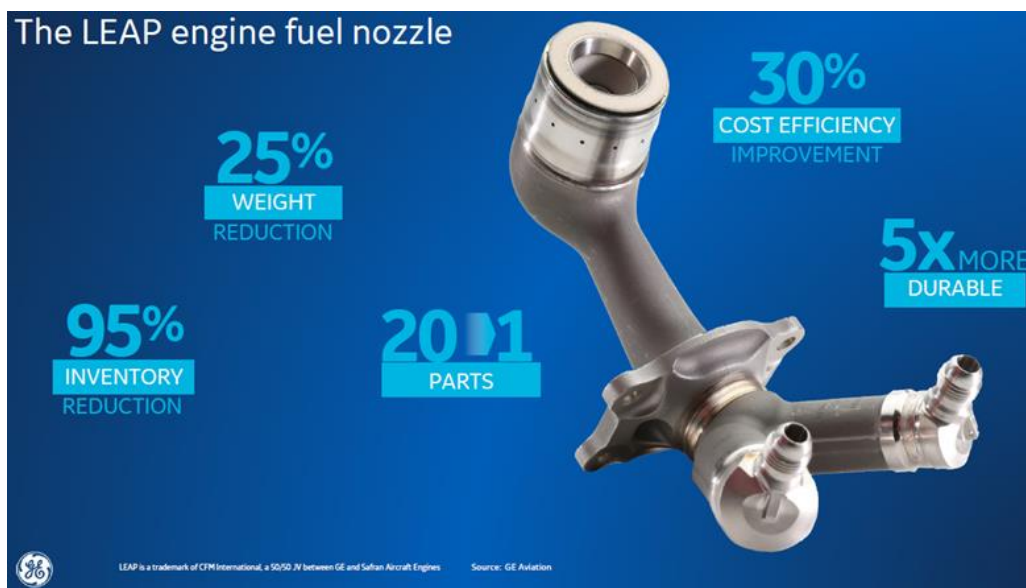


Figura 75. Inyector de combustible para el motor aeronáutico LEAP [GE-aviation].

Segundo, la eficiencia también es mayor desde el punto de vista del proceso:

La fabricación aditiva se acerca a la fabricación con “cero residuos” al maximizar la utilización de los materiales. Varios casos de estudios han demostrado que la tecnología AM puede reducir sustancialmente el uso de materias primas y minimizar el material de desecho, en comparación con las tecnologías de fabricación convencionales [Singh2017, Gao2015, Weller2015].

De hecho, aunque se producen algunos desechos de material debido a las estructuras de soporte, la relación *buy-to-fly* (relación entre la cantidad de material comprado y la cantidad de material que se encuentra en el componente final) es muy baja en los procesos de AM. Además, un proceso de producción totalmente automatizado y digitalizado implica menos trabajo manual y esfuerzo en cambios utillajes o moldes, lo que reduce la probabilidad de lotes defectuosos.

La actividad industrial representa el 22% del consumo total de energía final y alrededor del 20% de las emisiones globales de CO₂ [Cerdas2017]. Por lo tanto, el sector industrial debe considerarse como uno de los principales sectores en los que se necesitan cambios transformadores hacia la sostenibilidad. Esto implica un cambio hacia medios de producción más eficientes en cuanto a los recursos energéticos, lo que conducirá a una disminución de la intensidad de los insumos y la producción por unidad de producto interior bruto para evitar los impactos del cambio climático, el agotamiento de los recursos naturales y las alteraciones de los sistemas ecológicos. El impacto medioambiental del método de producción se centra principalmente en el uso de energía por parte de la máquina, y la mayoría de los resultados muestran que la fabricación aditiva suele ser más intensiva en energía que los métodos de producción convencionales. Mientras que el consumo específico de energía en los procesos de moldeo por inyección oscila entre 0,1 y 5,8 kWh/kg, los procesos de fabricación aditiva (en concreto los procesos de extrusión) tienen un consumo de energía de 23 kWh/kg [Cerdas2017]. Este aumento de consumo de energía incorporada en el producto impreso se debe básicamente a los largos tiempos de procesamiento. Recientemente, se ha demostrado que los dispositivos solares fotovoltaicos para generar electricidad para la fabricación aditiva son eficaces y reducen considerablemente las emisiones totales [Gwamuri2016].

Sin embargo, la sostenibilidad de la fabricación aditiva debe analizarse también más allá de los parámetros del proceso de la propia tecnología, e incluir todo el ciclo de vida. La fabricación aditiva tiene el potencial de reducir los costes entre 150 y 535 mil millones de euros, el suministro total de energía primaria entre 2,5 y 9,3 EJ, y las emisiones de CO₂ entre 130 y 525 millones de toneladas para 2025 en los mercados identificados para la fabricación aditiva [Gebler2014].

La gran amplitud de los potenciales de ahorro puede explicarse por el estado inmaduro de la tecnología y las incertidumbres asociadas a la predicción de la evolución del mercado y la tecnología. Las intensidades de energía y de emisiones de CO₂ de la

fabricación industrial son reducibles como máximo en un 5% mediante la AM para 2025, ya que sigue siendo una tecnología de nicho [Gebler2014]. Si la AM fuera aplicable a mayores volúmenes de producción en la fabricación de productos de consumo o de automóviles, contiene el potencial teórico de desvincular absolutamente la energía y las emisiones de CO₂ de la actividad económica.

Y el tercer pilar de la eficiencia es la optimización de la cadena de suministro:

La fabricación aditiva permite la producción directa a partir de modelos digitales en 3D almacenados en un archivo CAD, sin necesidad de herramientas o moldes, lo que se conoce como *Direct Digital Manufacturing* o fabricación digital directa (DDM). La fabricación directa también permite reducir las barreras de entrada al mercado. Los tiempos y costes de configuración y cambio son insignificantes, ya que sólo es necesario cargar un archivo CAD diferente en la máquina cuando se cambia el producto a fabricar [Niakia2019, Despeisse2017, Weller2015].

La AM es un ejemplo de tecnología de fabricación flexible, ya que permite conceptualmente una gran variedad de resultados en la fabricación en cualquier secuencia dada en un sistema de fabricación estable [Niakia2019, Weller2015].

La AM puede proporcionar una alternativa viable a la actual fabricación basada en la proyección, introduciendo la fabricación bajo demanda [Weller2015]. Esto significa que el almacenamiento de la pieza fabricada podría no ser necesario. Únicamente se guardará la versión digital del diseño de la pieza y se fabricarán bajo demanda con envío inmediato. Del mismo modo, las piezas pueden fabricarse sólo cuando un cliente haga el pedido en tiempo real. Es por ello por lo que los procesos de pedido integrados también pueden dar lugar a la eliminación de inventarios y a la reducción de los gastos por existencias.

El punto de equilibrio de una serie de producción es específico para cada caso y depende de aspectos tecnológicos como la complejidad de la pieza, el material y el volumen de fabricación. Cuando se compara la fabricación aditiva con los procesos convencionales, los puntos de equilibrio representan una medida central para describir el tamaño máximo de los volúmenes de producción por debajo del cual es la opción más rentable.

La fabricación aditiva se adapta bien a las economías de alcance aprovechadas por la cadena de suministro definida por software, en la que se puede construir una mayor variedad de productos por unidad de capital, en lugar de las tradicionales economías de escala resultantes de las líneas de producción construidas cuidadosamente para el

volumen y la velocidad. Así, la fabricación aditiva hace posible el concepto de la “economía de uno”, lo que implica que es posible producir una sola pieza de manera rentable, y evitar la necesidad de mantener un gran inventario [Niakia2019, Garmulewicz2018, Despeisse2017, Gebler2014].

La fabricación aditiva influirá en las decisiones que se tomen sobre la ubicación de la fabricación. Los costes relativamente bajos de las máquinas y la configuración, combinados con la viabilidad de producir económicamente lotes de pequeño tamaño, permitirán potencialmente la transición de los sistemas de fabricación tradicionales a los sistemas de fabricación basados en la nube y distribuidos geográficamente, lo que representa una opción real para producir productos personalizados bajo demanda cerca del lugar de consumo o uso. En la actualidad, dada la enorme red mundial y/o cadena de suministro, las materias primas se extraen en un país o lugar, se transforman para obtener existencias en otro lugar y se ensamblan en otra serie de productos en múltiples lugares del mundo. De este modo, es posible comprender las ventajas que presenta la fabricación distribuida desde el punto de vista económico y de la sostenibilidad. Se espera que los sistemas de fabricación distribuida permitan un uso más eficiente de los recursos, ya que las cadenas de suministro pasan de los productos finales a su archivo digital, siendo menos intensivas en materia de transporte. Sólo hay que recordar que el transporte de mercancías consumió el 45% del total de la energía del transporte en 2009. Por último, la fabricación distribuida en lugares remotos, como zonas rurales con perfiles económicos bajos, es especialmente ventajosa para la fabricación aditiva, ya que podría ayudar a producir sus propios bienes adaptados a las necesidades locales, como piezas de repuesto, productos de consumo o herramientas. Las implicaciones laborales en los países desarrollados con sociedades envejecidas también se consideran potencialmente beneficiosas. Se espera que la fabricación aditiva traslade la producción a los países consumidores, ya que la proporción de los costes laborales en el total de los costes de producción disminuye [Niakia2019, Rauch2018, Tofail2018, Jiang2017, Gebler2014].

En los últimos años, los nuevos servicios facilitan el acceso a las capacidades locales de fabricación de AM, lo que reduce las barreras de entrada al mercado. Por ejemplo, actores bien establecidos como las empresas de logística UPS o la francesa La Poste proporcionan capacidades de fabricación local, de manera que tanto las pequeñas empresas como los consumidores pueden producir diseños en 3D en una tienda local equipada con tecnología AM (Figura 76).



Figura 76. Ejemplo de fabricación distribuida mediante AM [3DHubs2020].

2.4.4. Perspectivas de futuro y retos a abordar por AM

El siguiente beneficio medioambiental de la fabricación aditiva es la prolongación de la vida útil del producto mediante enfoques técnicos como la reparación, la remanufactura y el reacondicionamiento, a través de modelos socioeconómicos más sostenibles, como una mayor afinidad de los productos con la persona y una relación más estrecha entre productores y consumidores.

El primer enfoque es la personalización. Los productos no sólo se desechan por fallos técnicos, sino a menudo por razones psicológicas [Ford2016]. La personalización se considera una estrategia de diseño sostenible para crear una relación más fuerte entre el usuario y el producto, alargando su vida útil. En este contexto, la gran demanda de personalización de productos adaptados a los clientes individuales, lo más rápido posible, es un fuerte impulsor de las nuevas reglas del mercado. La fabricación aditiva, como tecnología de fabricación digital, permite este planteamiento porque hace accesibles y asequibles productos únicos y de pequeñas series sin penalizaciones de coste o tiempo en la fabricación. Los tiempos de comercialización, ciclo de vida de los productos y aceleración habrán disminuido, ya que los productos digitales estarán en una fase beta continua y se someterán a frecuentes iteraciones de diseño y a constantes modificaciones para mejorar en términos de personalización y prestaciones [Jiang2017, Weller2015].

Desde el punto de vista del consumidor, la fabricación aditiva permite a los usuarios privados e industriales diseñar, o incluso producir, sus propios bienes en un enfoque de fabricación distribuida. Esto refuerza la idea de Toffler del auge del prosumidor, que

aumenta aún más la amenaza competitiva que propone la fabricación aditiva para las empresas establecidas. De hecho, varios autores [Jiang2017] también afirman que la producción local puede empoderar a las comunidades locales mediante la creación de soluciones que respondan a las necesidades de la comunidad y que respeten sus activos culturales.

La producción digital favorece la reparación de piezas rotas ya que pueden ser copiadas y reproducidas rápidamente [Sauerwein2019]. Algunas tecnologías de fabricación aditiva pueden incluso imprimir directamente sobre superficies existentes. Por lo tanto, la fabricación aditiva está reconocida como una técnica de producción que podría favorecer la reparación.

El proceso de producción digital también permite almacenar digitalmente las piezas de recambio y producirlas únicamente bajo demanda [Despeisse2017, Jiang2017]. Esto reduce los inventarios y elimina el espacio de almacenamiento, haciendo más accesible la reparación. La fabricación de piezas de recambio se dividirá en dos sistemas: las piezas menos críticas se producirán localmente mediante fabricación aditiva, mientras que las piezas críticas se fabricarán en centros especializados con competencias específicas de cualificación y control de calidad.

La tercera contribución principal de la fabricación aditiva a la economía circular es el reciclaje. La homogeneidad de los residuos depende del producto y, en consecuencia, también la reciclabilidad. Los balances medioambiental y económico del reciclaje de los parachoques de los coches o de los tapones del champú son radicalmente opuestos. El tiempo de fabricación es dinero. La recogida, la inspección, la separación y el secado son procesos lentos, y cada minuto añade euros al coste. A esto hay que añadir que la calidad del material reciclado es menor que la del original, lo que limita su uso a productos menos exigentes. En consecuencia, el precio de los plásticos reciclados es alrededor de un 50% inferior al del reciclado [Ashby2007].

Capítulo 3

Estudio crítico sobre el estado del arte

CAPÍTULO 3

Estudio crítico del estado del arte y objetivos

3.1. ESTUDIO CRÍTICO DEL ESTADO DEL ARTE

Una vez presentado los resultados más relevantes del estado arte relacionado con la temática de la presente tesis doctoral, se procede a realizar un estudio crítico del estado del arte que permita identificar las hipótesis de trabajo, los métodos experimentales más adecuados y las lagunas de conocimiento existentes. El análisis se ha agrupado en 8 bloques principales:

- 1) En la literatura, se ha encontrado que las prestaciones de absorción de energía de los materiales compuestos reforzados con fibra continua (cFRP) son interesantes para el diseño de estructuras primarias en el sector del transporte. El diseño de estructura fabricadas en cFRP responde a una necesidad del sector en términos de aligeramiento y mejora seguridad pasiva en caso de accidente. Los composites de matriz termoplástica (cFRTP) presentan ventajas frente a los composites de matriz termoestable (cFRP) como; mayores niveles de absorción de energía de impacto, mejor reciclabilidad y facilidad de reparación de los componentes dañados. El porcentaje en masa de estructuras de cFRTP presentes en la estructura de los vehículos es inferior frente a los cFRP termoestables, por lo que tienen un gran potencial de crecimiento [Belingardi2013, Frketic2017]. No se han encontrado trabajos que hablen de perfiles con geometrías complejas y/o no regulares para la absorción de energía.
- 2) La impresión 3D de composites cFRTP (cFF) permite el desarrollo de nuevos conceptos de estructuras más complejas en diseño y metamateriales con propiedades programables. También permite obtener orientaciones no convencionales, refuerzos localizados o estructuras con gradiente funcional. Las propiedades mecánicas obtenidas mediante filamentos pre-impregnados son

superiores a las obtenidas con tecnologías basadas en la impregnación de las fibras en la boquilla [Blok2018, Goh2018]. No se han encontrado evidencias de la utilización del proceso cFF para aplicaciones de absorción de energía.

- 3) A pesar de que la caracterización mecánica de los materiales disponibles para la fabricación de piezas impresas por cFF (cCF/PA, cGF/PA y cKF/PA) ha sido ampliamente estudiada, esta sólo se ha llevado a cabo bajo condiciones de ensayo y geometrías simple o estándar (tracción, compresión, flexión o Charpy). Sin embargo, se desconocen estudios que investiguen geometrías complejas impresas mediante cFF diseñadas para aplicaciones de comportamiento a impacto y absorción de energía [Kabir2020, Caminero2018].
- 4) En la literatura se han identificado los perfiles tubulares cFRP fabricados mediante procesos tradicionales y orientaciones de fibra convencionales como soluciones destacadas por su capacidad de absorción de energía y resistencia al impacto, principalmente cuando son sometidos a cargas axiales. Sus modos de colapso progresivo han sido caracterizados y relacionados con parámetros geométricos de la sección transversal y propiedades de los materiales constituyentes, porcentaje en volumen de fibras, contenido en poros, orientación de las fibras y proceso de fabricación. La capacidad absorción radial de estos perfiles es inferior a la axial, por lo que su mejora presenta un gran potencial innovador [Farley1991, Hamada1992].
- 5) A fin de mejorar el comportamiento lateral a *crush* de los tubos huecos se han identificado los metamateriales auxéticos como núcleos. Esta mejora se asocia a su módulo de Poisson negativo, que permite un aumento de la energía disipada mediante mecanismos de colapso controlados por grandes cambios geométricos (plegado) y la densificación de la estructura. En la literatura se han encontrado evidencias de núcleos re-entrante impresos mediante impresión 3D - FFF con geometrías regulares, repetitivas, homogéneas y propiedades transversales programables para impacto fuera de plano en placas o vigas tipo sándwich [Saxena2016, Ingrole2017]. No obstante, no se han encontrado estudios que analicen la influencia de estos núcleos re-entrante en el comportamiento a impacto radial de perfiles tubulares fabricados mediante impresión 3D.

- 6) La selección del material compuesto para las estructuras tubulares para disipación de energía de impacto no es trivial, ya que la matriz del filamento que recubre las fibras y los defectos microestructurales inducidos por el proceso de impresión 3D son diferentes en función del tipo de fibra. En literatura, se han encontrado estudios que analizan la influencia de la naturaleza de la matriz cFRTP (amorfa o semi-cristalina) sobre la capacidad de absorción de energía [Siviour2016, Pascual-Gonzalez2020, Matsuzaki2018].
- 7) La hibridación de procesos/materiales compuestos termoplásticos es una estrategia utilizada para combinar las elevadas propiedades de los composites reforzados con fibra continua y la libertad de diseño de los procesos de los reforzados con fibra discontinua. La combinación del moldeo por inyección, estampación y forjado en diferentes configuraciones ha sido ampliamente reportada en la bibliografía, pero el potencial de la tecnología cFF para desarrollar refuerzos localizados es una vía aún sin explorar [Akkerman2020].
- 8) La fabricación aditiva (AM) ha demostrado estar alineada con los principios de la Economía Circular, ya que permite pasar de un modelo de fabricación y reciclaje centralizado a un modelo en el que el ciclo fabricación, consumo y reciclaje se realiza de forma distribuida en la cercanía de cada usuario [Kreiger2014, Garmulewicz2018]. No obstante, no hay trabajos donde se muestre la reciclabilidad de los cFRTP para posterior empleo en impresión 3D – FFF y se desconocen los efectos del proceso reciclado sobre las propiedades a impacto.

3.2. OBJETIVOS

El objetivo principal del presente proyecto de tesis es desarrollar estructuras tubulares rellenas con metamateriales fabricadas en composite de fibra continua mediante impresión 3D - FFF para aplicaciones de disipación de energía de impacto. Para alcanzar dicho objetivo, el trabajo se centra en los siguientes objetivos operativos:

- Desarrollar un concepto de estructura tubular fabricado en composite de fibra continua mediante impresión 3D - FFF apto para la absorción de energía de impacto.

- Desarrollar un núcleo fabricado en composite de fibra corta mediante impresión 3D - sCF y basado en una estructura celular auxética con propiedades mejoradas a impacto.
- Diseñar una estructura rellena que integre perfil y estructura celular (auxético) mediante impresión 3D - FFF, buscando un efecto sinérgico para solicitaciones de impacto lateral/radial.
- Desarrollar refuerzos localizados mediante impresión 3D de fibra continua para incorporarlos en procesos de fabricación convencionales de composites de matriz termoplástica.
- Desarrollar un modelo de negocio para la fabricación de protecciones en el sector transporte, aplicando conceptos de economía circular y sobreimpresión 3D.

Capítulo 4

Metodología

CAPÍTULO 4

Metodología

En este capítulo se muestran los materiales utilizados en el desarrollo de la presente tesis doctoral y los medios productivos para la fabricación de las probetas, así mismo, de las técnicas experimentales empleadas para su caracterización física y mecánica.

4.1. MATERIALES EMPLEADOS

Los materiales empleados para la impresión de probetas, probetas y demostradores han sido suministrados Markforged[®] en formato filamento de 1.75 mm. Tanto el filamento de relleno como el filamento de refuerzo (cFF) se basan en una matriz de poliamida 6.

4.1.1. Filamento de relleno

Onyx[®] es el filamento empleado como material de relleno en el proceso de impresión cFF y está reforzado con microfibras de carbono (sCF). Entre sus características destacan su buen acabado superficial y tolerancia dimensional en las piezas impresas. La Tabla 3 muestra sus principales propiedades:

Tabla 3. Propiedades mecánicas a tracción del material de relleno empleado. [Mark2015].

Material	Densidad (g/cm ³)	Módulo Elasticidad (GPa)	Límite elástico (MPa)	Resistencia a tracción (MPa)	Alargamiento a rotura (%)
Onyx [®]	1,2	2,4	40	37	25
Nylon (PA6)	1,1	1,7	51	36	150

Únicamente, se ha empleado Nylon (una poliamida 6 estándar) en la fabricación de las probetas del proceso de sobreimpresión (capítulo 8). Este material de relleno no lleva carga de refuerzo.

4.1.2. Filamentos de los pre-impregnados de refuerzo (cFF)

Los filamentos de fibra continua empleados en el desarrollo de esta tesis son: filamento de fibra de carbono (cCF/PA), fibra vidrio de alta temperatura y resistencia (cGF/PA) y Kevlar® (cKF/PA). Las propiedades de cada material cFF se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4. Propiedades mecánicas de los materiales de refuerzo empleado [Mark2015].

Material	Densidad (g/cm ³)	Tracción			Compresión		
		Módulo Elast. (GPa)	Resistencia (MPa)	Alarga. rotura (%)	Módulo Elast. (GPa)	Resistencia (MPa)	Alarga. rotura (%)
cCF/PA	1,4	60	800	1,5	54	320	1,2
cGF/PA	1,5	21	600	3,9	21	192	2,2
cKF/PA	1,2	27	610	2,7	28	97	2,1

4.2. PROCESO DE IMPRESIÓN CFF

4.2.1. Máquina de impresión 3D

En la actualidad, solamente se comercializa unas pocas impresoras capaces de imprimir cFF (Figura 77), entre ellas está la Mark Two®, comercializada por MarkForged® [Mark2015].

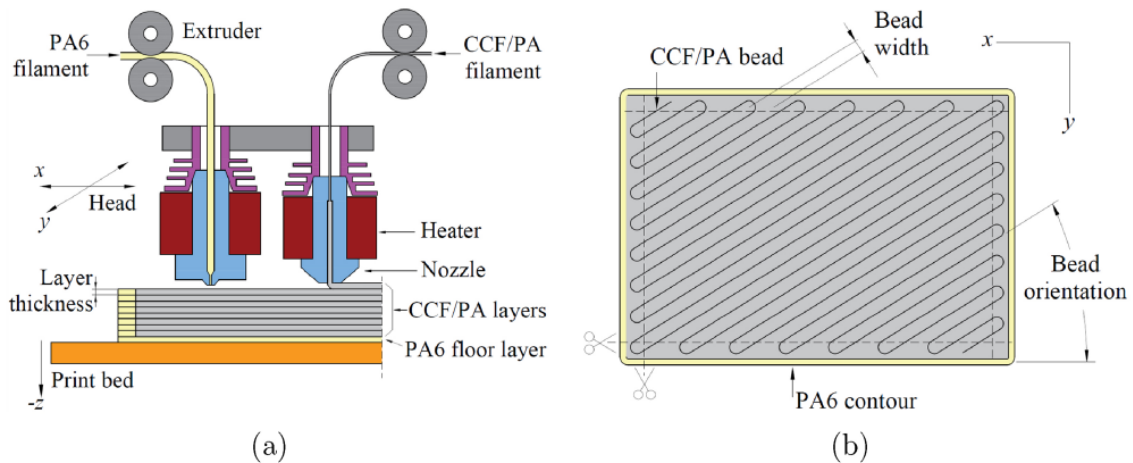


Figura 77. Tecnología de impresión cFF. a) Descripción general del proceso y secuencia de impresión capa a capa (b) patrón de impresión de fibra rectangular [Iragi2019].

El sistema de Markforged[®], se basa en un cabezal de doble extrusión para el filamento pre-impregnado de fibra y para el material de relleno. El sistema de arrastre del filamento es de tipo mecha y dispone de un sistema de corte integrado en el extrusor de fibra.

El volumen de construcción de esta impresora es de 320 mm × 132 mm × 160 mm. Respecto a la calidad dimensional de las piezas impresas, la tolerancia de fabricación de esta impresora es de ± 0,05 mm.

La impresora no dispone de sistema de calefacción de la mesa de impresión ni tampoco de la cámara de impresión.

En cuanto a los parámetros de proceso, la impresora trabaja con unos parámetros óptimos prefijados, que en la mayoría de los casos no se pueden modificar. Los parámetros de impresión (extrusión y relleno) empleados para la fabricación de probetas se muestran en la Tabla 5 y Tabla 6.

Tabla 5. Parámetros de extrusión.

Parámetros de extrusión				
Material	Onyx [®]	cCF/PA	cGF/PA	cKF/PA
Altura de capa (mm)	0,1-0,2	0,125	0,1	0,1
Diámetro nozzle (mm)	0,4	0,9	0,9	0,9
Temperatura (°C)	273	252	252	252
Velocidad impresión (mm/s)	33	15	10	12,5

Tabla 6. Parámetros de relleno.

Parámetros de relleno		
Patrón relleno	Concéntrico	Isótropo
Número de capa sólidas base/techo	2	
Número de anillos de contorno	1	
Anillos concéntricos de fibra	2	0
Orienta. fibra/Pared refuerzo	Int. y Ext.	0°

4.2.2. Software Eiger[®]

Basándose en el archivo STL (fichero que contiene la geometría de la pieza a imprimir), el software Eiger[®] puede generar dos patrones de impresión diferentes para los filamentos reforzados con fibra continua: concéntrico e isotrópico (Figura 78).

En el patrón concéntrico, el cabezal de impresión sigue el perfil exterior de la pieza e imprime un único filamento de fibra desde el límite exterior hacia el límite interior formando anillos. La segunda opción es la trayectoria isotrópica, en la que la orientación de las fibras es independiente de la geometría de la pieza a imprimir y las fibras se depositan en líneas rectas siguiendo una orientación fija definida por el usuario para cada

capa. En ambos casos, el punto de partida es una zona potencialmente débil, por lo que en cada capa Eiger[®] mueve automáticamente este punto de partida alrededor de la pieza, generando un buen solapamiento.

Las probetas impresas con el eje principal (eje X) paralelo a la cama de impresión tienen un patrón de impresión isotrópico (en adelante se denominan como Longitudinal), mientras que se ha utilizado la estrategia concéntrica para la fabricación de las probetas con el eje principal perpendicular a la cama (identificadas como Concéntrico). Para todas las probetas, la densidad de relleno empleado es del 100% y sólo se ha utilizado un anillo de contorno de Onyx[®] para maximizar el contenido de fibra.

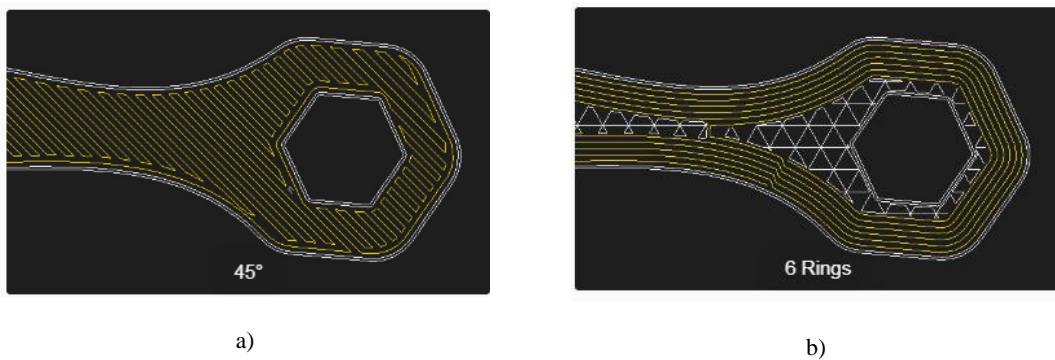


Figura 78. Trazado de la deposición de fibra continua: a) isotrópico y b) concéntrico [Mark2015].

4.3. FABRICACIÓN DE PROBETAS

El plan de fabricación de probetas se ha diseñado de acuerdo con la estructura en capítulos de la tesis, tal y como se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7. Plan de fabricación de probetas. Estructura de la tesis.

Capítulo		Variables de diseño					
		Fija		Ensayo		Resultado	
				Dirección	Velocidad		
5.	Influencia de la geometría	Área transversal	Material composite (cCF/PA)	Axial/Radial	C. Estática	Sección transversal	Trayectoria impresión (Concéntrica)
6.	Influencia de la velocidad de ensayo	Geometría perfil	Trayectoria impresión (Concéntrica)	Axial/Radial	C. Estática Impacto	Sensibilidad velocidad ensayo	cGF/PA
7.	Influencia del núcleo y efecto combinado	Geometría perfil	Trayectoria impresión (Concéntrica)	Radial	Impacto	Material composite cKF/PA	Tipo relleno auxético RSH

4.3.1. Influencia de la geometría

- Descripción de los perfiles huecos

Los dos diseños de perfil hueco seleccionados se muestran en la Figura 79 y su denominación, peso y propiedades geométricas se resumen en la Tabla 8. A fin de facilitar su estudio comparativo, se ha adoptado un criterio de diseño donde el espesor de pared y área transversal es el mismo para todos.

Tabla 8. Propiedades geométricas y masas de los perfiles (cCF/PA).

Denominación	Patrón	Área (mm ²)	I_{yy} (mm ⁴)	I_{zz} (mm ⁴)	Masa (g)	vol. Fibra (%)
	impresión					
Fold	Longitudinal	334	45656	28010	26	13
	Concéntrico				24	17
Hexagonal	Longitudinal	337	49513	49513	26	13
	Concéntrico				24	17

El primero de ellos, denominado Fold (Figura 79a), está inspirado en una sección transversal con una corrugación radial propuesta por Belingardi *et al.* [Belingardi 2013]. La segunda es un perfil con forma Hexagonal (Figura 79b) ampliamente utilizado como solución de compromiso entre un perfil tubular y sección cuadrada [Saenz-Dominguez2019, Esnaola2016]. Las probetas de compresión impresas son perfiles de 60 mm de longitud y 3 mm de espesor.

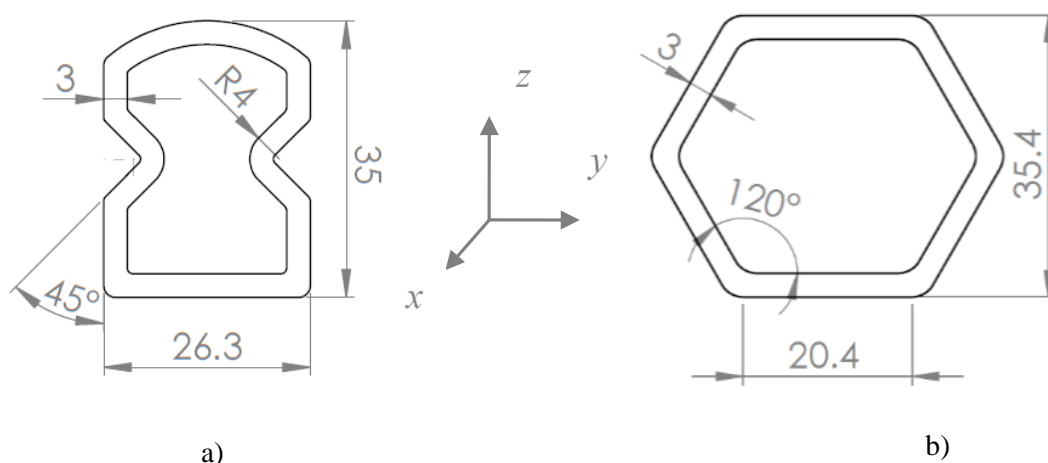


Figura 79. Geometrías de las estructuras; a) Fold [Belingardi2013], b) Hexagonal [Saenz2019, Esnaola2016, Esnaola2018].

Como método para la identificación de las probetas se ha empleado la siguiente codificación: la primera letra se corresponde a la geometría del perfil (F de Fold y H de Hexagonal), la segunda identifica el patrón de impresión (L de Longitudinal y C de Concéntrico), y la tercera define la dirección de la carga de compresión (A para Axial y R para Radial). Por ejemplo, una muestra FLR se corresponde con un perfil Fold reforzado con cCF/PA y dirección de la carga cuasi-estática radial. El porcentaje en volumen (%) medio de fibra de carbono está entre el 13 y 17%, en función de la dirección de impresión del perfil: longitudinal o transversal (Figura 80).

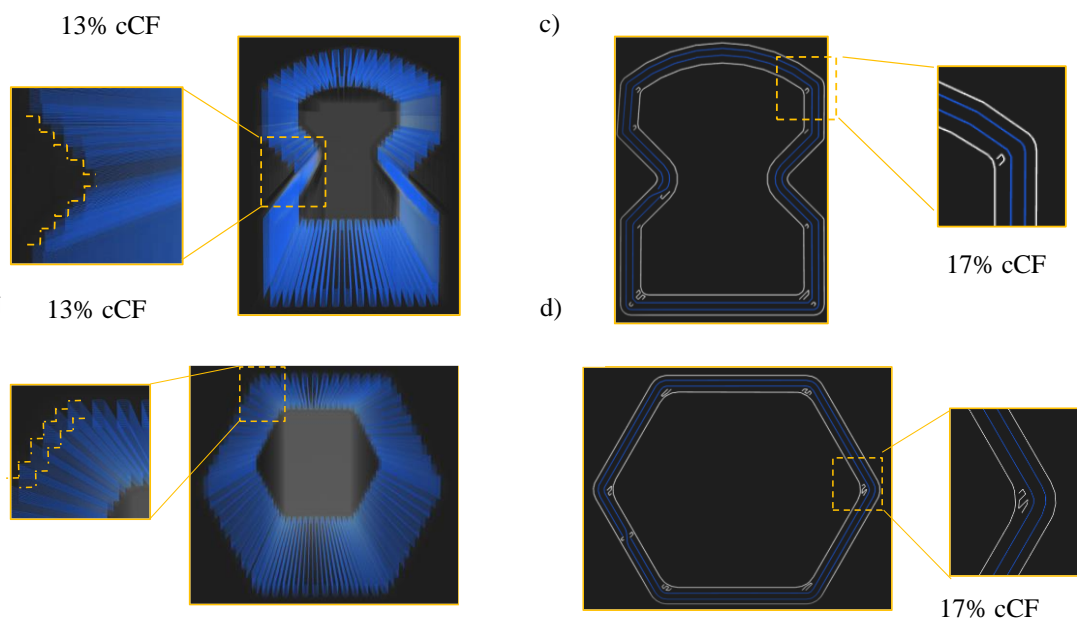


Figura 80. Trayectoria de impresión y contenido (%) medio en fibra de carbono. Longitudinal: a) Fold y b) Hexagonal. Concéntrico: c) Fold y d) Hexagonal.

4.3.2. Influencia de la velocidad de ensayo

- Descripción de los perfiles huecos

En la Tabla 9 se muestran las masas, contenido en volumen de fibra y tiempo de impresión para las probetas de perfil Fold, concéntrico y material: cCF/PA, cGF/PA y cKF/PA.

Tabla 9. Material, masa, volume de fibra y tiempo de impresión de los perfiles Fold.

Denominación	Patrón impresión	Material	Masa (g)	vol. Fibra (%)	Tiempo impresión (horas)
Fold	Concéntrico	cCF/PA	24	17	7,5
		cGF/PA	28	17	12
		cKF/PA	26	17	9

Las configuraciones de las probetas y trayectorias de Eiger[®] se muestran en el Figura 81.

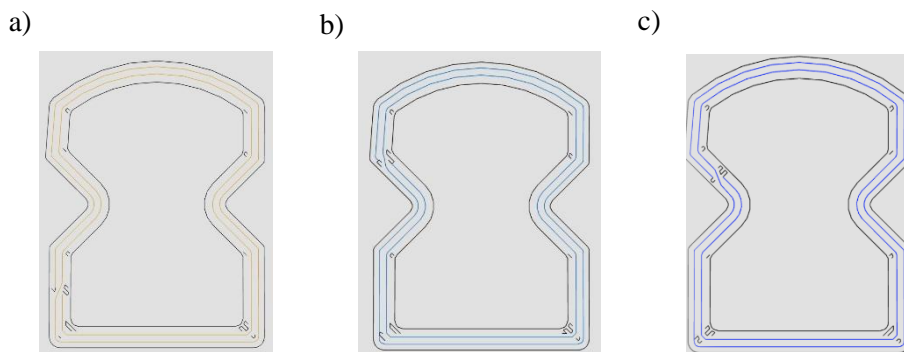


Figura 81. Trayectorias de impresión de fibra para el perfil Fold. a) cCF/PA, b) cGF/PA y c) cKF/PA.

4.3.3. Influencia del núcleo y efecto combinado

- Descripción de los núcleos auxéticos

La sección transversal de los núcleos auxéticos diseñados se muestra en la Figura 82 mientras que el tipo de estructura, así como su masa y densidad se muestran en la Tabla 10. Las tres estructuras RSH [Ingrole2017], ASH [WangH2019] y RH [Quan2020] se basan en geometrías validadas en la bibliografía.

Las dimensiones de las probetas son 30 mm x 30 mm x 30 mm de altura, anchura y profundidad, y están compuestas por unidades celulares en configuraciones de tres filas por tres columnas (3 x 3). El espesor de las paredes de la unidad celular es de 0,8mm, el cual no permite introducir fibra.

Tabla 10. Tipología de estructura auxética, número de repeticiones de celda, masa y densidad.

Tipología	Número (Filas y Columnas)	Masa (g)	Densidad (g/cm ³)
RSH	3x3	10,7	0,35
ASH	3x3	10,7	0,37
RH	3x3	9,1	0,30

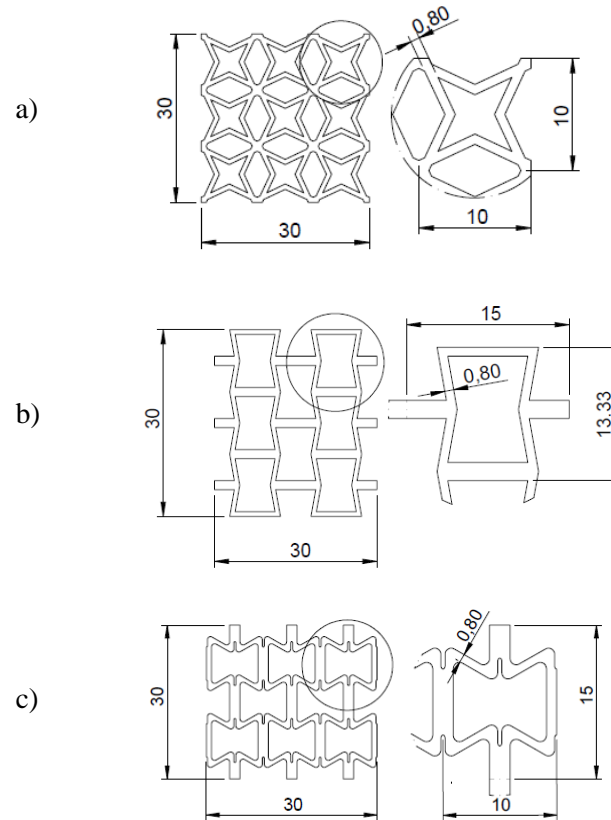


Figura 82. Geometrías de núcleos auxéticos: a) RSH [Ingrole2017], b) ASH [WangH2019], y c) RH [Quan2020].

- Descripción de los perfiles relleno

La sección transversal de los perfiles rellenos con núcleos RSH se muestran en la Figura 83a. A fin de introducir un número de celdas representativo, se ha aumentado las dimensiones del perfil, como se puede ver en Figura 83b. Las dimensiones de la celda unitaria RSH se muestra en la Figura 83c y se corresponde con las dimensiones empleadas para el diseño de núcleo (Figura 82).

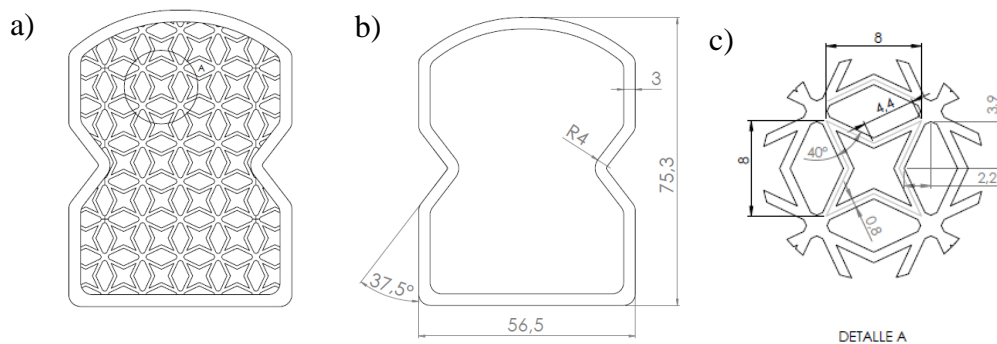


Figura 83. a) Perfil hueco [Belingardi2013] y b) perfil relleno con núcleo RSH [Ingrole2017].

Se ha empleado un patrón de impresión de fibra concéntrico para la fabricación de los perfiles relleno (Figura 84). La configuración de probetas: material de refuerzo del perfil, tipo de estructura auxética y masa de las probetas impresas se recogen en la Tabla 11.

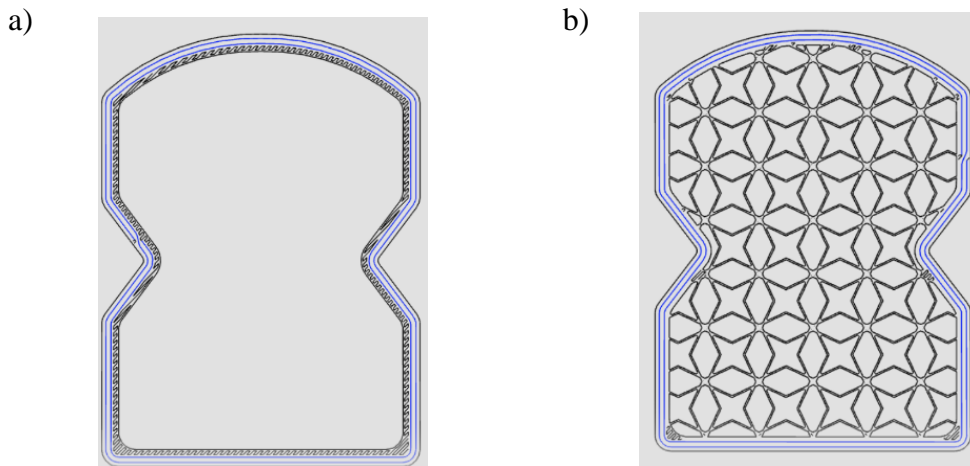


Figura 84. Configuración probetas de impresión. a) Perfil hueco y d) perfil relleno con RSH.

Tabla 11. Material de refuerzo del perfil, tipología de estructura auxética y masa.

Material	Estructura Auxética	Masa (g)	Vol. Fibra (%)
cCF/PA	RSH	99	8,1
cGF/PA		98	
cKF/PA		87	
cCF/PA	-	53	13,7
cGF/PA		53	
cKF/PA		49	

La identificación de las probetas es la siguiente: la primera letra se refiere al material de refuerzo del perfil (K para Kevlar[®], G para vidrio, y C para Carbono), la segunda se corresponde con el caso de carga (S para estático y D para impacto) y la tercera identifica el tipo de núcleo (D para RSH, S para ASH, - para perfil huecos). Por ejemplo, la probeta KDD se corresponde a un perfil Fold reforzado con fibras de aramida, sollicitación dinámica y núcleo auxético tipo RSH.

4.4. CARACTERIZACIÓN DE LOS PERFILES Y NÚCLEOS

4.4.1. Caracterización microestructural

4.4.1.1. Microscopia óptica

La caracterización microestructural, distribución de fibras y poros se ha realizado mediante técnicas de microscopia óptica (Olympus - GX51). Las probetas han sido preparadas utilizando el siguiente procedimiento: corte perpendicular (vista trasversal) o corte paralelo al eje X (vista longitudinal), lijado con papel de SiC de grano 600 y posterior pulido utilizando un paño de pulido con una suspensión de diamante monocristalino (1 μm). La superficie de rotura ha sido analizada mediante microscopia óptica (Leica DMS 1000), también los defectos y desalineaciones de la fibra. El empleo de uno u otro depende de la necesidad de aumentos. A fin de facilitar los trabajos de preparación de las probetas, se ha parado el proceso de impresión de los perfiles concéntricos, en vez de cortar y pulir.

4.4.2. Caracterización mecánica

4.4.2.1. Compresión cuasi-estática

Los ensayos de compresión cuasi-estática se han llevado a cabo a una velocidad de compresión de 10 mm/min, temperatura ambiente y 55% RH. Dado que el material de impresión (Onyx[®]) es higroscópico, todas las probetas han sido acondicionadas durante 48 horas en las condiciones de ensayo [Chabaud2019].

El equipamiento utilizado ha sido una máquina universal de ensayos Hoyton/HM-D, equipada con una célula de carga de 100 kN. Con el objetivo de asegurar la repetitividad del ensayo, se ensayaron 3 probetas de cada configuración.

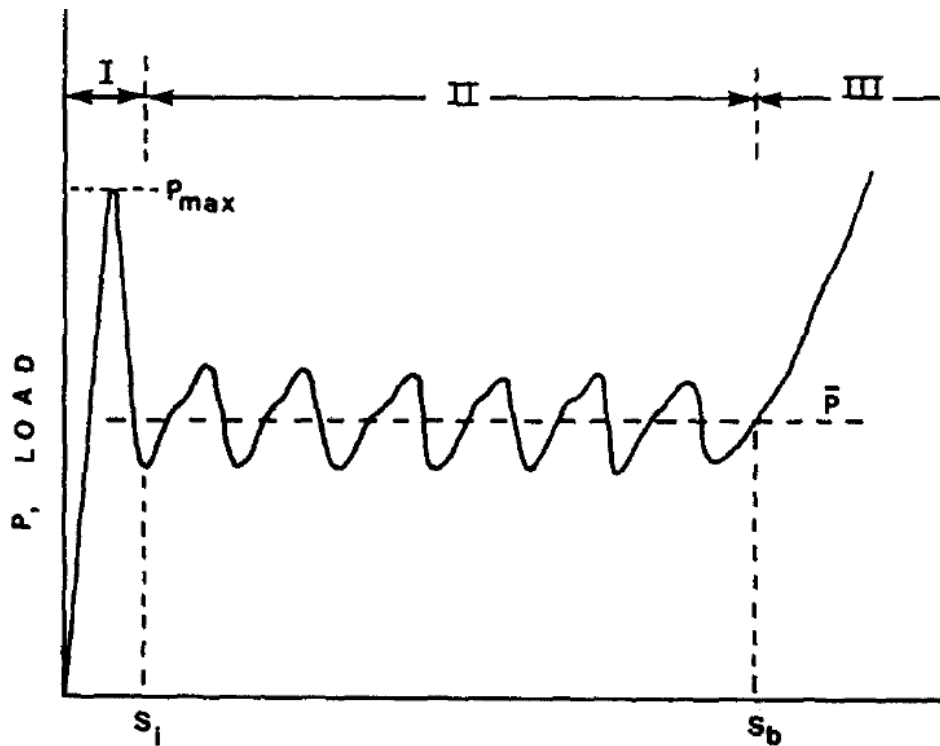


Figura 85. Curva carga-desplazamiento típica de un colapso progresivo. I) inicio del colapso, II) colapso progresivo y III) densificación [Hull1991].

- Propiedades mecánicas

De la curva fuerza-desplazamiento (Figura 85), se pueden calcular las siguientes propiedades de absorción de energía: la fuerza pico, P_{max} (kN); la fuerza media P_{mean} (kN), que se puede obtener mediante la ecuación 4.1. donde l_{max} (mm) es la longitud total colapsada.

$$P_{mean} = \frac{\int_0^{l_{max}} P(l) \cdot dl}{l_{max}} \quad (\text{Ec. 4.1})$$

La energía absorbida por la muestra, A_e (kJ), que es el área bajo la curva de carga-desplazamiento, se calcula con la ecuación 4.2.

$$A_e = \int_0^{l_{max}} P(l) \cdot dl \quad (\text{Ec. 4.2})$$

La energía de absorción específica, SEA (kJ/kg), que es la energía absorbida por unidad de masa colapsada, m_t (kg), se obtiene con la ecuación 4.3.

$$SEA = \frac{\int_0^{l_{max}} P(l) \cdot dl}{m_t} \quad (\text{Ec. 4.3})$$

La eficiencia de la carga de colapso, *CFE* (%), se define como la relación entre la fuerza media y la fuerza pico (ecuación 4.4), da una relación de la uniformidad de la curva de colapso.

$$CFE = \frac{P_{mean}}{P_{max}} \quad (\text{Ec. 4.4})$$

La eficiencia de la longitud de colapso, *SE* (%), es la relación entre la longitud de colapso y la altura del perfil (ecuación 4.5) en la dirección de la carga.

$$SE = \frac{l_{max}}{H} \quad (\text{Ec. 4.5})$$

4.4.2.2. Compresión dinámica

Las propiedades de absorción de energía en condiciones dinámicas se han obtenido a partir de ensayos de caída de dardo instrumentado. Para ello, se ha registrado la curva carga-tiempo mediante la célula de carga acoplada al impactor. A partir de la cual, se han integrado las curvas de energía y desplazamiento.

La caracterización dinámica se ha llevado a cabo mediante dos máquinas de ensayo: Fractovis plus y Dynatup 8120 ya que la primera tiene un límite de 200 J y 20 kN, y la segunda es capaz de alcanzar hasta 6250 J y 220 kN. Se ha empleado un impactor de punta plana en ambos casos, de diámetro 40 y 105 mm para los impactos de baja energía y alta energía, respectivamente. La repetitividad del ensayo se ha contemplado realizando 3 ensayos por cada tipo de configuración. Los rangos de masa, altura de caída y energía de impacto, se muestra en Tabla 12.

Tabla 12. Masa, velocidad y energía en el impacto.

Tipo Impacto	Masa (kg)	Altura (m)	Energía (J)
Baja energía	1-10	0,5-1	10-100
Alta energía	80-160	0,5-1	800-1600

A fin de capturar el colapso de las probetas impactadas (Dynatup 8120) se ha empleado una cámara de alta velocidad (Photron Fastcam APX-RS250K) a 5000 fotogramas por segundo (Figura 86).

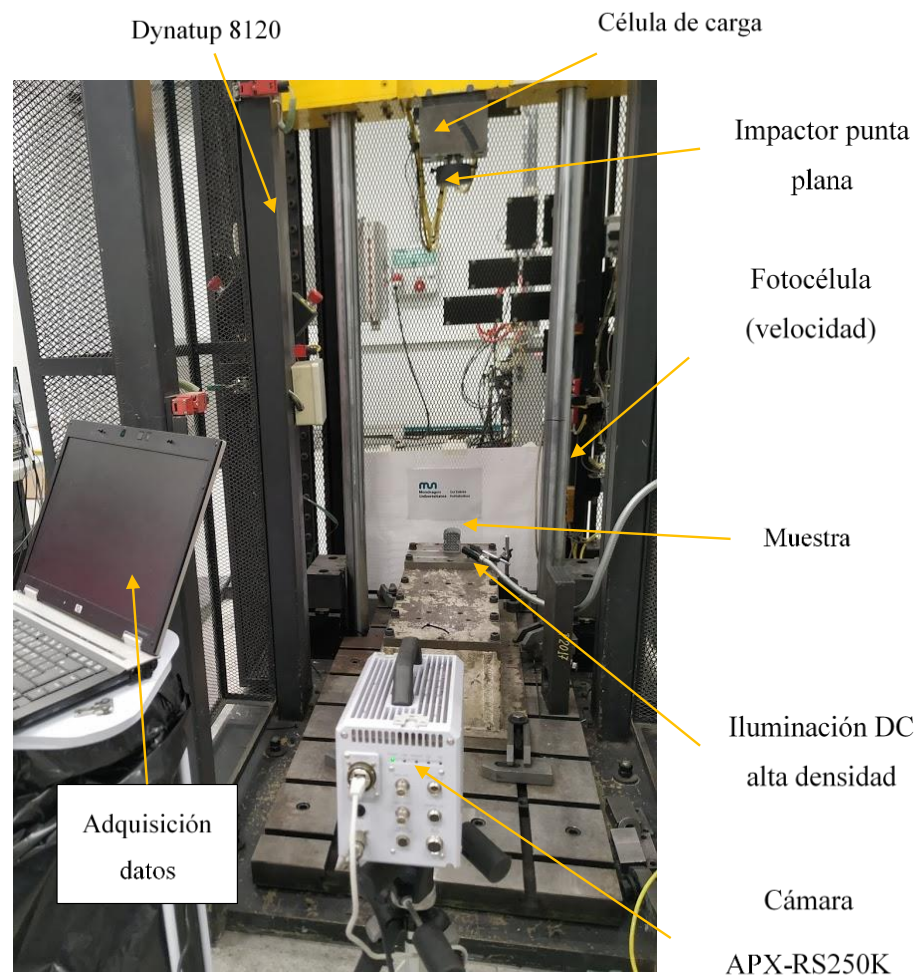


Figura 86. Equipamiento y montaje para el ensayo de impacto de alta energía.

4.5. IMPRESIÓN 3D SOBRE PANELES DE ORGANOSHEET

4.5.1. Proceso de sobreimpresión 3D

Las probetas sobreimpresas se han fabricado mediante una impresora Mark Two® con la mesa calefactada. Entre los parámetros de proceso de impresión alguno ya viene predefinidos, como por ejemplo la temperatura de la boquilla extrusión (T_0), la cual está fijada en 275 °C por el propio fabricante. La presión de compactación tampoco es un parámetro de proceso programable directamente, ya que está relacionada con el espacio entre la base y la boquilla de la impresora. Manteniendo el gap entre la base y *el organo-sheet* igual para todas las probetas, se establece la misma presión para todas las impresiones. Por ello, el único parámetro que se ha podido analizar es la temperatura del sustrato (T_s), controlada por un PID conectado a la base calefactada eléctricamente (Figura 87).

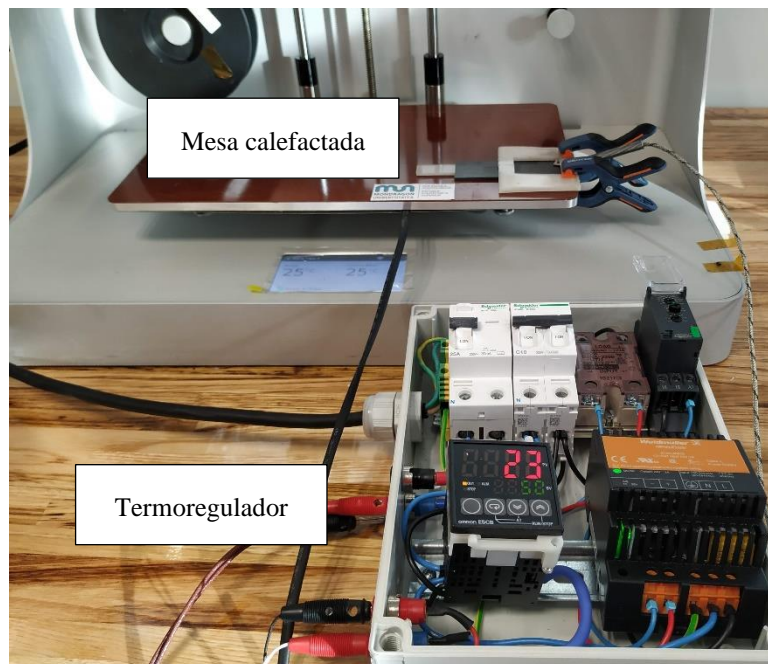


Figura 87. Setup del proceso de sobreimpresión 3D.

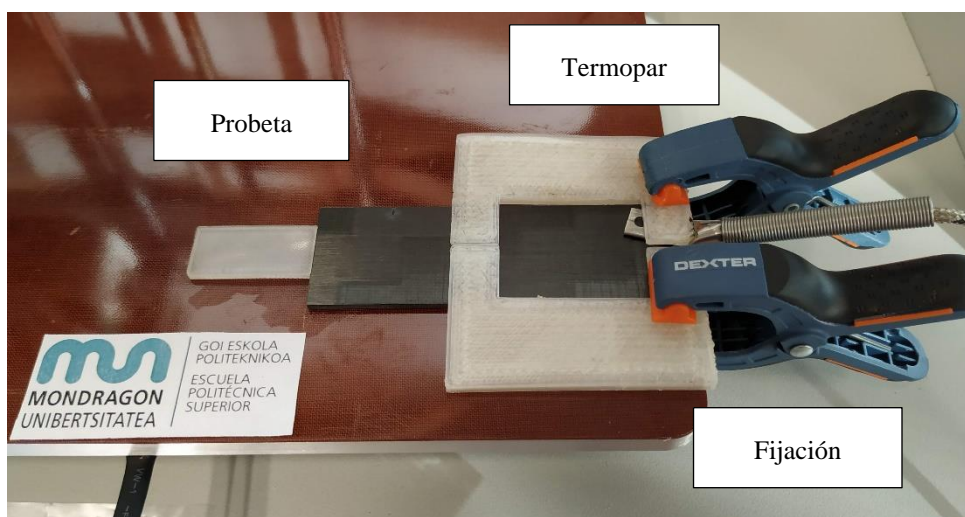
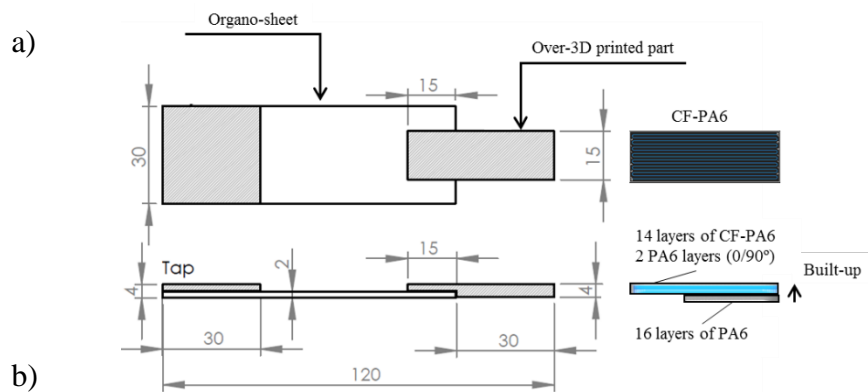
Se han seleccionado cuatro temperaturas diferentes para T_s (temperatura ambiente, 40, 50 y 60 °C). La temperatura de la intercara (T_i) entre el *organo-sheet* y el material impreso en 3D se considera el valor medio de T_0 y T_s , tal y como establecen en trabajos de bibliografía [Aurrekoetxea2006]. La Tabla 13 muestra los valores resultantes de T_i .

Tabla 13. Temperatura de la intercara (T_i) y del sustrato (T_s).

T_s (°C)	20	40	60	80
T_i (°C)	147,5	157,5	167,5	177,5

4.5.2. Diseño de probetas

Las probetas sobreimpresas están compuestas por un sustrato de *organo-sheet* de 2 mm x 30 mm x 90 mm y una geometría rectangular imprimida de 4 mm x 15 mm x 45 mm. En la Figura 88a se muestran todas las dimensiones de las probetas fabricadas, donde se observa que el área de solapamiento entre los dos materiales es de 15 mm x 15 mm. Para evitar cizalladuras durante la impresión, se ha procedido a amarrar el sustrato tal y como se observa en la Figura 88b.

**Figura 88.** Geometría de las probetas sobreimpresas.

4.5.3. Materiales

El material empleado como relleno es una poliamida 6 estándar (Nylon), suministrada por Markforged®. El material composite reforzado con fibra continua empleado es cCF/PA. Y el sustrato seleccionado para ser sobreimpreso es un *organo-sheet* con matriz de poliamida 12 (PA12) y tejido en carbono *twill weave* como refuerzo. El contenido en fibra aproximado es 50%. El criterio de selección de sustrato PA12 se debe a que su temperatura de fusión es menor que la temperatura de la PA6.

4.5.3.1. Calorimetría (DSC)

Se ha aplicado la técnica de calorimetría diferencial de barrido (DSC) con un equipo Mettler Toledo DSC 1 en atmósfera de nitrógeno. De acuerdo con la norma ASTM D-3417-97, las probetas analizadas pesaban entre 5,5 y 6 mg. Las probetas de DSC se han calentado desde 50 a 250 °C a una velocidad de calentamiento constante de 10 °C/min, con el objetivo de determinar el comportamiento de fusión del sustrato (rango de temperaturas de fusión y temperatura pico, T_m).

4.5.4. Proceso de fabricación

Las probetas de sobreimpresión se han fabricado capa a capa de acuerdo con los parámetros de la impresora que se muestra en la Tabla 14 y Tabla 15. La parte de las probetas imprimidas está compuesta por una secuencia de apilamiento de 32 capas: las primeras 16 capas de PA6 se colocan para llenar el espacio entre el *organosheet* y la base de la impresora (2 mm), las siguientes dos capas de PA6 definen una intercara de 0,25 mm y las últimas 14 capas de cCF/PA están destinadas a soportar la carga del ensayo. Por lo tanto, las fibras de carbono imprimidas se alinean con la dirección de carga (0°) y la trayectoria de extrusión de las capas de PA6 se realiza en la dirección 0/90°.

Tabla 14. Parámetros de extrusión para el proceso de sobreimpresión 3D.

Parámetros de extrusión		
Material	Nylon	cCF/PA
Altura de capa (mm)	0.125	
Diámetro nozzle (mm)	0.4	0.9
Temperatura (°C)	273	252
Velocidad impresión (mm/s)	15	

Tabla 15. Parámetros de relleno para las probetas de sobreimpresión 3D.

Parámetros de relleno	
Patrón relleno	Isotropic
Número de capa sólidas base/techo	100%
Número de anillos de contorno	1
Anillos concéntricos de fibra	0
Orienta. fibra/Pared refuerzo	0°

4.5.5. Caracterización mecánica

4.5.5.1. Ensayos cortadura

Los ensayos de cortadura cuasi-estáticos se han realizado con una máquina de ensayos universal Hoyton/HM-D equipada con una célula de carga de 100 kN. El desplazamiento total se ha registrado con el *encoder* del propio cabezal. La velocidad de ensayo ha sido de 1 mm/min y los ensayos se han llevado a cabo a temperatura ambiente y con una HR del 55%. La carga de cortadura máxima (F_s) se ha determinado a partir de las curvas fuerza-desplazamiento registradas.

4.6. SOBREMOLDEO MEDIANTE GMT DE PREFORMAS DE IMPRESIÓN 3D

4.6.1. Proceso de sobremoldeo de refuerzos impresos

La hibridación del proceso de impresión 3D y sobremoldeo mediante compresión GMT pretende incorporar refuerzos de fibra continua allí donde la fibra corta del GMT no llega. Se busca por ello un aumento de rigidez y resistencia localizado.

La Figura 89 presenta la pieza demostradora del proceso de sobremoldeo, la cual representa un panel de espesor delgado con corrugaciones y nervios.

En la Figura 90, se muestran las pruebas de llenado del molde mediante compresión de GMT, como punto de partida para este estudio. A partir de las imágenes del microscópico, se ha observado que la distribución de la fibra varía en función de la altura (eje Z) y que, debido a la conicidad del nervio, la fibra no llega hasta la punta superior del molde. Por ello, se ha planteado imprimir material 3D de refuerzo, cortar muestras y colocarlas en las nervaduras del panel corrugado.

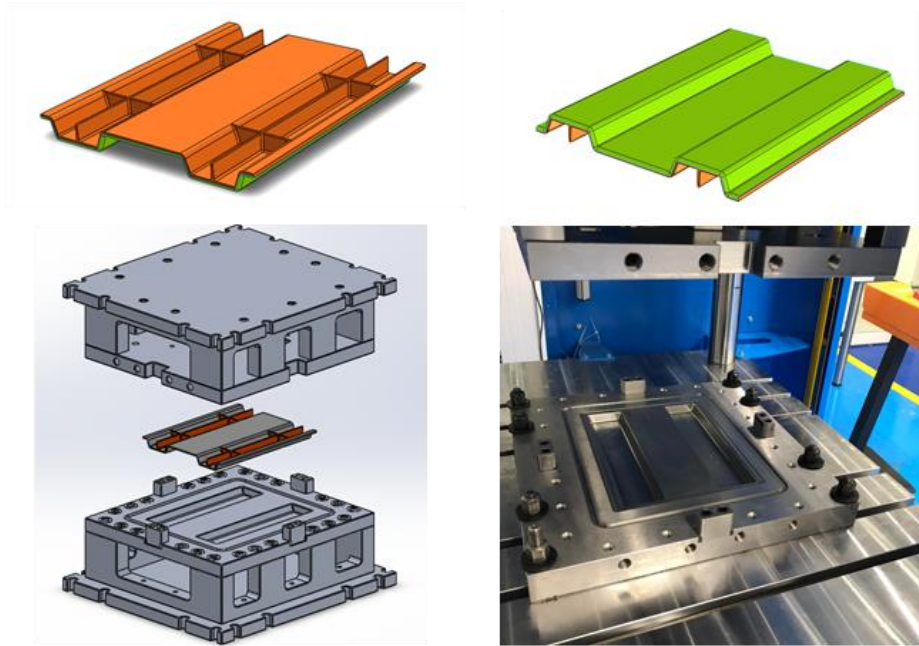


Figura 89. Geometría del molde y componente para la integración de refuerzo de impresión 3D – cFF por sobremoldeo de GMT.

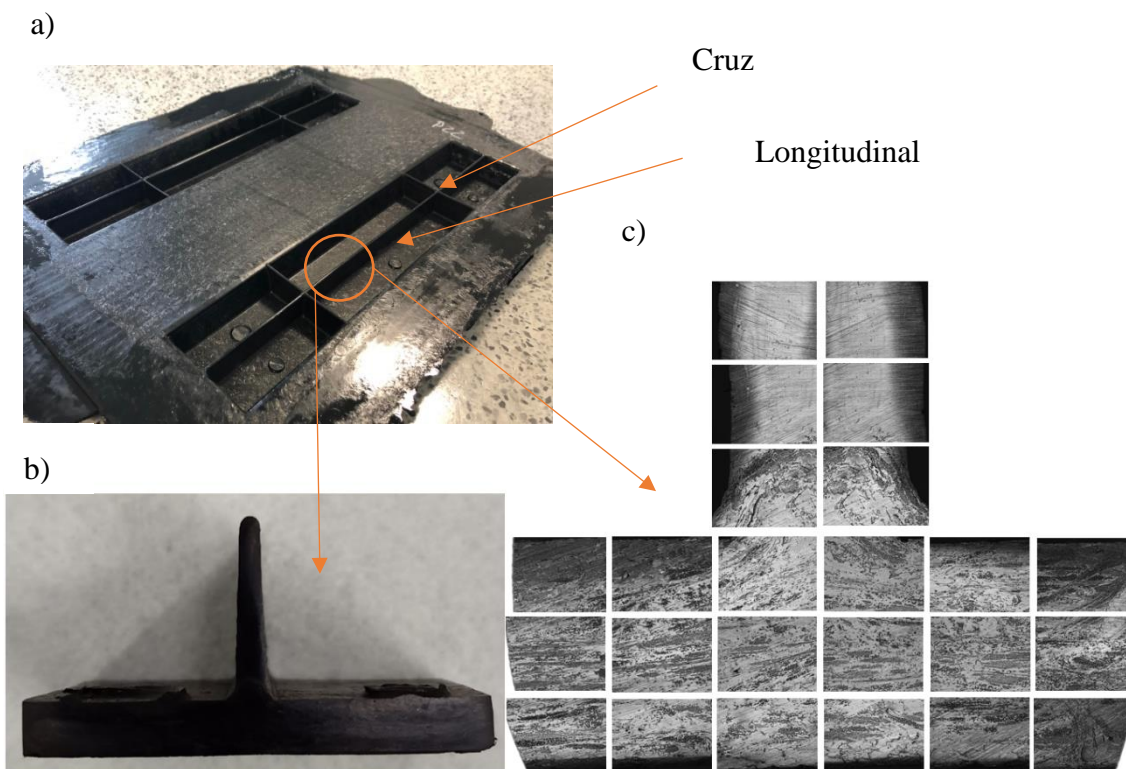


Figura 90. a) Probeta de llenado de molde mediante proceso compresión GMT. b) Muestra de material zona nervadura, zona Longitudinal. c) Imágenes microscopio contenido de la fibra en el nervio.

4.6.2. Diseño de probetas

En la Figura 91, se muestra el diseño de preforma impresa, a partir de la cual se han extraído los refuerzos parciales para incorporar/integrar en el proceso de sobremoldeo.

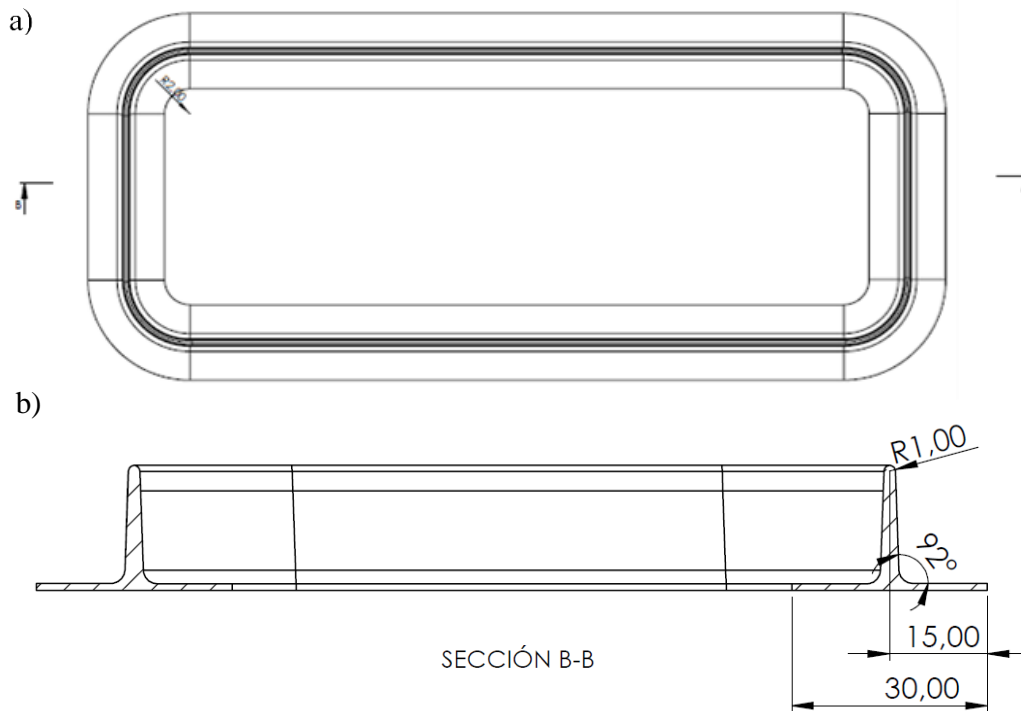


Figura 91. Diseño de preforma 3D para sobremoldeo; a) vista en planta y b) sección transversal.

4.6.3. Materiales

El material composite reforzado con fibra continua empleado es cCF/PA y se han empleado dos tipos de muestras, unas con matriz de relleno de Onyx[®] y otras de Nylon. En la Figura 92 se presenta una muestra del material impreso, así como el detalle de su sección transversal.

De acuerdo con la definición de capas establecido por Eiger[®], se observa la variación del contenido de fibra en dirección Z (vertical) en el refuerzo *as printed*.

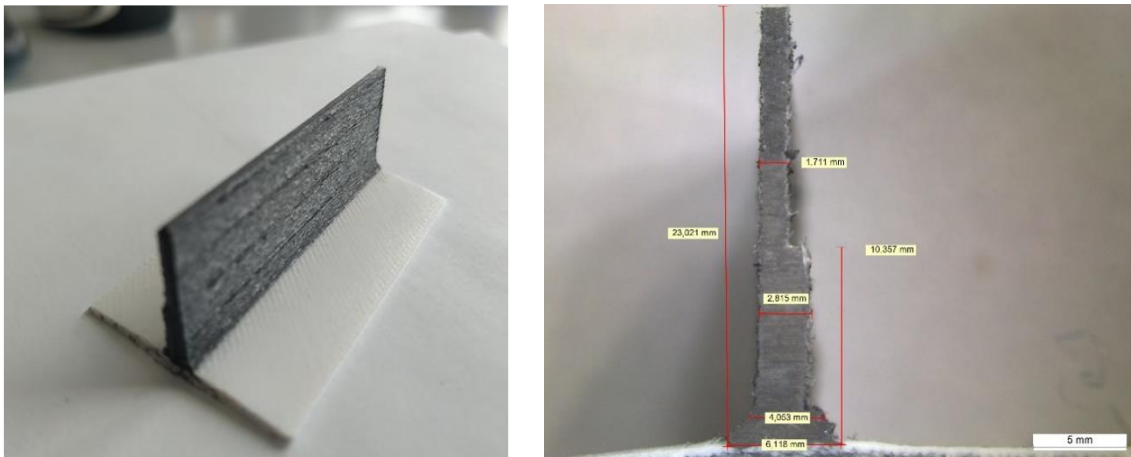
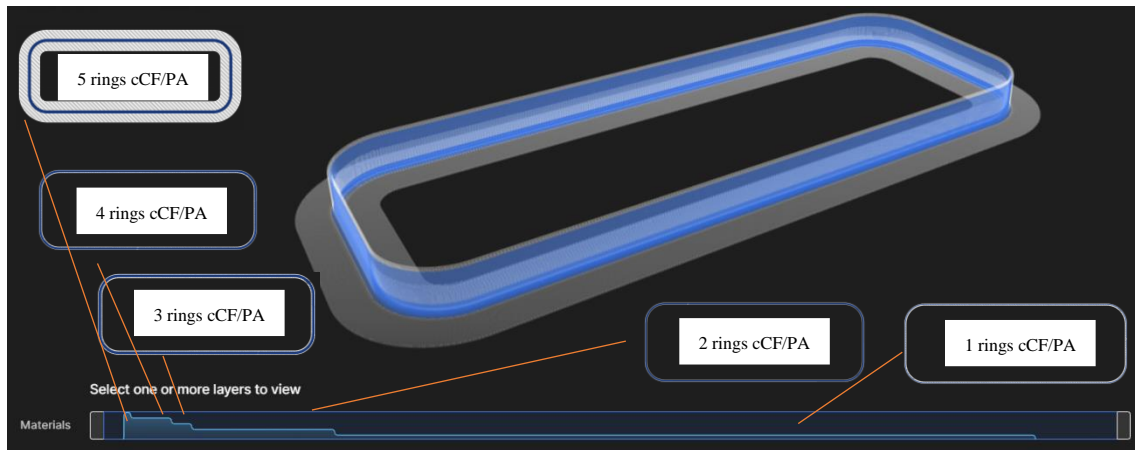


Figura 92. a) Configuración en Eiger® de la preforma para sobremoldeo. b) Vista general del refuerzo parcial y c) distribución de fibras en sección transversal.

Mediante un proceso de corte se han extraído perfiles en “T” de unos 50 mm de longitud. En la siguiente Tabla 16, se muestran las condiciones del proceso de sobremoldeo y la localización de las probetas de material de refuerzo impreso.

Tabla 16. Identificación de preformas 3D para pruebas de sobremoldeo GMT.

Muestra	Material relleno	Offset	Temperatura (°c)	
			Preforma	GMT
N_0.15_145_C	Nylon	0.15	145	
N_0.15_145_L				
N_0.15_170_L	Nylon	0.15	170	280
O_0.15_170_L	Onyx			
C_0.15_170_C	-	0.15	170	280
C_0.15_170_L				
N_0.00_170_C	Nylon	0		
O_0.00_170_C	Onyx			
C_0.00_170_C	-			

La denominación de las probetas se corresponde con el siguiente sistema de identificación: la primera letra se refiere al material (matriz de relleno) de la preforma 3D (N para Nylon, O para Onyx[®], C para probetas sin matriz de relleno), la segunda se corresponde con la holgura entre pieza impresa 3D y el molde (entre 0 y 0.15 mm), la tercera define la temperatura de la preforma (entre 145 y 170 °C) y finalmente se define la posición de la muestra con respecto de la geometría del nervio (C para Cruz y L para Longitudinal). Para todos los test de llenado, la temperatura GMT se ha mantenido constante a 280 °C.

4.6.4. Caracterización mecánica

4.6.4.1. Contenido en fibra (%) mediante pirólisis

Se ha determinado la variación del contenido en fibra en el nervio, a partir de las muestras de material extraído a diferentes alturas del nervio. El contenido en fibra se ha calculado a partir de un proceso de pirólisis (termo-descomposición en atmósfera de nitrógeno de la matriz poliamida).

4.6.4.2. Ensayos tracción sobre el nervio

Se han planteado unos ensayos de tracción cuasi-estática, aplicando una carga sobre el propio nervio [Akkerman2020]. Los ensayos se han realizado con una máquina de ensayos universal. La velocidad de ensayo ha sido de 1 mm/min y los ensayos se han llevado a cabo a temperatura ambiente y con una HR del 55%. La carga de adherencia máxima (F_b) se ha determinado a partir de las curvas fuerza-desplazamiento registradas.

4.7. ECONOMÍA CIRCULAR E IMPRESIÓN 3D PARA APLICACIONES A

IMPACTO

4.7.1. Proceso de reciclaje del material Onyx[®]

A continuación, se describe el proceso de reciclaje de material Onyx[®] llevado a cabo en las instalaciones de 3R3D Smart Materials. La colaboración se ha llevado a cabo bajo su programa Retorno y Reciclado de materiales de impresión 3D. En la Figura 93 se presenta el proceso de reciclado.

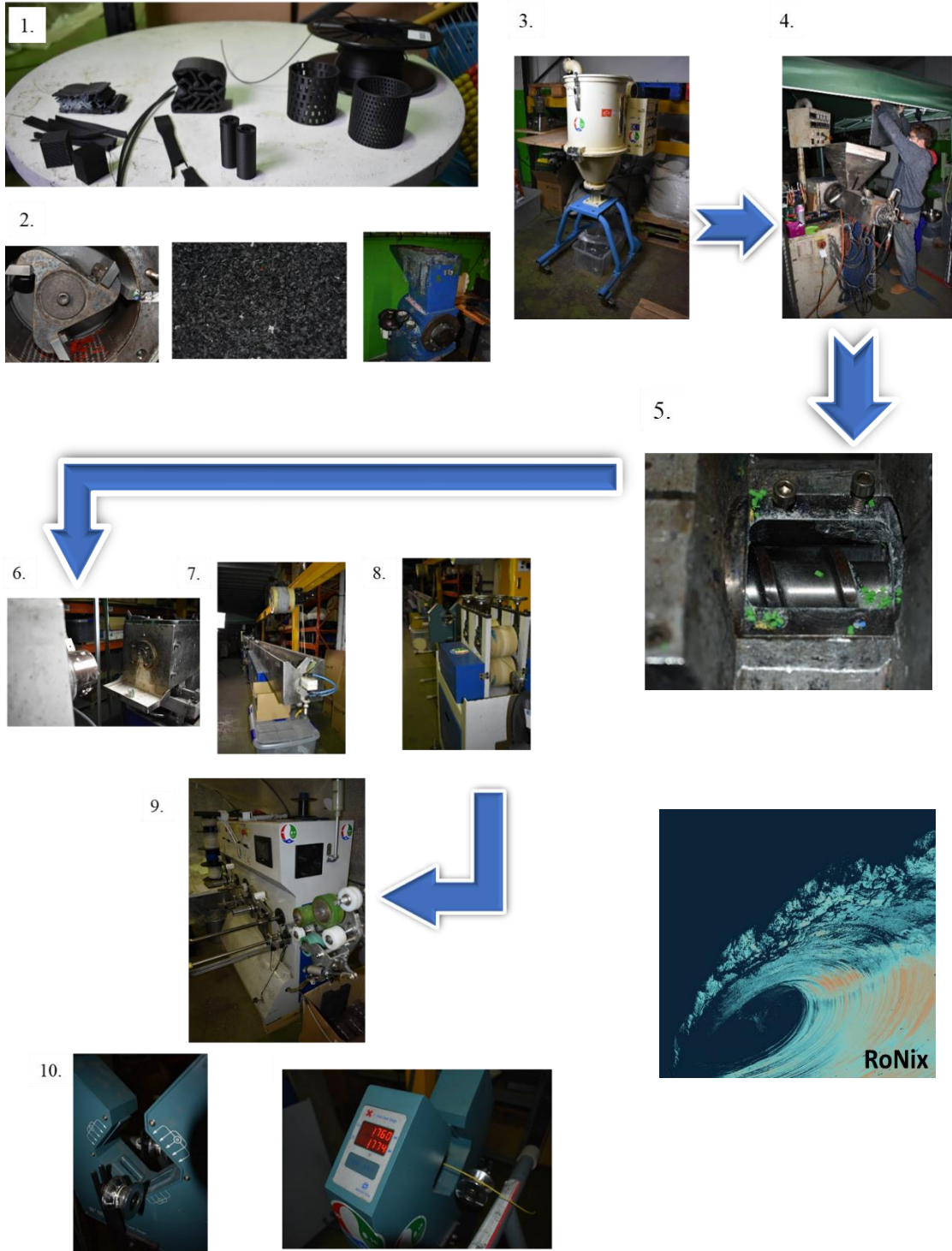


Figura 93 Proceso de reciclado: Programa retorno y reciclaje materiales 3R3D™.

De acuerdo con el diagrama de flujo el proceso de reciclado está compuesto por 10 pasos:

- Paso 1. Proceso de trillaje.
- Paso 2. Molienda mecánica de las piezas al tamaño del tamiz.
- Paso 3. Proceso de secado.
- Paso 4. Carga del pellet a través de la tolva hasta el tornillo de extrusión.
- Paso 5. Configuración del perfil de temperaturas extrusora.
- Paso 6. Proceso extrusión.
- Paso 7. Enfriamiento.
- Paso 8. Proceso de tiro.
- Paso 9. Bobinado.
- Paso 10. Control del dimensional diámetro del filamento.

Como resultado se obtiene un pellet y/o filamento de impresión denominado Ronix[®].

4.7.2. Caracterización mecánica

A partir del material reciclado, se han fabricado probetas de impacto de 60 mm de diámetro, 3 mm de espesor y 100% de relleno. El material reciclado puede venir en formato pellet, a partir del proceso de molienda y/o en forma de filamento si proviene de la extrusora. Se han empleado dos tipos de máquina para imprimir las probetas de material reciclado: una Raise Pro2 para la impresión en formato filamento y una NX PRO Pellets para la impresión en formato pellet. Los parámetros de impresión empleados se muestran en la Tabla 17 y Tabla 18.

Tabla 17. Parámetros de extrusión para el proceso material reciclado.

Parámetros de extrusión			
Material	Onyx [®]		Ronix [®]
Formato	Filamento	Filamento	Pellet
Altura de capa (mm)		0.2	
Diámetro nozzle (mm)	0.4	0.8	0.8
Temperatura (°C)	273	270	270
Velocidad impresión (mm/s)		15	

Tabla 18. Parámetros de relleno para el proceso material reciclado.

Parámetros de relleno	
Patrón relleno	Isotropic
Número de capa sólidas base/techo	100%
Número de anillos de contorno	1

Para la identificación de las probetas se ha utilizado el siguiente sistema. La primera letra representa los ciclos de molienda completados, la segunda letra se corresponde al formato del material de impresión reciclado (P para pellet y F para filamento) y la tercera los ciclos térmicos a los que ha sido sometido al pasar por la extrusora. Por ejemplo: el material reciclado 2P1 se corresponde con un material que ha sufrido dos ciclos de molienda y un único paso por la extrusora.

Se busca analizar el proceso de degradación de las propiedades a impacto del material de impresión Onyx® en función de los ciclos de reciclado que se han llevado a cabo. Para ello, se ha planteado un ensayo de caída de dardo y una energía de impacto de 12 J. En la Tabla 19, se muestran los pesos y el número de ciclos (térmicos y mecánicos) del material reciclado.

Tabla 19. Identificación de probetas de material reciclado, peso y número de ciclos mecánico y térmicos.

Muestra	Formato	Masa (g)	Muestra	Formato	Masa (g)
Virgen		10.0	Virgen		10.4
1		10.1	1		10.6
2	Filamento	10.1	2	Pellet	10.6
3		10.0	3		10.4
4		10.1	4		10.5
5		10.0	5		10.6

4.7.3. Demostrador

En las siguientes imágenes (Figura 94 y Figura 95) se presenta la geometría de la protección de eje ferroviario fabricada a partir de filamento reciclado.

- Economía circular (proceso de reciclado)
- Impresión 3D (pellet/filamento Ronix)
- Aplicación a impacto (protección de eje ferroviario).

La protección ferroviaria frente a impacto de balasto tiene unas dimensiones máximas de 200 mm de longitud, 120 mm de diámetro interior (acoplado al eje metálico) y 190 mm de diámetro exterior. El diseño de protección está compuesto por un casquillo y un núcleo auxético tipo RSH y presenta dos modelos o conceptos.

En la Figura 94 se presenta el concepto A: casquillo denso (7,5 mm espesor) y núcleo RSH y en la Figura 95 se presenta una alternativa o concepto B: casquillo con núcleo RH (10,5 mm espesor) y núcleo RSH. La masa de ambas protecciones es aproximadamente de 0,700 kg.

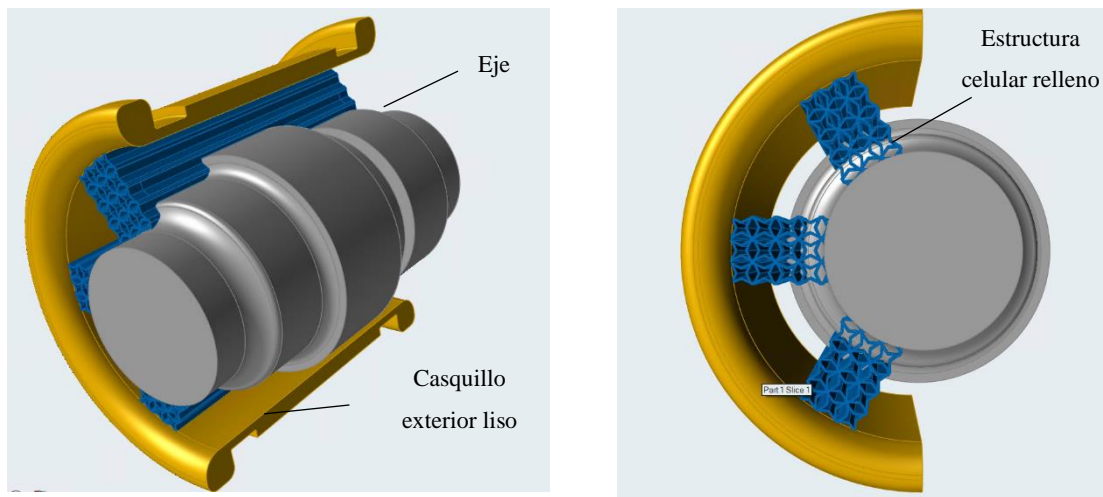


Figura 94. Concepto A de protección frente impacto de balasto.

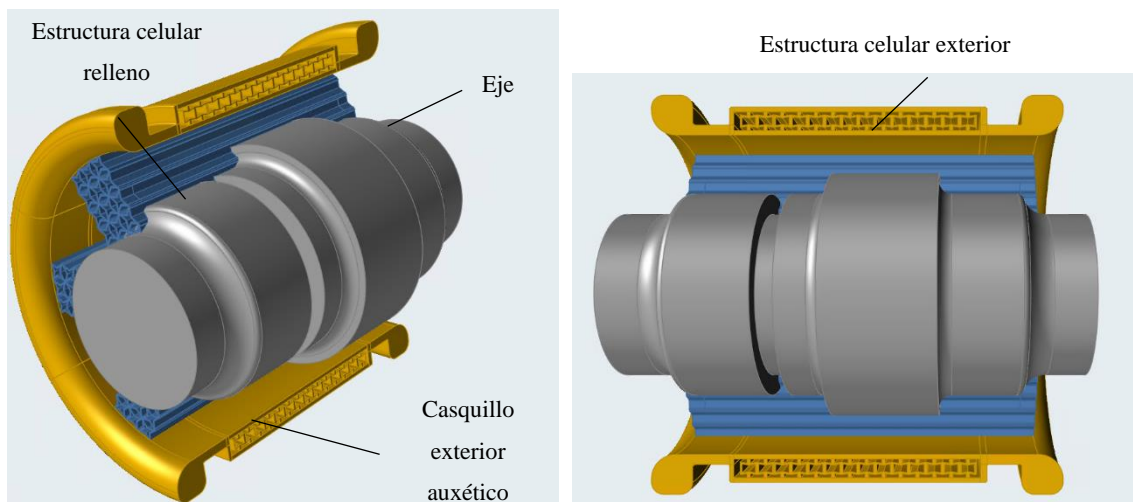


Figura 95. Concepto B de protección frente impacto de balasto.

A continuación, se muestra en la Figura 96 el aspecto de ambas protecciones impresas. Únicamente se ha impreso un sexto de la protección para ahorrar costes y tiempo de fabricación.

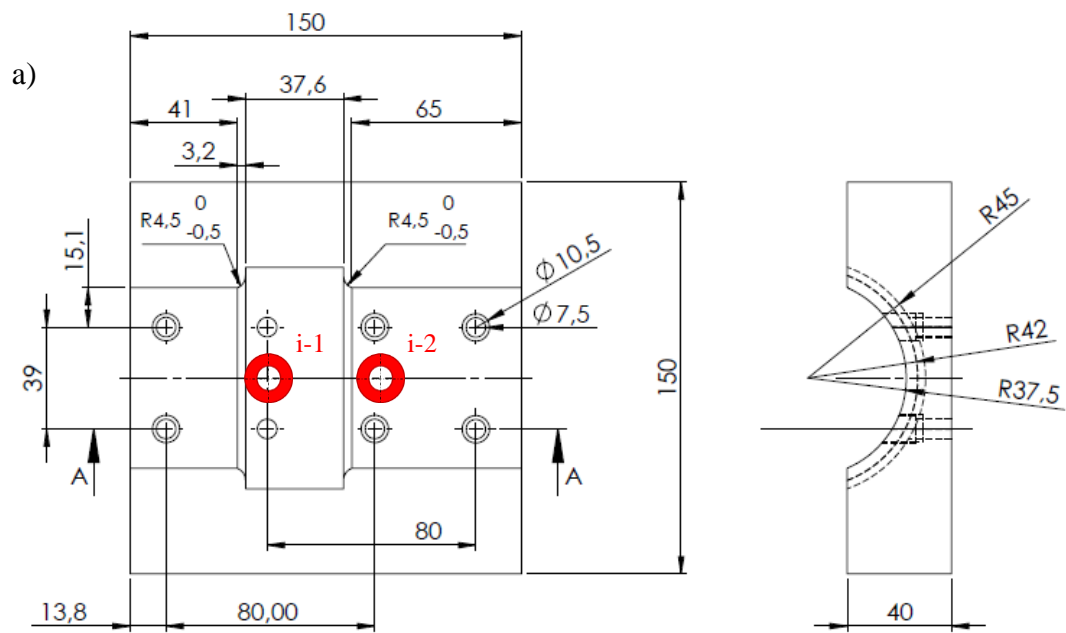


Figura 96. Aspecto de la protección ferrovía impresa.

A fin de analizar el comportamiento frente a impacto de ambos conceptos de protección, se han llevado a cabo ensayos de impacto (Fractovis Plus) con un nivel de energía de 100 J y un dardo de punta cónica de 120° (inspirado en la norma FFCC).

En la Figura 97, se presenta el utillaje de amarre del eje a la máquina de ensayo.

El utillaje y por ende el conjunto eje-protección se centra con respecto del eje de la máquina de impacto, a partir de 4 tornillos de amarre (entre eje de 80 mm). Al disponer de dos posiciones de montaje (Figura 97a), el utillaje permite impactar sobre dos zonas (i-1 e i-2) de la protección. Los puntos de impacto se han identificado en el plano del utillaje, en color rojo. En la Figura 97b, se muestra el *setup* del ensayo.



b)

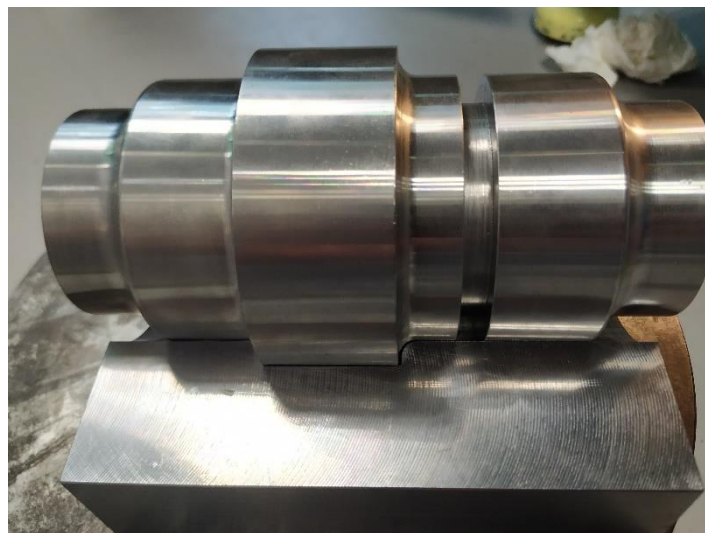


Figura 97. Utillaje de amarre del eje y *setup* del ensayo de impacto de la protección ferroviaria.

Capítulo 5

Influencia de la geometría del perfil sobre la absorción de energía

CAPÍTULO 5

Influencia de la geometría del perfil sobre la absorción de energía

A través de este capítulo se pretende abordar el siguiente objetivo operativo.

- Desarrollar un concepto de estructura tubular fabricada en composite de fibra continua mediante impresión 3D - FFF que mejoren las propiedades de absorción de energía. Para alcanzar dicho objetivo, se han planteado las siguientes tareas:
 - Seleccionar la geometría perfil tubular.
 - Identificar y analizar los defectos intrínsecos del proceso de cCF.
 - Caracterizar a *crush* los perfiles impresos y analizar la influencia:
 - dirección de la carga (axial/radial)
 - orientación de la fibra (unidireccional o longitudinal/concéntrica)

5.1. ANÁLISIS Y SELECCIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL PERFIL HUECO

5.1.1. Caracterización microestructural de los perfiles

5.1.1.1. Análisis microestructural

En esta sección se analiza el efecto de los parámetros de impresión sobre las microestructuras de los materiales compuestos. Varios autores han demostrado que la adhesión entre capas es el factor más importante en las propiedades mecánicas y el rendimiento de los materiales impresos [Kabir2020, Parandoush2017b].

De hecho, se ha demostrado que la diferencia en adherencia de las capas conduce a diferentes patrones de fractura, crecimiento de grietas y que, por lo tanto, puede afectar a la capacidad de absorción de energía de los materiales compuestos impresos [Blok2018].

En la impresora 3D Mark Two[®], los parámetros de impresión, como la altura de capa y la distancia entre los cordones, están predefinidos por Eiger[®]. Por lo tanto, no se tiene control sobre la adhesión de las capas ya que ni la temperatura ni la presión aplicada durante el proceso de extrusión son modificables.

La sección transversal y longitudinal de las probetas Longitudinales y Concéntricas se presentan en la Figura 98. La microestructura en la pared del contorno (Onyx[®]) se muestra en la Figura 98a y se observa una buena dispersión de las microfibras de carbono en la matriz PA. En la Figura 98b, no se aprecian signos de la intercara impresión, no obstante, si se pueden apreciar típicos poros entre cordones. Algunos autores han demostrado que la inclusión de fibra corta de carbono no sólo mejora las propiedades mecánicas de las probetas impresas, sino que también mejora la transferencia de calor entre las capas impresas, lo que resulta en una mejor adhesión [Goh2018, Blok2018].

En las Figura 98c-d, se muestra la sección transversal perpendicular a la trayectoria de impresión de los materiales compuestos cCF/PA. Como se puede en las probetas Longitudinales, la geometría resultante es una capa plana a pesar de que el filamento inicialmente es cilíndrico. Esto se debe a la aplicación de una presión durante el proceso de impresión y un solapamiento parcial entre los filamentos adyacentes. También se puede observar que la altura y la anchura de las diferentes capas son regulares.

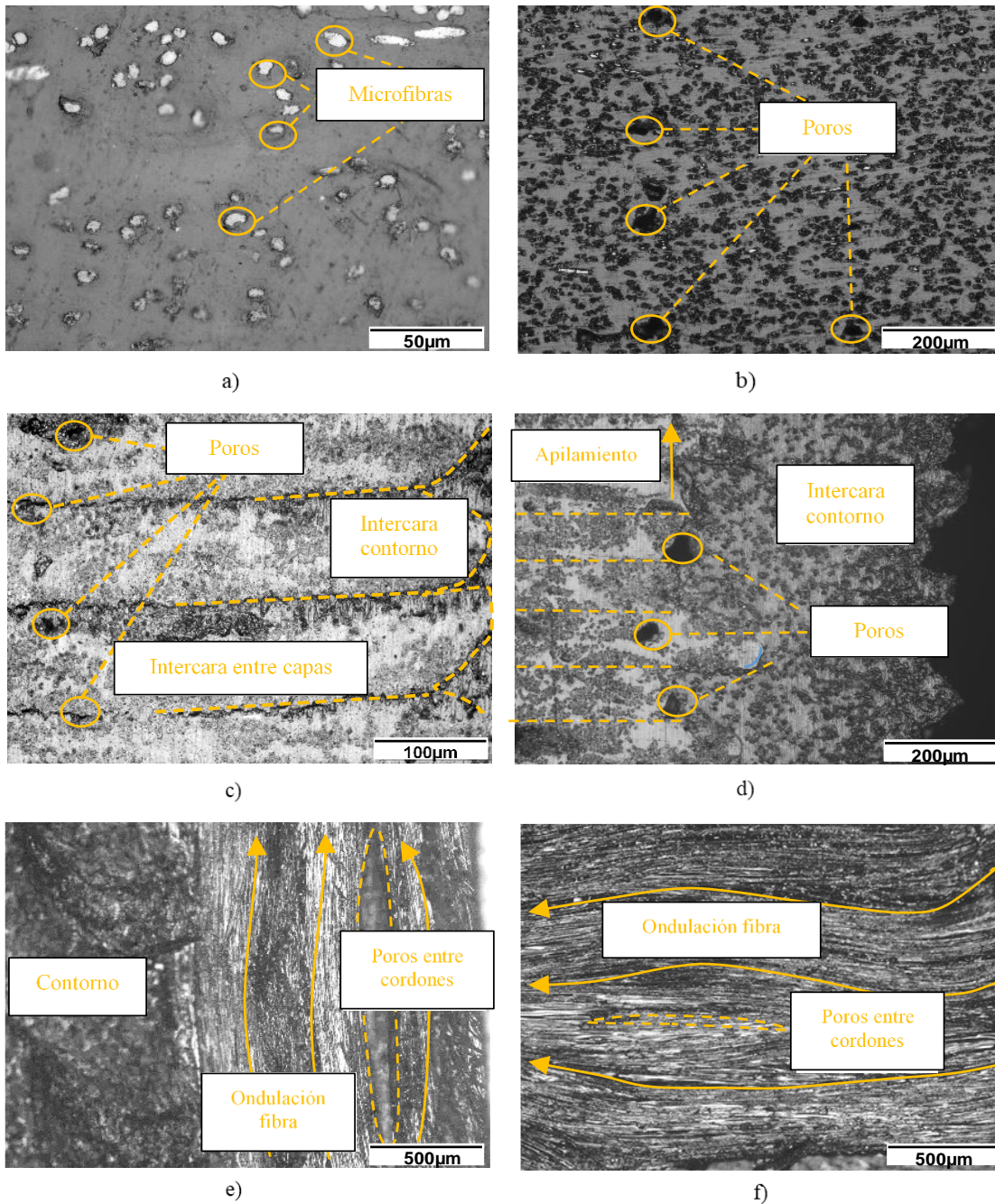


Figura 98. Calidad del proceso de impresión y aspecto de la intercara de los materiales impresos. Contorno Onyx®: a) Microfibras de carbono y b) porosidad entre cordones de impresión. Muestra Longitudinal: c) Altura de capa, aspecto de la intercara y porosidades. d) Apilamiento capa por capa y zona rica en resina. e) Ondulación de la fibra y poros entre cordones. Muestra Concéntrica: f) Ondulaciones de fibra para zonas trayectoria rectas.

Adicionalmente, se observa una buena unión entre la pared del contorno y los filamentos de fibra continua interiores, gracias al solapamiento de los filamentos de Onyx® y los filamentos pre-impregnados cCF/PA (Figura 98c). Sin embargo, se destacan zonas con distribución de fibras heterogéneas y/o zonas ricas en matriz cuyo origen tiene que ver con la microestructura inicial del filamento (Figura 99), tal y como publicaron Blok *et al.* [Blok2018] y Pascual-Gonzalez *et al.* [Pascual-Gonzalez2020].

En cuanto a la calidad de la unión entre capas, a diferencia del contorno de Onyx[®], la intercara de impresión es visible. Además, se observa también un mayor contenido de vacíos en la intercara. Estos defectos pueden estar relacionados con las bajas temperaturas y presiones durante todo el proceso de cicatrización en el proceso de cFF [Blok2018, Caminero2018].

Los poros entre capas no son totalmente esféricos, como puede verse en las secciones transversales (Figura 98c-d). Estos poros pueden llegar a ser hasta 10 veces más largos que la anchura del cordón impreso (1 mm), tal y como se observa en la vista longitudinal (Figura 98e), y como previamente observaron Goh *et al.* [Goh2018].

Los cordones impresos presentan ondulaciones, generando los mencionados poros, incluso cuando la trayectoria de impresión es recta [Caminero2018, Matsuzaki2018]. En las probetas Concéntricas, se encontraron las mismas características microestructurales o porosidades entre los anillos de fibras (Figura 98f).

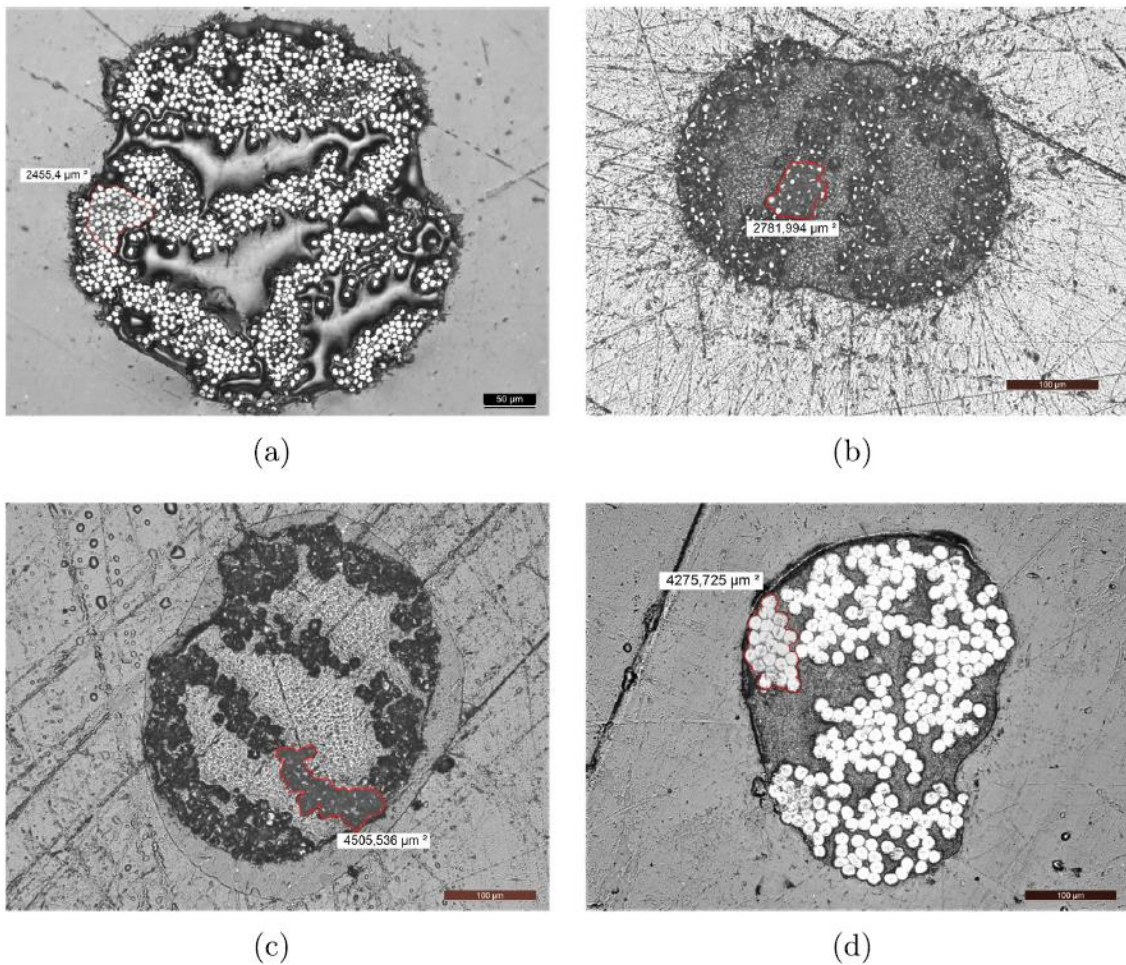


Figura 99. Sección transversal de los filamentos: a) cGF/PA, b) cGF/PA, c) cGF/PA (HSHT glass) y d) cKF/PA [Pascual-Gonzalez2020].

5.1.1.2. Análisis del proceso de impresión de fibra

En esta sección se analiza la influencia de la geometría del perfil y del patrón de impresión en los defectos de impresión y orientación de las fibras en puntos singulares como vértices, esquinas o radios de los perfiles. Estos puntos singulares son de especial interés ya que corresponden a zonas de concentración de tensiones de inicio de grietas [Belingardi2013], por lo que la presencia de defectos en estos lugares puede aumentar el riesgo de fallo prematuro de la estructura. De acuerdo con varios autores [Goh2018, Blok2018, Matsuzaki2018, Leary2019], se han analizado y clasificado defectos en la orientación de las fibras, obteniéndose un mapa de defectos para cada perfil de las probetas (Figura 100). Los defectos típicos de impresión se han enumerado de la siguiente manera:

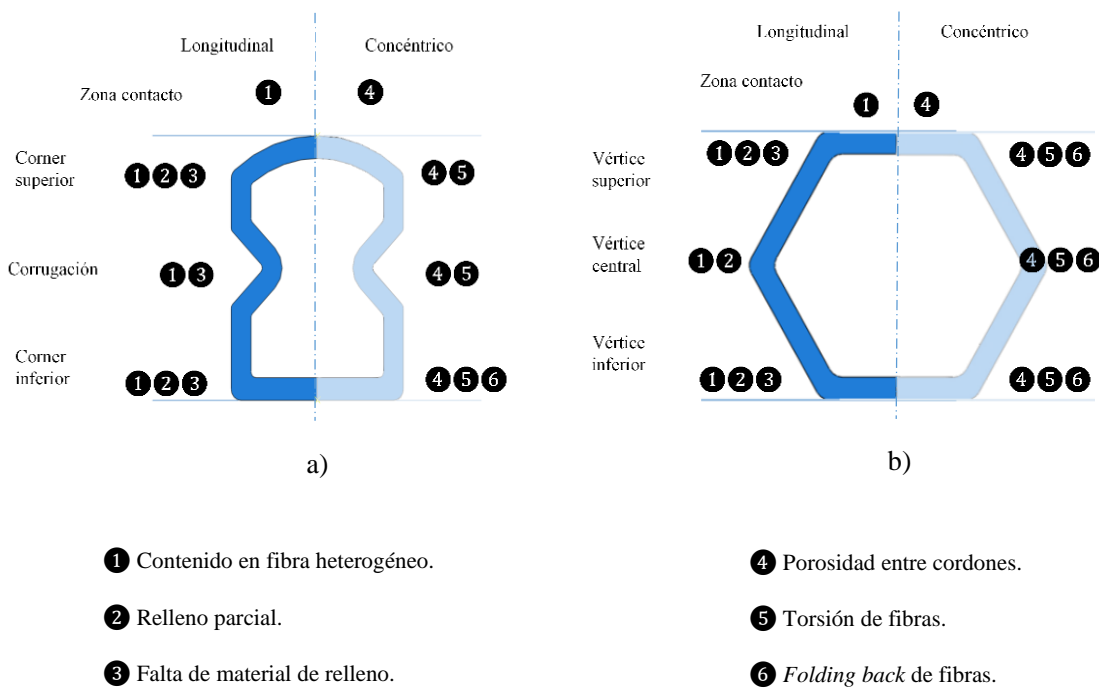


Figura 100. Defectos de impresión de la fibra y puntos geométricamente para las probetas Longitudinal y Concéntrica. Perfiles tipo a) Fold y b) Hexagonal.

Las Figura 101a-c muestran los defectos inherentes al proceso de impresión de las probetas con orientación Longitudinal de la fibra. En las regiones corrugadas, debido a la naturaleza del proceso de fabricación capa por capa y al hecho de que los cordones son aplanados, la estructura resultante tiene un aspecto escalonado. Como consecuencia, se genera un contenido de volumen de fibra no homogéneo a lo largo del perímetro de los perfiles longitudinales (Figura 101a). Este defecto es especialmente prominente en las zonas de transición estrechas, donde Eiger[®] tiene dificultades para introducir/imprimir

fibras e intenta rellenar parcialmente el hueco con Onyx[®]. Por consiguiente, la calidad de relleno y compactación en estas regiones no es suficiente, y por ello, esta falta de material está presente en ambos patrones de impresión (Figura 101b-c).

En las probetas impresas con patrones concéntricos (Figura 101d-f), es importante señalar que la impresión sigue una trayectoria en espiral que comienza en el contorno exterior y termina hacia el interior [Blok2018]. Este movimiento induce ondulaciones en las fibras [Matsuzaki2018], y genera vacíos/poros entre los filamentos de fibra, como puede observarse en la Figura 101d. Además, se han observado signos de torsión y *folding back* de las fibras en zonas de radio de giro reducido en los dos perfiles. La torsión de la fibra está relacionada con la restricción del giro de rotación del cabezal de extrusión durante una trayectoria curva, y además Matsuzaki *et al.* [Matsuzaki2018] han descubierto que existe un radio mínimo crítico para cada diámetro de mecha de fibras cCF/PA. Se han detectado ambos tipos de defectos (Figura 101e) para radios de 1 a 3 mm mientras que en radios superiores a 3 mm se observó únicamente la torsión de la fibra (Figura 101f).

El fenómeno de *folding back* puede causar la rotura de fibras en cordones de acuerdo con Shiratori *et al.* [Shiratori2020]. No obstante, no se han observado ninguna rotura de fibras cCF/PA (Figura 101f). Estos resultados coinciden con las observaciones de Zhang *et al.* [Zhang2021] para radios de giro pequeños (2,5 mm) y filamentos de cCF/PA.

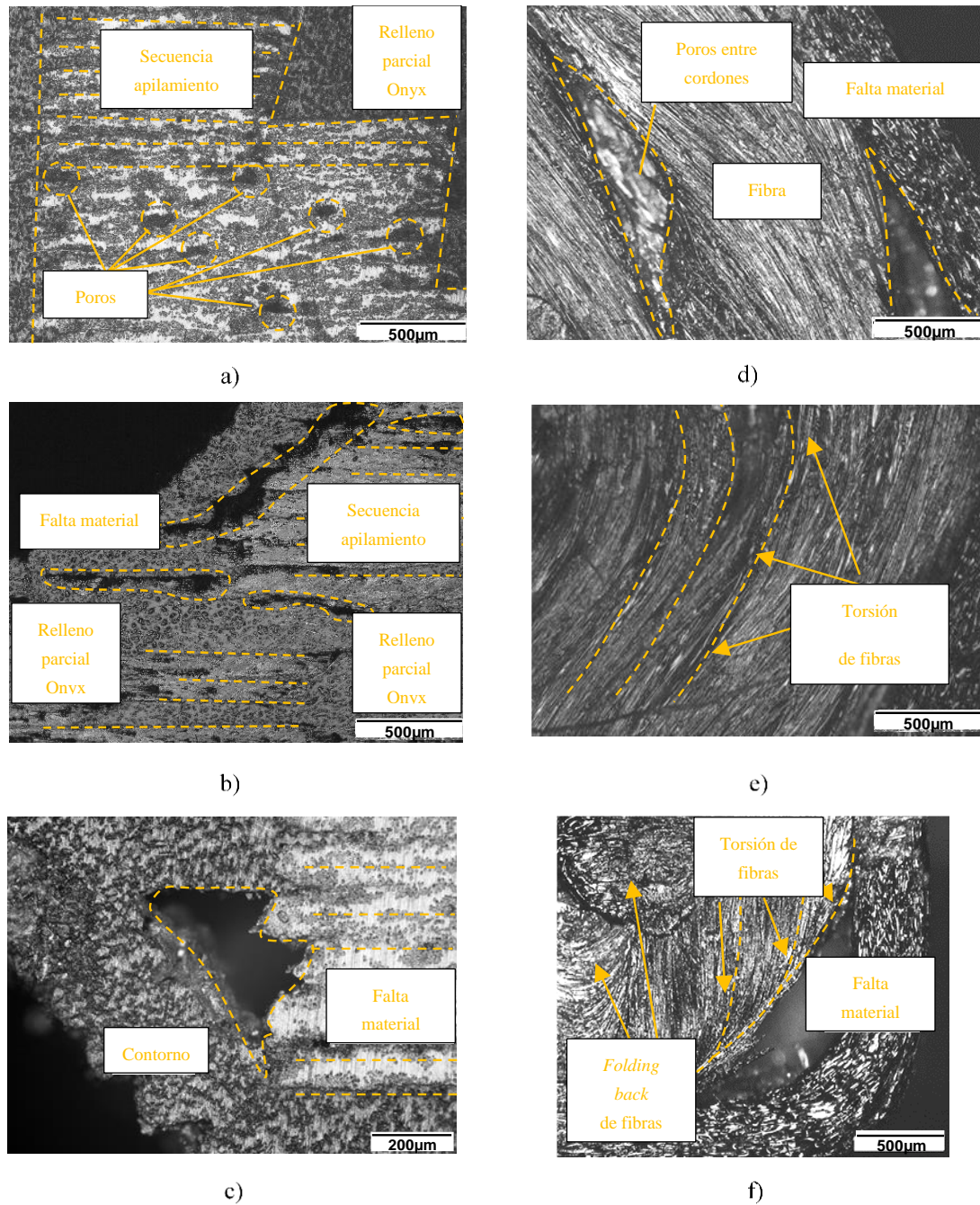


Figura 101. Defecto de impresión de fibra. Muestra Longitudinal: a) Contenido en volumen de fibra no homogéneo, b) relleno parcial con Onyx[®] y apilamiento de capas de fibra, and c) falta de material relleno. Muestra Concéntrica: d) poros entre cordones, e) torsión de fibras y f) *folding back* de fibras.

Para completar el estudio, se ha analizado la microestructura a nivel de macro-escala y se observado una desviación entre el espesor del perfil diseñado y el espesor fabricado. Aunque los perfiles se diseñaron con un espesor de pared constante de 3 mm, en el proceso de impresión 3D-cFF, el espesor viene determinado por la sección transversal de la pieza en planos paralelos a la mesa de impresión, y en consecuencia el espesor varía en las probetas longitudinales en función del ángulo en cada zona.

El segundo aspecto a tener en cuenta es que los cordones impresos tienen una forma aplanada y su anchura es mayor que su altura. Los cordones reforzados con fibra continua tienen una altura de 0,18 mm y una anchura de 1 mm [Goh2018], mientras que los cordones Onyx® tienen una altura de 0,125 mm y una anchura de 0,595 mm (Figura 102).

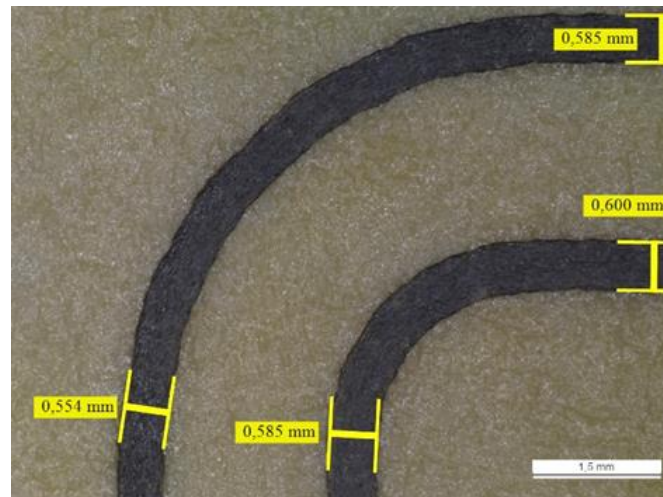


Figura 102. Anchura del cordón de Onyx® para una muestra mono-cordón.

Por ello, cuando el espesor de pared no es un múltiplo entero de la suma de la anchura de los cordones de Onyx® y de los cordones reforzadas con fibra, se produce una falta de material. Dado que Eiger® determina el número de cordones de Onyx® y de fibra reforzada que mejor rellena la sección en esa zona, se han encontrado diferentes espesores en el contorno del perfil y diferente contenido de fibra en cada capa (Figura 103a).

Las diferencias en el contenido de fibra son aún mayores cuando se imprimen paredes del mismo espesor en horizontal y en vertical. En las paredes horizontales, el espesor de la pared del contorno viene determinado por la altura del cordón de Onyx®, mientras que en las paredes verticales el espesor del contorno corresponde a la anchura de Onyx®. En consecuencia, en las paredes horizontales se encontró un mayor contenido de volumen de fibra (Figura 103b).

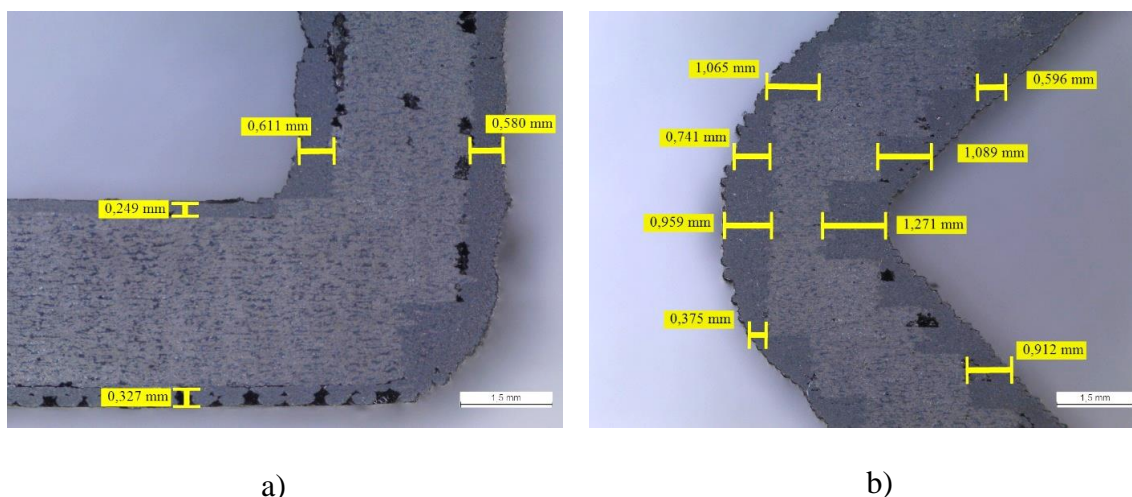


Figura 103. Espesor de pared en el contorno: a) zona del radio inferior y b) zona de la corrugación.

5.1.2. Caracterización mecánica de los perfiles

5.1.2.1. Carga axial

Los patrones de colapso axial de las dos geometrías y las dos orientaciones de fibras se muestran en la Figura 104. El comportamiento a *crush* de los perfiles de FRP durante una compresión axial se pueden clasificar como progresivo (estable) o catastrófico (inestable) [Hull1991]. El comportamiento general, así como el modo de colapso axial de ambas geometrías se pueden dividir en dos etapas: una primera etapa gobernada por la respuesta elástica del material y la geometría del perfil, mientras que la segunda etapa se rige por la plasticidad del material y la resistencia a la fractura. Las curvas de compresión de los perfiles impresos y sus modos de fallo presentan características similares; en la primera etapa presentan una zona elástica inicial (punto 1) hasta que se alcanza el primer pico de carga (punto 2), luego comienza el proceso de colapso y se produce un descenso en la carga (punto 3). El fallo catastrófico de los perfiles se caracteriza por un fallo repentino en este punto, mientras que los perfiles con un colapso progresivo continúan el proceso de colapso a carga constante (punto 4). Finalmente, la densificación de la muestra debida al plegado de la sección induce el aumento de la carga (punto 5). La Figura 104 muestra adicionalmente imágenes representativas de las probetas en cada una de las etapas del colapso. El patrón de colapso de cada muestra se describe en los párrafos siguientes.

El perfil FLA muestra un fallo catastrófico tras alcanzar la carga máxima (punto 2') mientras que la muestra FCA presenta un modo de colapso estable impulsado por un mecanismo de fallo pseudo-dúctil (punto 2) y progresivo. La fractura inicial de la FLA se localiza en la zona de contacto entre la placa y la probeta, implicando la fragmentación de las fibras en los vértices del perfil, seguido de la generación de una grieta. A continuación, la grieta crece rápida y longitudinalmente hasta que la probeta falla de forma frágil. Dado que la propagación de la grieta se produce en un plano paralelo a la intercara de impresión, el mecanismo de fractura que controla el colapso es un mecanismo de delaminación entre capas.

La probeta FCA presenta la mayor longitud de colapso con una amplia etapa plana o meseta (punto 4), seguida de un pico secundario de carga (punto 5), debido a la densificación durante el plegado de la sección. La presencia de fibras continuas orientadas concéntricamente influye directamente en la propagación longitudinal de la grieta y, por tanto, en la capacidad de absorción de energía del perfil impreso [Rouzegar2015, Mamalis2005, Esnaola2016].

El perfil HLA sufre un modo de colapso inestable similar al del FLA, y un comportamiento comparable en cuanto a capacidad de absorción de energía. Siguiendo una tendencia similar a la del FCA, la muestra HCA muestra un colapso estable con una larga etapa de carga constante (punto 4), seguida de un pico secundario de carga asociado a la densificación de la sección (punto 5). No obstante, la cantidad de energía absorbida por el HCA es ligeramente inferior a la alcanzada por FCA.

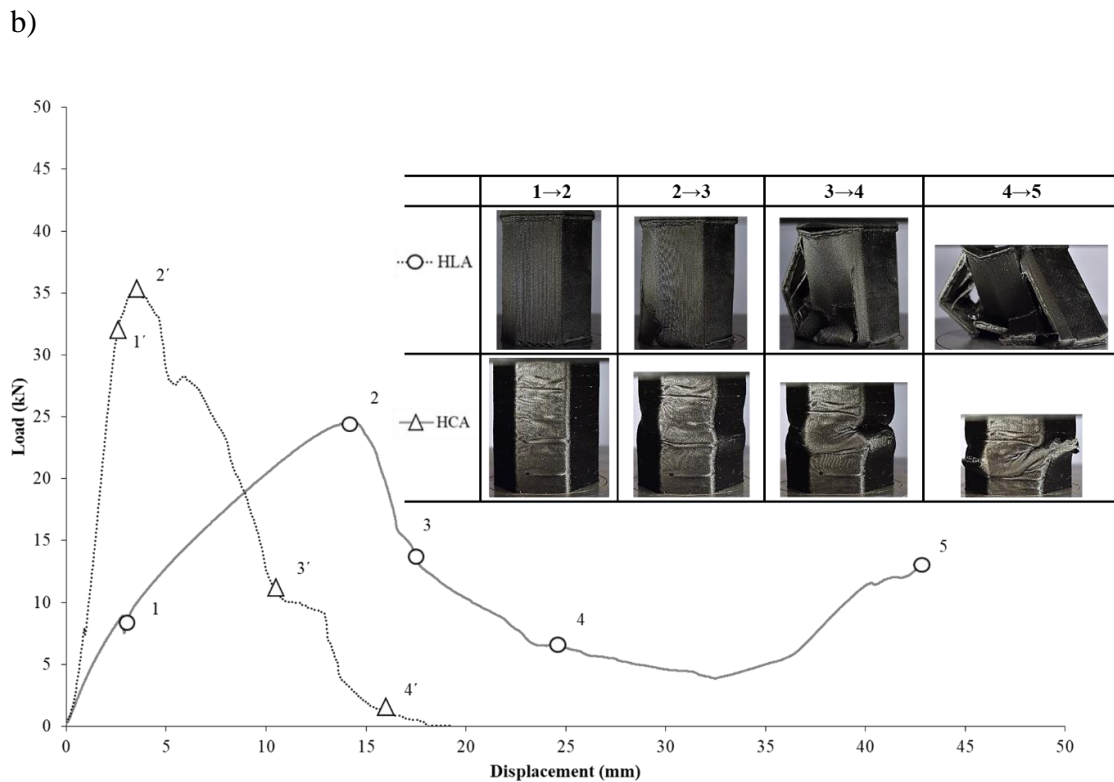
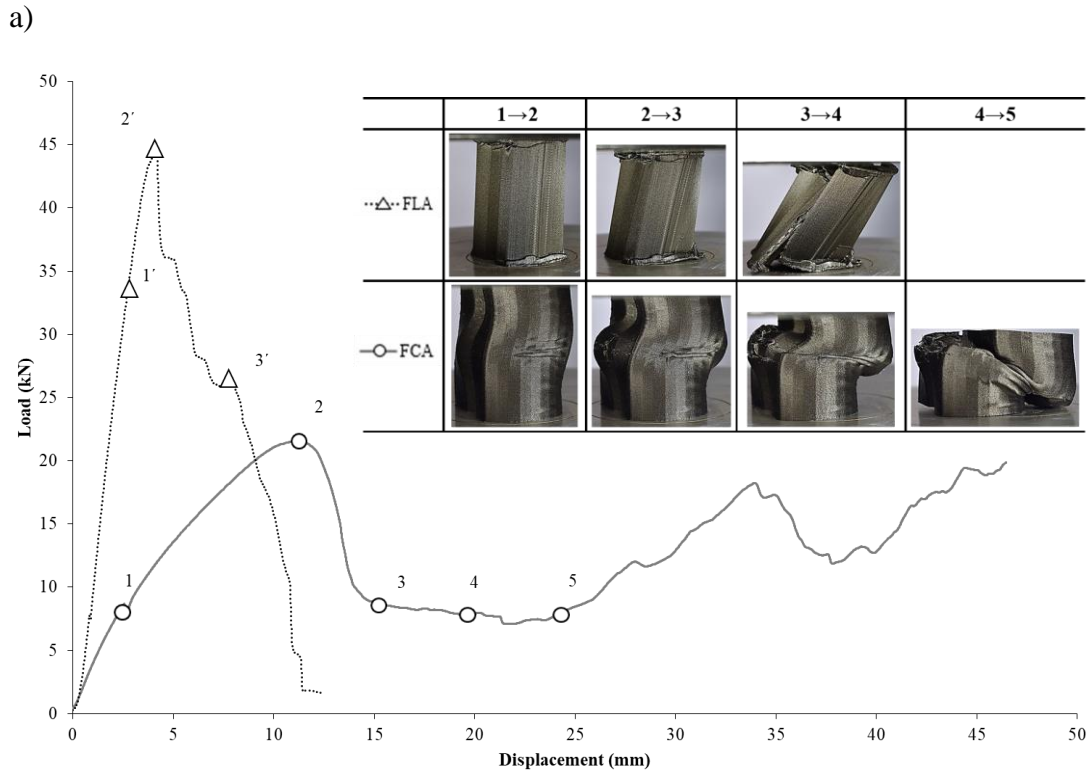


Figura 104. Curvas fuerza desplazamiento de los ensayos de compresión axial; a) Fold y b) Hexagonal.

Por un lado, de acuerdo con los valores de *SEA* expuestos en la Tabla 20, las probetas concéntricas muestran mejores niveles de absorción de energía debido a sus mayores longitudes de colapso. De hecho, el valor más alto de *SEA* alcanzado (30,1 kJ/kg) se corresponde a la muestra FCA, superior al valor máximo alcanzado por las probetas Longitudinales. Por otro lado, las probetas Concéntricas presentan valores de carga pico inferiores (22,2 kN para la FCA), lo que resulta favorable desde el punto de vista de una menor deceleración. Como conclusión, no se han encontrado variaciones en las curvas de colapso (Figura 104) a pesar del cambio de sección transversal de los perfiles, ya que el área transversal y la inercia (I_{yy}) de los perfiles (Tabla 9) son similares. Por tanto, se puede concluir que el patrón de *crush* axial depende más del material, es decir de la orientación de la fibra, que de la geometría de los perfiles.

Tabla 20. Resultados de compresión axial estática.

Ref.	P_{mean} (kN)	P_{max} (kN)	CFE (%)	SE (%)	m_i (g)	SEA (kJ/kg)	Modo fallo
FLA	21,4 ($\pm 0,5$)	48,5 ($\pm 3,8$)	44	22	26	11,8 ($\pm 0,8$)	Inestable
FCA	12,0 ($\pm 0,7$)	22,2 ($\pm 0,7$)	54	76	24	30,1 ($\pm 0,5$)	Estable
HLA	13,3 ($\pm 1,0$)	34,3 ($\pm 1,6$)	34	25	26	10,6 ($\pm 0,8$)	Inestable
HCA	12,2 ($\pm 1,5$)	25,5 ($\pm 1,0$)	48	73	24	28,4 ($\pm 1,0$)	Estable

5.1.2.1. Carga radial

En la Figura 105 se muestran los comportamientos de colapso radial de ambos perfiles huecos y las dos orientaciones de las fibras. Un patrón típico de colapso radial progresivo se divide en tres etapas; la primera etapa es gobernada por la elasticidad lineal (punto 1), hasta que se generan las primeras rotulas en puntos singulares de la sección transversal (punto 2), como las esquinas, los cambios de espesor o las ondulaciones. Estos puntos han sido identificados por otros autores como zonas de concentración de tensiones e inicios de grieta que producen líneas de desgarro progresivo en la dirección longitudinal del perfil [Belingardi2013]. En la segunda etapa, el mecanismo de colapso continua y la sección transversal de la geometría cambia de forma significativa (punto 3), desarrollándose zonas con grandes deformaciones en los puntos singulares. En la última etapa, la carga aumenta gradualmente a medida que el aumenta el número de rótulas de colapso (punto 4) y las paredes interiores de las secciones hacen contacto (puntos 5 y 6), lo que contribuye a una densificación del perfil.

El FLR presenta un modo de colapso inestable con picos de carga agudos debido a una fractura frágil del material en los puntos 1', 2' y 3'. Estos puntos corresponden con la formación de grietas longitudinales en la esquina superior, mitad del vano y la corrugación de la sección. Las líneas de desgarro resultantes forman pliegues que dan lugar a cambios significativos en la sección transversal del perfil. Tras la formación de rótulas en la zona de la corrugación, la carga se estabiliza en un valor casi constante (meseta) hasta que las caras de la corrugación hacen contacto. A partir de este momento, se produce un nuevo aumento de la carga debido a la densificación del perfil (punto 4'). Una vez que la parte superior de la sección se colapsa, se desarrollan rótulas adicionales en las esquinas inferiores y promoviendo el colapso completo del perfil (punto 5') y la carga aumenta exponencialmente (punto 6').

El FCR, por el contrario, muestra una respuesta pseudo-dúctil y un efecto de recuperación elástica durante el proceso de descarga. No se observó ningún pico agudo de carga durante la formación de las rótulas. Debido a que las esquinas/contornos del FCR están reforzadas con anillos de fibras de carbono, se alcanzan mayores niveles de carga y absorción de energía durante el *crush*.

El perfil HLR muestra un comportamiento de colapso no progresivo una vez que se generan las grietas longitudinales, primero en el vértice medio del perfil (punto 2') y luego en los vértices superior e inferior (punto 3'). Debido a la localización de las rótulas, la estructura no es capaz de soportar la carga y su comportamiento se asemeja al de un mecanismo. Es por ello que una vez alcanzada la carga de pandeo se produce el fallo repentino (catastrófico) de la sección. En la medida en la que es el comportamiento a *crush* es inestable, la capacidad de absorción de energía descende. Por otro lado, también se ha observado un modo de colapso inestable también en la muestra HCR, lo cual explica su reducido valor de *SEA*. A pesar de presentar un mecanismo de fallo pseudo-dúctil y de la generación de rótulas plásticas, una vez que las primeras rótulas se desarrollan en el vértice medio (punto 2), borde superior (punto 3) e inferior (punto 4), la sección se vuelve inestable.

De acuerdo con los valores de *SEA* expuestos en la Tabla 21, los valores más altos se obtuvieron para la configuración concéntrica. El perfil Fold, y en concreto el FCR, ofreció el mejor rendimiento de absorción de energía bajo carga radial con un valor *SEA* de 9,0 kJ/kg, mientras que el HCR sólo absorbió 3,0 kJ/kg. La muestra FCR presenta la mayor carga máxima, alcanzando una carga máxima de 12,8 kN.

Las curvas de colapso de perfiles con patrones de impresión Longitudinal y Concéntrica (Figura 105) tienen cierta similitud dado que ambos materiales permiten la formación de rótulas y promueven el *crush* progresivo de los perfiles. La formación de rótulas (ubicación y secuencia), así como su progreso, se identificaron como aspectos clave en el colapso estable durante el proceso de compresión. Por lo tanto, se puede concluir que el comportamiento a *crush* radial de los perfiles estudiados depende primeramente de la orientación de las fibras y segundo de la geometría.

Tabla 21. Resultados de compresión radial estática.

Ref.	P_{mean} (kN)	P_{max} (kN)	<i>CFE</i> (%)	<i>SE</i> (%)	m_r (g)	<i>SEA</i> (kJ/kg)	Modo fallo
FLR	0,9 ($\pm 0,1$)	3,5 ($\pm 1,5$)	30	45	26	1,3 ($\pm 0,2$)	Estable
FCR	6,2 ($\pm 0,4$)	12,8 ($\pm 1,7$)	49	64	24	9,0 ($\pm 0,6$)	Estable
HLR	0,2 ($\pm 0,1$)	0,6 ($\pm 0,1$)	39	73	26	0,3 ($\pm 0,1$)	Inestable
HCR	2,0 ($\pm 0,1$)	6,0 ($\pm 0,2$)	32	54	24	3,0 ($\pm 0,5$)	Inestable

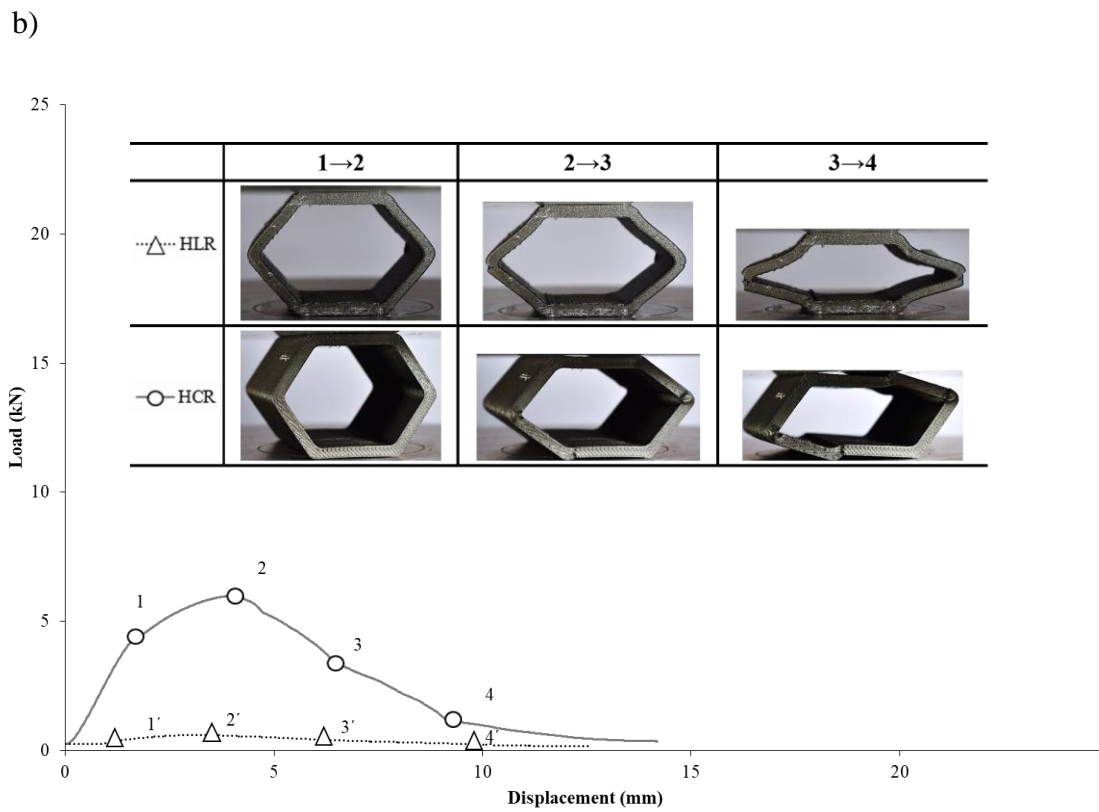
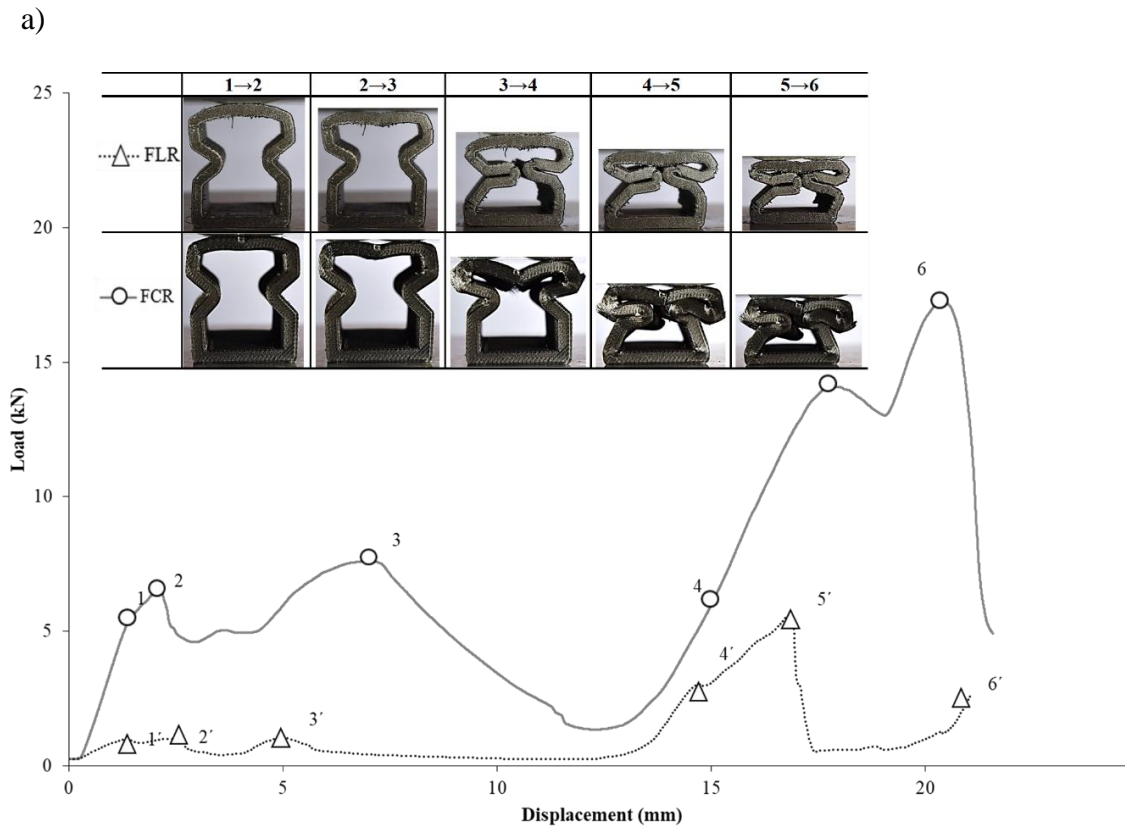


Figura 105. Curvas fuerza desplazamiento de los ensayos de compresión radial; a) Fold y b) Hexagonal.

5.2. EFECTO DE LA DIRECCIÓN DE LA CARGA

Los patrones de fallo descritos en los apartados anteriores se completan con el análisis del micro-mecanismo de fractura en los puntos de fallo.

5.2.1. Compresión en dirección axial

Para el caso de carga de compresión axial, la dirección de la carga es paralela a la dirección de la intercara de impresión (débil) de las probetas Longitudinales, representando una situación a priori mecánicamente más desfavorable. En consecuencia, se promueve la generación de grietas axiales a través de superficies entre capas o entre cordones, siendo el mecanismo predominante la fractura de la matriz y/o de la matriz-fibra. Una vez que se han generado las grietas longitudinales, el mecanismo de absorción de energía se basa en la flexión de lámina, así como en la rotura de fibras (Figura 106a). Se han observado fenómenos de inestabilidad como el pandeo del perfil, así como evidencias de micro-pandeo de las fibras (Figura 106b), en la zona de contacto entre los perfiles (Longitudinales) y las placas de compresión. Estos mismos mecanismos han sido identificados en los estudios de Goh *et al.* [Goh2018] e Iragi *et al.* [Iragi2018].

En el caso de las probetas concéntricas, dado que la intercara de impresión se encuentra comprimida, se impide el crecimiento de grieta en modo I. También se han observado el mecanismo de fallo por fractura de la matriz, *splaying* y rotura de las fibras durante el plegado de los perfiles. Esto promueve la desunión entre las fibras y la absorción de energía a través del deslizamiento relativo entre capas (fricción). También se han encontrado evidencias de arranque de las fibras durante la expansión del anillo de carbono (Figura 106c), lo que podría corroborar el anteriormente mencionado fallo matriz-fibra (Figura 106d), probablemente debido a una mala impregnación de las fibras como postulan Liu *et al.* [Liu2018] y Justo *et al.* [Justo2018]. Sin embargo, se han encontrado indicios de puentes de fibras entre las capas (Figura 106e) de las probetas concéntricas, que sugieren que la impregnación es adecuada.

5.2.2. Compresión en dirección radial

Las probetas ensayadas revelan evidencias de dos tipos diferentes de mecanismos de fractura que promueven la generación de rótulas. Ambos se basan en el fallo por cortadura interlaminar y permiten el colapso estable del perfil (Figura 106f-g).

El primero se produjo en planos paralelos a la intercara de impresión de las probetas Longitudinales (Figura 106f). Es por ello, que la velocidad de crecimiento de grieta es alta, e implica una caída repentina de la carga y la pérdida de la estabilidad del perfil, lo que se traduce en una baja tasa de absorción de energía. El segundo tipo de rótula se produce en los planos entre cordones de las probetas concéntricas (Figura 106g). En este caso, la fricción entre cordones contribuye a un mecanismo de crecimiento lento de la grieta, que permite una absorción progresiva de energía sin afectar a la estabilidad del perfil.

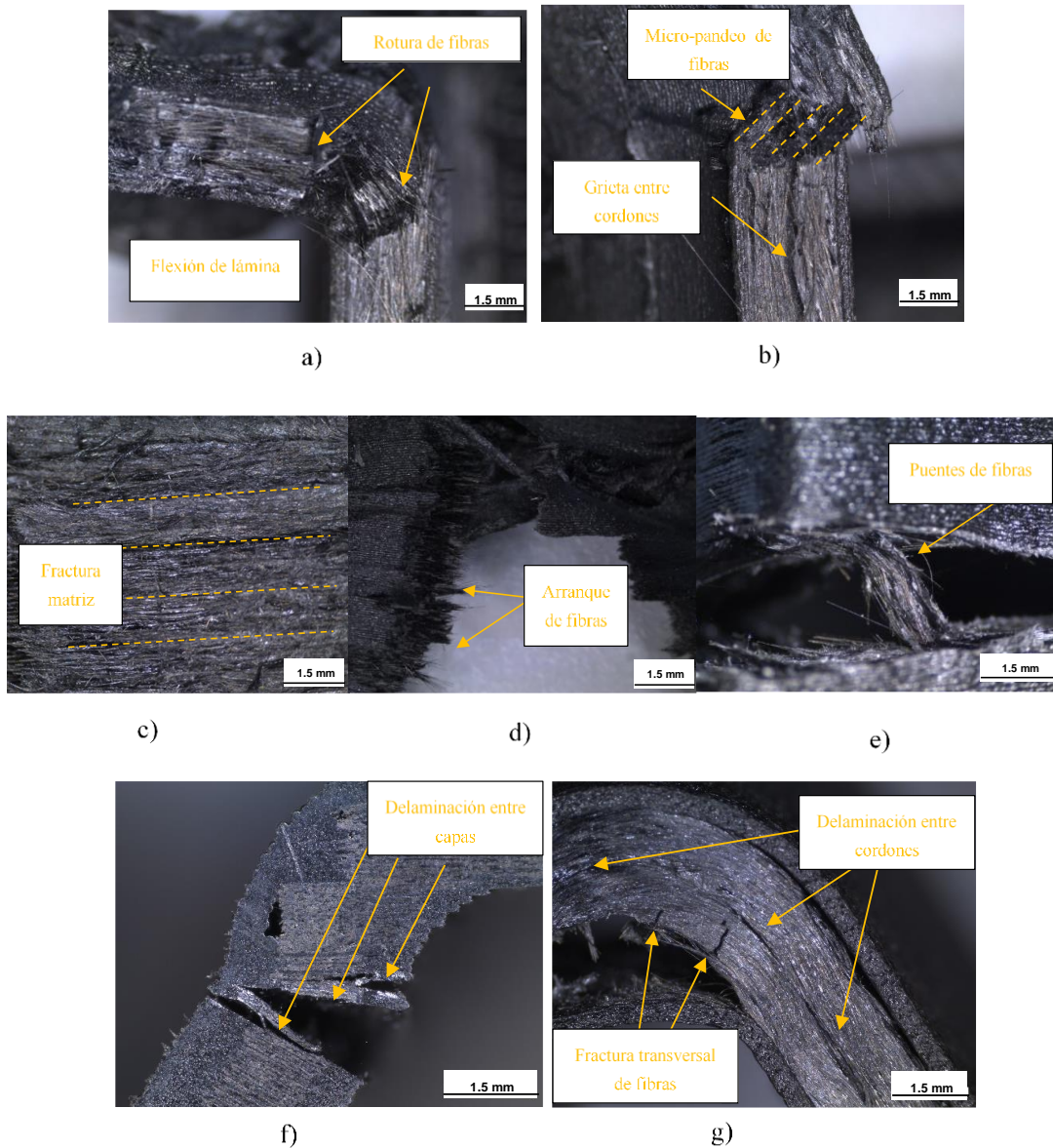


Figura 106. Superficie de rotura y modo de fallo: a) Flexión de lámina, b) micro-pandeo de fibra de HLA. c) fractura de la matriz, d) arranque de fibras en el perfil FCA, e) puentes de fibra de HCA, f) fallo interlaminar de HLR y g) rotura de fibras y delaminación entre cordones de HCR.

5.3. SELECCIÓN DE LA TRAYECTORIA DE IMPRESIÓN DE LA FIBRA

En la sección 5.2. se ha analizado la influencia en cuanto a absorción de carga de los perfiles en función dirección de la carga. En esta sección se analiza el comportamiento a *crush* en ambas direcciones de carga y su relación con el diseño de la sección transversal y la trayectoria de impresión de la fibra.

El comportamiento a *crush* estático de los perfiles ensayados se resume en la Tabla 22. De todas las configuraciones de perfil estudiadas, las concéntricas son las únicas que presentan un modo de colapso estable bajo carga axial, ya que la intercara de impresión se encuentra a compresión. Por otro lado, en cuanto al caso de la carga radial, sólo los perfiles tipo Fold presentan un modo de fallo progresivo, independientemente de la estrategia de impresión de las fibras. La geometría reentrante del perfil Fold, asegura el colapso estable durante la carga radial.

Tabla 22. Resumen del comportamiento a compresión cuasi-estática de los perfiles; estable (✓) o inestable (✗).

	Axial		Radial	
	Longitudinal	Concéntrico	Longitudinal	Concéntrico
Fold	✗	✓	✓	✓
Hexagonal	✗	✓	✗	✗

La capacidad de absorción de energía de los perfiles sometidos a carga axial es mayor que la obtenida en carga radial porque la rigidez lateral de los perfiles es menor. En ambos casos de carga, la combinación del perfil Fold y la configuración Concéntrica mostraron los mejores valores de *SEA*, siendo 30,1 kJ/kg, en carga axial y 9,0 kJ/kg en carga radial. Los valores de *SEA* axial alcanzados en esta investigación están lejos de los valores de *SEA* obtenidos de los procesos de fabricación convencional de materiales compuestos (Tabla 23). La diferencia entre los resultados se puede atribuir al hecho de que los composites impresos tienen un menor contenido de volumen de fibra (máx. 30%) y un mayor contenido de volumen de poros (mín. 7%) [Chacon2019].

Tabla 23. Valores *SEA* axial en bibliografía.

Material	Proceso fabricación	Forma sección	<i>SEA</i> (kJ/kg)	% vol. fibra	Referencia
GF-Vinylester	Pultrusión (0°)	Hexagonal	64	52	[Saenz-Dominguez2019]
CF-Epoxy	Autoclave (±45°)	Tubular	53	55	[Hamada1992]

Sin embargo, se han alcanzado valores de *SEA* radial entre 3-4 veces mayor que los encontrados en bibliografía (Tabla 24). La adición de materiales compuestos de filamentos de carbono continuos concéntricos, mejoran el rendimiento del perfil a *crush* ya que las fibras proporcionan un refuerzo local en puntos críticos en tensiones.

Tabla 24. Valores *SEA* radial en bibliografía.

Material	Proceso fabricación	Forma sección	<i>SEA</i> (kJ/kg)	% vol. fibra	Referencia
GF-Vinylester	Laminado a mano	Tubular	2.1	-	[Rouzegar2015]
CF-Epoxy	Enrollamiento Filamentario	Tubular	0.3	-	[Abdewi2008]

5.4. CONCLUSIONES

En este capítulo se ha analizado el efecto de la geometría (sección transversal) y del patrón de impresión de la poliamida reforzada con fibra continua de carbono sobre el comportamiento de *crush* axial y radial de perfil fabricados por impresión 3D - cFF.

5.4.1. Conclusiones de análisis microestructural

A partir del análisis de la microestructura, el principal defecto encontrado en las probetas longitudinales radica en la diferencia de espesor del contorno de una capa a otra, lo que genera un contenido de fibra heterogéneo a nivel de capa. Además, en aquellas capas en las que el espesor no es un múltiplo entero de la anchura del cordón, se produce un defecto de falta de material en la intercara entre la pared del contorno y la zona interior del perfil. En las probetas con configuración de fibra concéntrica, se encontraron signos de torsión y *folding back* de las fibras para radios inferiores a 3 mm, mientras que para radios superiores sólo se encontraron evidencias de torsión. En las probetas Longitudinales y Concéntricas se han observado ondulaciones y desalineaciones de los cordones de fibra. Pero, la cantidad de defectos (poros y desalineaciones entre las fibras) entre los cordones se magnificaron en los perfiles concéntricos debido a la orientación radial de las fibras.

5.4.2. Conclusiones de la influencia de la carga

En condiciones de colapso axial, el rendimiento de la geometría Fold (reentrante) es mejor que la hexagonal. Las configuraciones Concéntricas han mostrado valores de *SEA* que superan los valores de las probetas Longitudinales, con una fuerza máxima menor y un colapso estable, lo cual supone una menor deceleración en caso de impacto.

Esta diferencia se puede atribuir a la orientación de la fibra, que promueven diferentes micro-mecanismos de fractura; en las probetas Longitudinales, las grietas axiales se generan a través de las intercaras de impresión, mientras que en las probetas Concéntricas las intercaras de impresión se encuentran bajo una carga de compresión y los puntos de inicio de grieta son las superficies entre cordones, lo que induce la separación de las capas y la rotura de las fibras. El valor máximo *SEA* (30,1 kJ/kg) obtenido para las probetas impresas está lejos de los valores de *SEA* los perfiles de los composites fabricados mediante procesos convencionales. Un menor contenido de fibra en los composites impresos en 3D podría ser la razón de sus menores propiedades axiales.

Los resultados de los ensayos de colapso radial también han demostrado que la geometría reentrante es mejor que la hexagonal, y las probetas con patrón de impresión concéntrico mostraron valores de *SEA* más altos. Las fibras concéntricamente impresas proporcionan un refuerzo local en aquellos puntos singulares del perfil donde las tensiones son máximas, lo que se traduce en una mejor respuesta a compresión cuasi-estáticas.

5.4.3. Conclusiones de la trayectoria de impresión

A pesar de que el contenido en volumen de las fibras de los perfiles impresos es inferior al de los perfiles compuestos fabricados con tecnologías tradicionales, los valores de *SEA* obtenido con las fibras con orientaciones no convencionales son 3-4 veces superiores al mejor valor encontrado en la literatura.

En conclusión, los perfiles 3D concéntricamente impresos y con orientaciones no convencionales de fibra, inviables para los procesos de fabricación tradicionales, pueden ser empleados para el diseño de perfiles huecos sometidos a solicitaciones radiales. A pesar de que las propiedades axiales de las secciones analizadas no son lo suficientemente buenas, la impresión 3D permite geometrías complejas y la exploración de secciones transversales más sofisticadas que podrían conducir a valores más altos de *SEA* axial.

Capítulo 6

Influencia de la velocidad de ensayo sobre la absorción de energía en perfiles

CAPÍTULO 6

Influencia de la velocidad de ensayo sobre la absorción de energía en perfiles

A través de este capítulo se pretende abordar el siguiente objetivo operativo.

- Desarrollar un concepto de estructura tubular fabricada en composite de fibra continua mediante impresión 3D - FFF que mejoren las propiedades de absorción de energía. Para alcanzar dicho objetivo, se han planteado las siguientes tareas:
 - Identificar y analizar los defectos impresión de las diferentes fibras de refuerzo: vidrio y carbono.
 - Caracterizar a *crash* los perfiles impresos:
 - dirección de la carga (axial/radial)
 - velocidad del ensayo (cuasi-estático/impacto).
 - Analizar el efecto de la velocidad de ensayo en los materiales de refuerzo de fibra continua.

6.1. ANÁLISIS DEL PERFIL EN MATERIAL cGF/PA

6.1.1. Caracterización microestructural de los perfiles

6.1.1.1. Análisis microestructural

El proceso de impresión en 3D genera una microestructura y unos defectos similares en el material cGF/PA así como en el cCF/PA. En la Figura 107 se muestran las imágenes de microscopio óptico, a diferentes aumentos, de la sección transversal y longitudinal de las probetas impresas concéntricamente de cGF/PA. Se observa una distribución de fibras no homogéneas y zonas ricas en matriz, que tienen su origen en la microestructura inicial del filamento [Goh2018]. Asimismo, no se han encontrado vacíos en el filamento (Figura 99) de acuerdo con las observaciones Pascual-Gonzalez *et al.* [Pascual-Gonzalez2020]. En cuanto a la calidad de la unión entre capas, se aprecian signos de la intercara de impresión y de una alta concentración de poros huecos cerca de la zona (Figura 107a). La altura y anchura de las distintas capas son regulares. Aunque los diámetros iniciales de cCF/PA y cGF/PA son diferentes (en este caso 380 y 340 μm respectivamente), se imprimen una anchura de cordón similares (1 mm) ya que ambos filamentos se comprimen por un factor de tres durante el proceso de impresión [Goh2018, Chabaud2019]. Por ello, la altura de capa resultante del cCF/PA y cF/PA son de 0,125 y 0,1 mm, respectivamente.

La intercara entre filamentos adyacentes también es fácilmente identificable debido a la presencia de grandes poros. Dado que el solapamiento entre los filamentos no es uniforme a lo largo de la trayectoria de impresión, los poros longitudinales entre los filamentos son visibles (Figura 107b), tal como observaron previamente Goh *et al.* [Goh2018]. Estos vacíos también son visibles en la sección transversal de la muestra (Figura 107c). Los filamentos extruidos de cGF/PA presentan también ondulaciones de fibra (Figura 107d), generando los mencionados vacíos entre cordones [Blok2018]. Sin embargo, el efecto de la ondulación y desalineación de las fibras es más remarcable en el cGF/PA debido a su menor rigidez, como analizaron Chabaud *et al.* [Chabaud2019]. En la intercara entre el contorno de pared de Onyx[®] y los cordones interiores cGF/PA, se encuentran las diferencias más significativas entre los dos materiales. Mientras que en el cCF/PA el solape es suficiente y se asegura el contacto entre los cordones (Figura 98c), en el caso de cGF/PA el solape es insuficiente y se generan poros (Figura 107e-f).

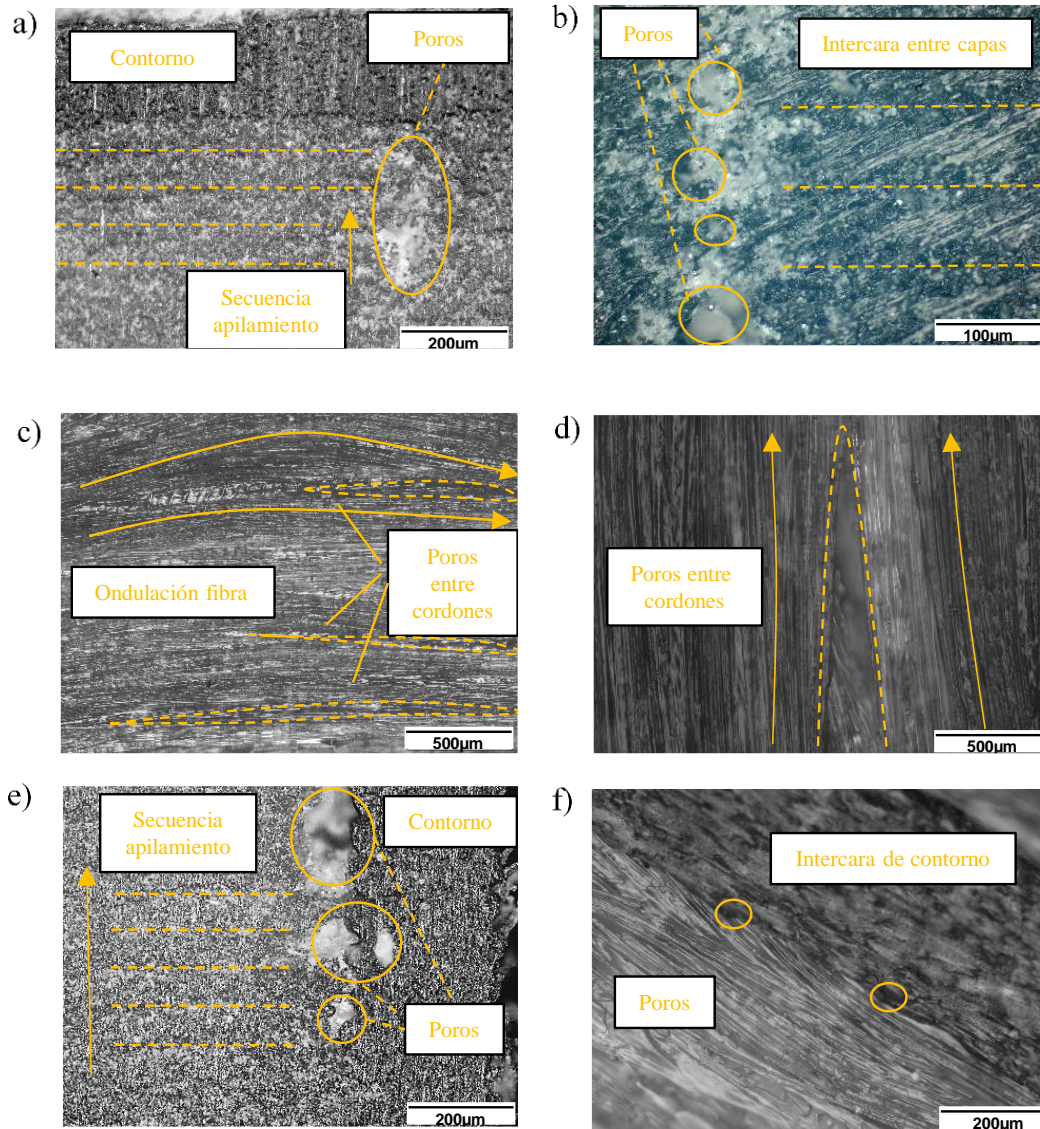


Figura 107. a) Calidad del proceso de impresión y b) aspecto de la intercara del material impreso cGF/PA. c) Poros entre cordones, d) ondulación y desalineación de la fibra. e) Solape fibra y material Onyx® e f) intercara de contorno.

6.1.1.2. Análisis del proceso de impresión de fibra

En esta sección se analiza la influencia de la geometría del perfil y la rigidez del filamento pre-impregnado en los defectos de impresión en zonas geoméricamente singulares como vértices, esquinas y radios de redondeo de los perfiles. Estos puntos críticos son de especial interés, ya que corresponden zonas de concentración de tensiones para el inicio de grietas y fallos, por lo que la presencia de defectos en estos puntos puede aumentar el riesgo de fallo prematuro de la estructura [Werken2019], tal y como se comentaba en el capítulo 5.

Cabe destacar que los defectos de impresión de fibra encontrados en los perfiles concéntricos de cGF/PA (Figura 108) son similares en tipología y posición a los defectos encontrados en probetas cCF/PA (Figura 101).

Es importante señalar que, el patrón de impresión concéntrico sigue una trayectoria en espiral que comienza en el contorno exterior del perfil y termina en el interior [Blok2018]. Este movimiento induce ondulaciones en las fibras [Matsuzaki2018, Zhang2021], y genera vacíos entre los cordones, como se muestra en la Figura 108a.

Se han observado signos de torsión de las fibras (Figura 108b) para radios superiores a 3 mm. En las zonas con radios de 1 a 3 mm en cambio, se observó evidencias de torsión y *folding back* de las fibras (Figura 108c) al igual que las observaciones de Chabaud *et al.* [Chabaud2019]. Finalmente, no se ha observado ninguna rotura de fibras en cGF/PA.

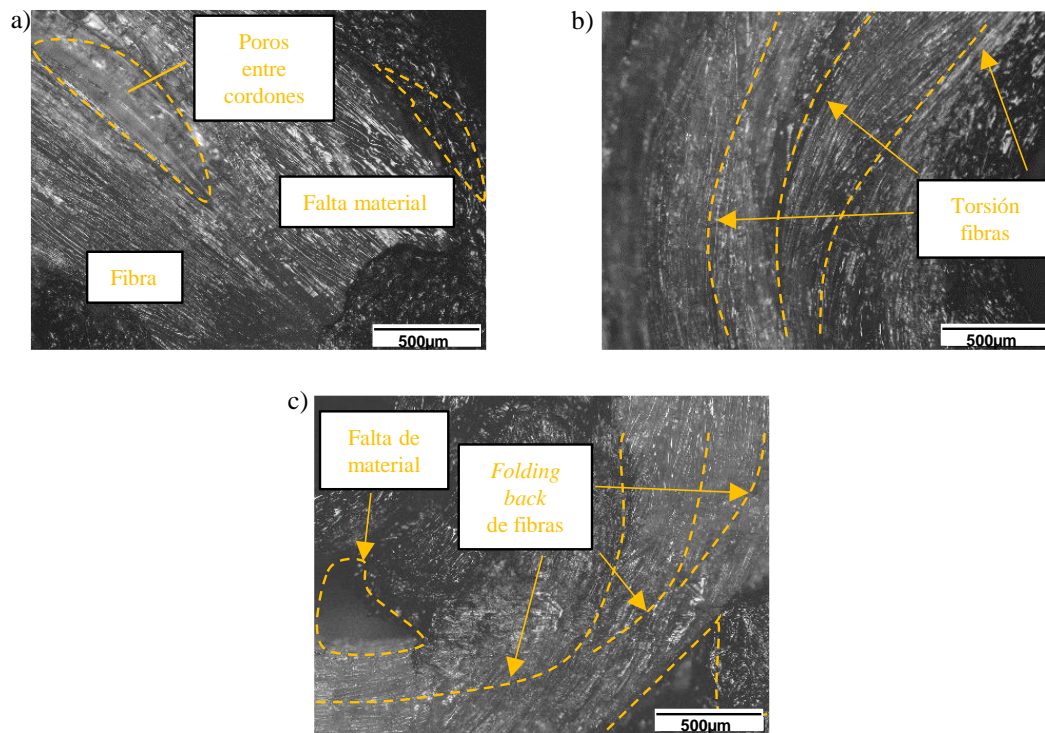


Figura 108. Defecto de impresión de fibra en perfil cGF/PA: a) Poros entre cordones, b) torsion y c) *folding back* de la fibra vidrio.

6.1.2. Caracterización estática de los perfiles

6.1.2.1. Ensayo de compresión axial

Los patrones de colapso axial de los dos materiales se muestran en la Figura 109. El comportamiento de *crush* de los perfiles de FRP durante la compresión axial se clasifica como progresivo (estable) o catastrófico (inestable) [Hull1991].

El patrón de colapso de las probetas GSA muestran un modo de *crush* estable y progresivo, gobernado por un mecanismo de fallo pseudo-dúctil (2). Se ha observado una amplia etapa de meseta (4), seguida de un pico secundario de carga (5), debida a la densificación del material cuando la sección se pliega. El perfil GSA alcanza una mayor carga de pico y una longitud de colapso menor en comparación con el CSA. Además, la cantidad de energía absorbida por el GSA es mayor que la absorbida por CSA. La presencia de fibras continuas orientadas concéntricamente influyen directamente en el mecanismo de fallo y, por tanto, en la capacidad de absorción de energía de los perfiles impresos. Los anillos de fibra no sólo impiden la generación de grietas longitudinales, sino que también promueven un mecanismo de colapso basado en un plegado del perfil, seguido de un pandeo local, y un posterior colapso progresivo. No se ha detectado cambio alguno en el modo de colapso del perfil Fold atribuible al cambio de fibra.

Como se puede observar en los valores de *SEA* presentados en la Tabla 25, ambos perfiles mostraron buenas propiedades de absorción de energía con valores de *SEA* similares. De hecho, el mayor valor de *SEA* (31,4 kJ/kg) corresponde a la muestra GSA y representa un 4% más que la muestra CSA. Por otra parte, la CSA muestra el valor de carga máxima más bajo (22,2 kN), lo que desde el punto de vista del comportamiento a *crush* supone una deceleración menor en caso de impacto. Además, el valor medio de carga alcanzado por la muestra GSA (15,7 kN) es superior a la carga media correspondiente a la muestra CSA (12,0 kN), lo que supone una mejora del *CFE* del 63% para la muestra GSA.

Tabla 25. Resultados de compresión cuasi-estática

Ref.	P_{mean} (kN)	P_{max} (kN)	<i>CFE</i> (%)	<i>SE</i> (%)	m_i (g)	<i>SEA</i> (kJ/kg)	Modo fallo
CSA	12.0 (± 0.2)	22.2 (± 0.7)	54	60	26	30.1 (± 0.5)	Estable
CSR	6.2 (± 0.4)	12.8 (± 1.7)	48	60	24	9.0 (± 0.6)	Estable
GSA	15.7 (± 1.1)	24.9 (± 1.8)	63	60	26	31.4 (± 2.1)	Estable
GSR	5.9 (± 1.9)	10.4 (± 3.5)	57	60	24	6.9 (± 2.2)	Estable

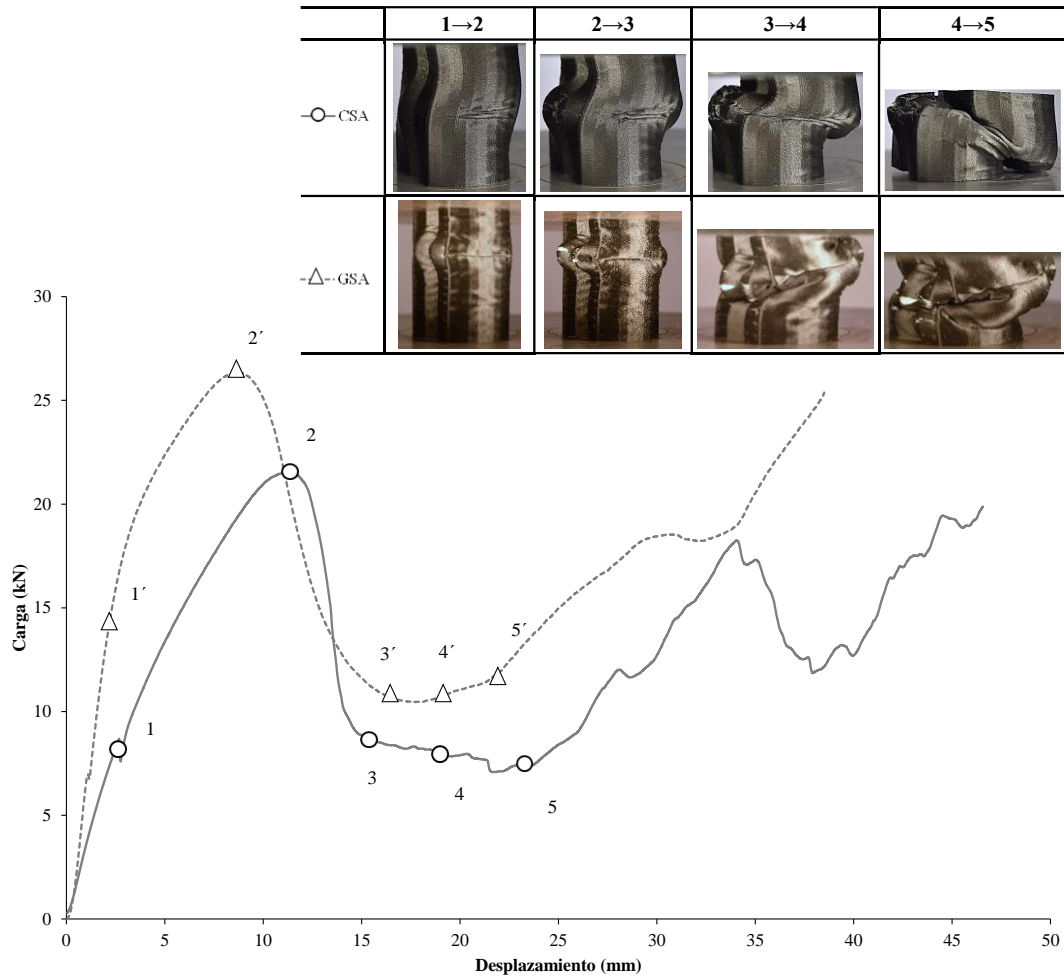


Figura 109. Curvas y patrones de compresión axial cuasi-estática.

6.1.2.1. Ensayo de compresión radial cuasi-estática.

El comportamiento de colapso radial de los dos perfiles se presenta en la Figura 110. Ambos perfiles CSR y GSR presentan una respuesta pseudo-dúctil, con un efecto de restitución elástica durante el proceso de descarga, el cual es más marcado en el perfil de la GSR. Asimismo, no se han observado picos agudos durante la formación de rótulas del GSR, mientras que en el caso de CSR la caída repentina de la carga, denota la rotura de los anillos de fibra de carbono. Se han alcanzado mayores niveles de carga, así como una mayor absorción de energía durante el colapso del CSR, ya que los radios del perfil CSR están reforzados por fibras de carbono. A pesar de que la respuesta del perfil GSR es ligeramente inferior a la respuesta del CSR, el nivel de carga en la fase de meseta es algo superior.

En cuanto a los valores de *SEA* expuestos en la Tabla 25, los más altos se obtuvieron para la muestra CSR. El material de refuerzo cCF/PA, y en concreto el CSR, presenta los mayores niveles de absorción de energía bajo carga radial con un valor *SEA* de 9,0 kJ/kg, mientras que el GSR absorbe 6,9 kJ/kg.

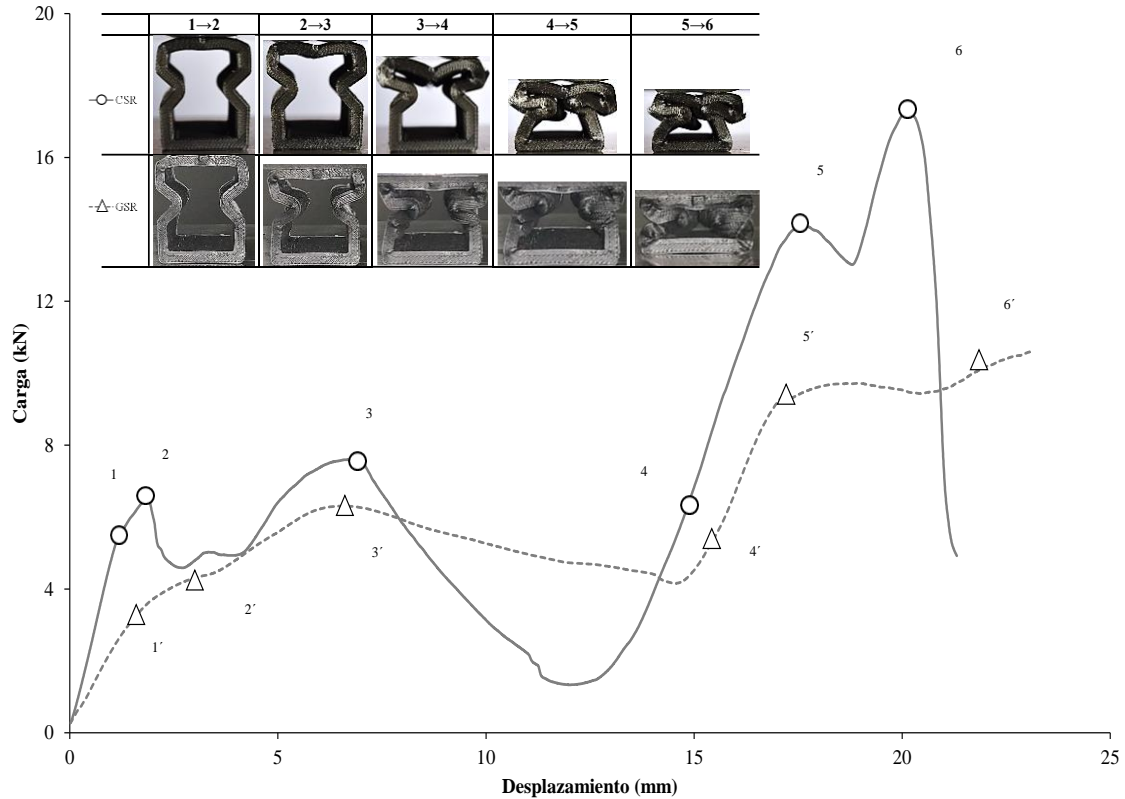


Figura 110. Curvas y patrones de compresión radial cuasi-estática.

La descripción de los patrones de fallo presentados/comentados en apartados anteriores se completan a continuación con el análisis del micromecanismo de fractura en los puntos de fallo (véase la Figura 111).

- Compresión cuasi-estática axial

Se han observado mecanismos de fallo por delaminación y rotura de la fibra durante el colapso del perfil CSA, lo cual ha favorecido la separación y el deslizamiento de fragmentos de fibras durante la absorción de energía. Se han encontrado evidencias de arranque de fibras durante la expansión de los anillos de fibra de carbono (Figura 111a), lo que podría ser consecuencia del mencionado fallo matriz-fibra [Goh2018, Iragi2019].

Por otra parte, no se han encontrado signos de arranque o rotura de fibras en el perfil GSA, ya que el cGF/PA permite un radio menor de plegado durante el colapso (Figura 111b). El mecanismo de absorción de energía es debido principalmente a la plasticidad del material, separación fibra-matriz y el despegue de las capas. Por lo tanto, la cantidad de poros, encontrados en la intercara entre capas o entre los cordones de fibras, han permitido un colapso estable y una absorción de energía progresiva. La ausencia de rotura de fibras podría explicar la restitución elástica del GSA. Además, en el perfil GSA se observaron signos evidentes de puentes de fibras, localizados principalmente entre los pliegues, lo que apoya la hipótesis de que la impregnación de las fibras es adecuada.

- Compresión cuasi-estática radial

La formación de rótulas permite un colapso estable de los perfiles CSA y GSA. En los perfiles ensayados se han observado evidencias de mecanismo de fractura basado en la cortadura interlaminar. El fallo interlaminar se produce a nivel de los cordones en ambos materiales impresos, ya que se han encontrado una gran concentración de poros en las probetas impresas. La fricción entre cordones contribuye al mecanismo de crecimiento lento de las grietas, y permite la absorción continua de energía sin afectar a la estabilidad del perfil (Figura 111c y Figura 111d).

Asimismo, las grietas transversales de las fibras sólo han aparecido en los radios del perfil colapsadas CSR (Figura 111c), mientras que el perfil GSR muestra una realineación de fibras y un despegue del contorno de Onyx[®] (Figura 111d). Los inicios de grieta transversales en las fibras CSR se deben principalmente a los esfuerzos de torsión y *folding back* de la fibra de carbono y su consiguiente rotura durante el proceso de impresión.

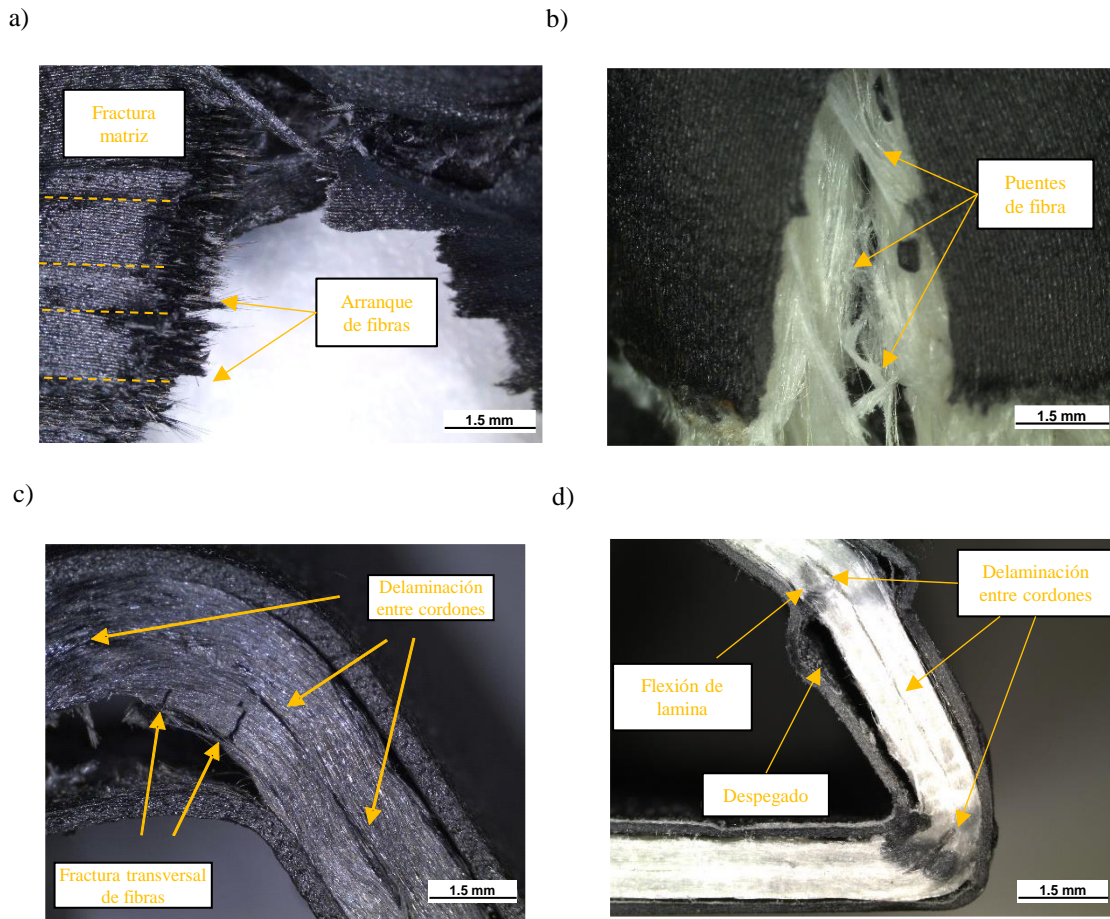


Figura 111. Modos de fallo y superficies de fractura. a) Separación y arranque de fibras en CSA. b) puentes de fibra en GSA, c) fractura transversal de la fibra y delaminación entre cordones en CSR y d) despegado, flexión de lámina y delaminación entre cordones en GSR.

6.1.3. Caracterización dinámica de los perfiles

6.1.3.1. Ensayo de impacto axial

El comportamiento de impacto axial de los perfiles de ambos materiales se muestra en la Figura 112. Se ha observado un modo de colapso estable para las probetas CDA y GDA, al igual que en los ensayos cuasi-estáticos. En ambos casos, el valor de carga máxima alcanzada en el ensayo dinámico es inferior al de caso de carga estática.

La curva de respuesta dinámica del CDA presenta picos agudos en la carga debido al fractura frágil de la fibra de carbono. Por el contrario, el perfil GDA presenta un fallo estable gracias al comportamiento dúctil de la fibra de vidrio. Además, el perfil del GCA muestra un efecto de endurecimiento por la velocidad de deformación tras alcanzar el primer pico de carga, a diferencia de del CDA que sufre una caída repentina de la carga casi hasta cero.

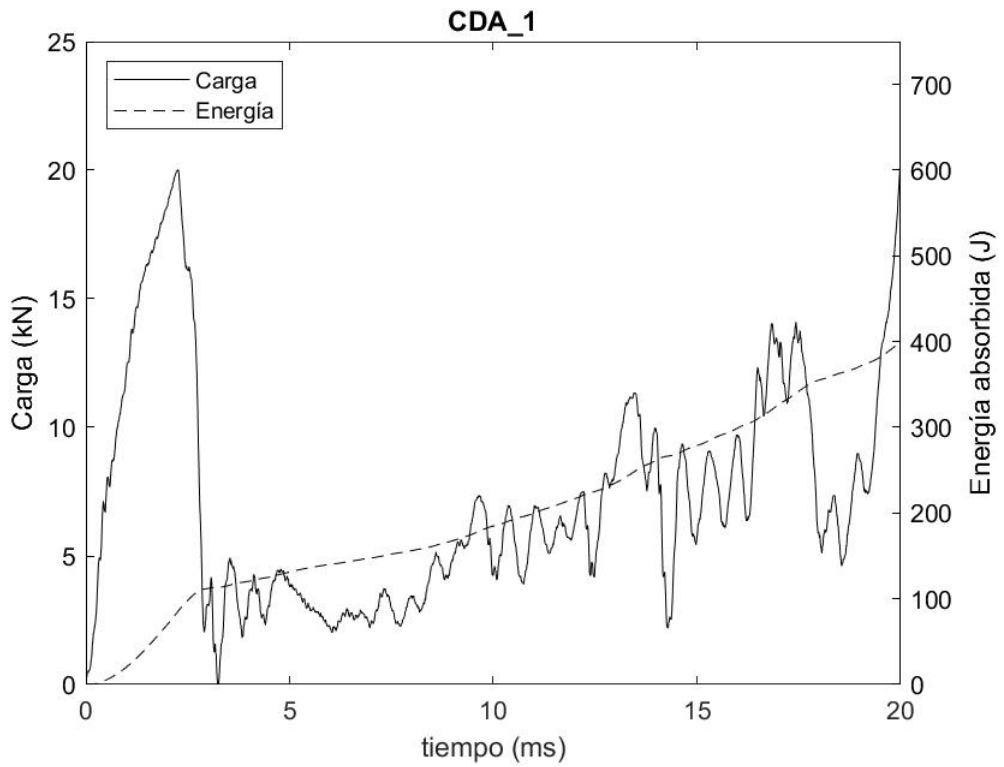
Se ha observado un fenómeno de restitución elástica únicamente para el perfil GDA. En la probeta CDA no se ha observado ningún fenómeno de restitución elástica como consecuencia de la cantidad fibras fracturadas.

El valor más alto de *SEA* se ha alcanzado en la muestra GDA (20,1 kJ/kg), y representa el 64% del valor de *SEA* cuasi-estático, como se muestra en la Tabla 26. Las probetas de CDA también muestran una disminución significativa del valor *SEA*, alcanzando sólo el 54% del valor de *SEA* cuasi-estático. Los niveles de *CFE* alcanzados por las probetas CDA (33%) y GDA (52%) también han sido inferiores a los obtenidos en las pruebas cuasi-estáticas.

Tabla 26. Resultados de impacto

Ref.	P_{mean} (kN)	P_{max} (kN)	<i>CFE</i> (%)	<i>SE</i> (%)	m_i (g)	<i>SEA</i> (kJ/kg)	Modo fallo
CDA	6.6 (± 0.4)	19.7 (± 0.8)	33	60	24	16.4 (± 0.9)	Estable
CDR	3.0 (± 0.4)	7.4 (± 1.1)	41	60	24	4.4 (± 0.6)	Estable
GDA	10.0 (± 0.1)	19.0 (± 0.3)	52	60	28	20.1 (± 0.1)	Estable
GDR	11.0 (± 0.2)	19.0 (± 1.6)	58	60	28	12.8 (± 0.3)	Estable

a)



b)

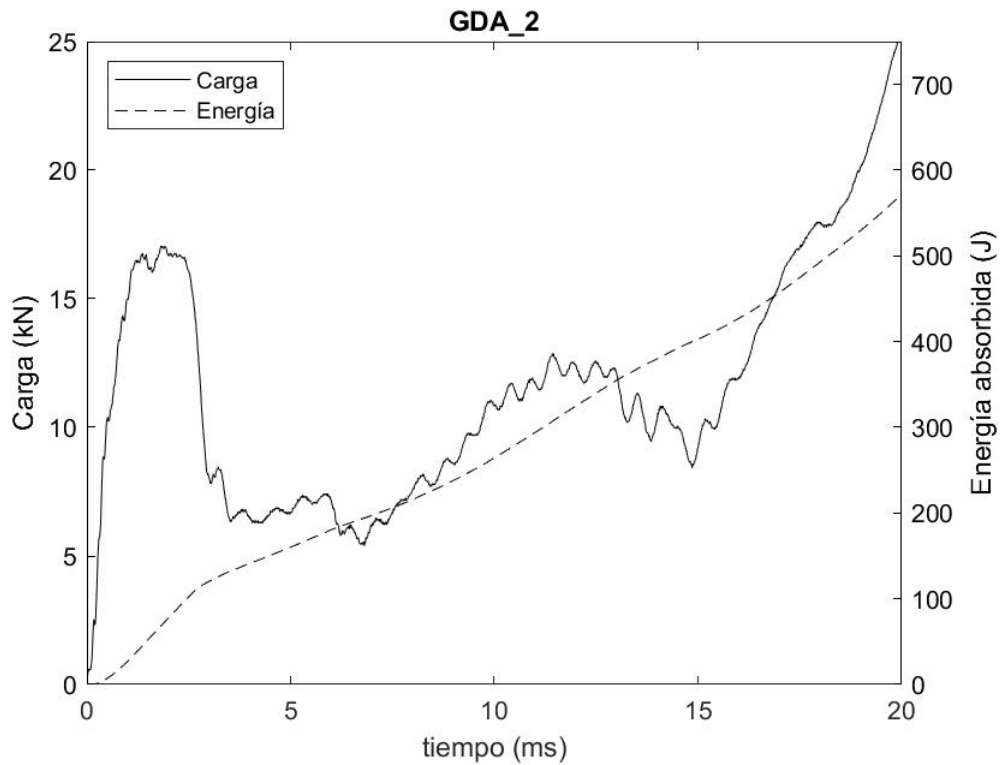


Figura 112. Curvas de impacto axial; a) CDA y b) GDA.

6.1.3.2. Ensayo de impacto radial

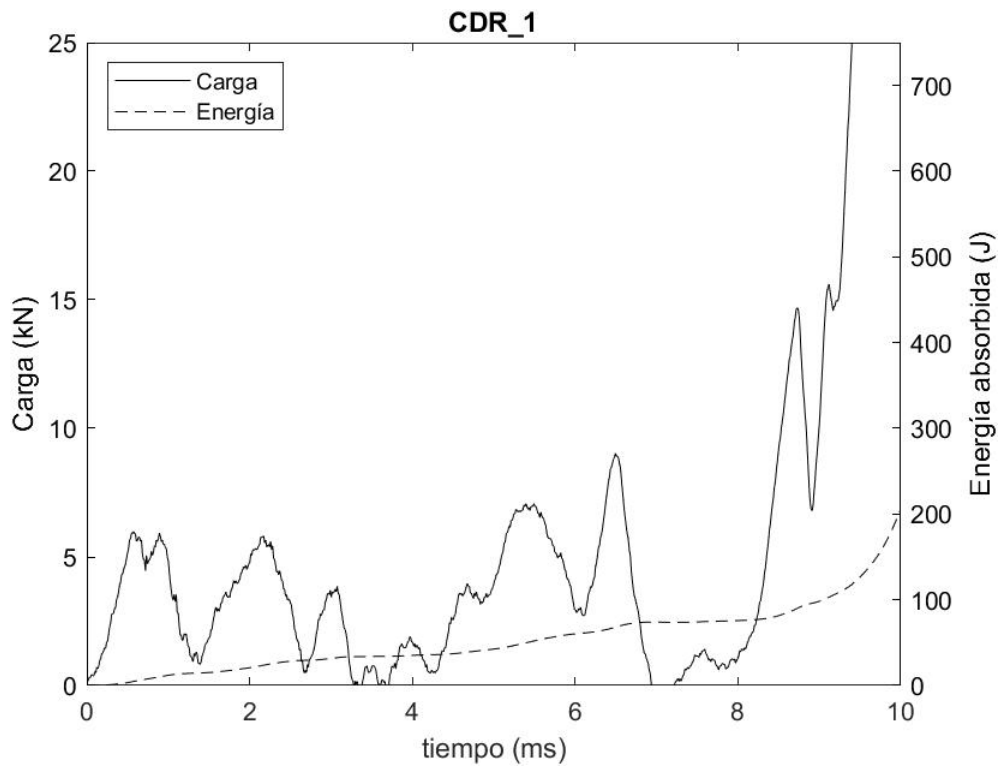
El comportamiento a impacto radial de las probetas CDR y GDR se muestra en la Figura 113. Se ha observado un mecanismo de colapso estable en ambos perfiles. Al igual que en el caso de *crush* radial, el colapso por impacto ha sido gobernado por la formación de rótulas plásticas en puntos críticos de la geometría.

La respuesta al impacto radial de la muestra GDR ha sido superior a la curva del CDR, alcanzando un nivel de carga mayor para una distancia de colapso menor. Además, el perfil GDR post-impactado presentaba una cierta rigidez residual, mientras que el CDR estaba completamente colapsado. Cabe mencionar que el efecto de endurecimiento, observado en GSA, se ha observado también en GSR. Por lo que este fenómeno es independiente de la dirección de la carga.

Los valores más altos de *SEA* se han obtenido para el perfil GDR (12,8 kJ/kg) como se muestra en la Tabla 26. El nivel de absorción de energía alcanzado por GDR es 3 veces superior al de CDR. Asimismo, la muestra GDR ha presentado el mayor valor de carga máxima (19,0 kN), comparable al valor del GDA, con un *CFE* del 58%. Por el contrario, el perfil CDR sólo ha alcanzado un valor de máximo de carga de 7,4 kN con una *CFE* del 40%.

Cabe mencionar que, gracias al efecto de endurecimiento, el GDR es capaz de soportar cargas de compresión más altas y absorber mayores niveles de energía durante el colapso. Además, la dependencia de la velocidad de deformación puede explicar el mayor volumen de fibras rotas registrado en las probetas GDA. Como consecuencia, la capacidad de absorción de energía del GDR ha mejorado en un 85%.

a)



b)

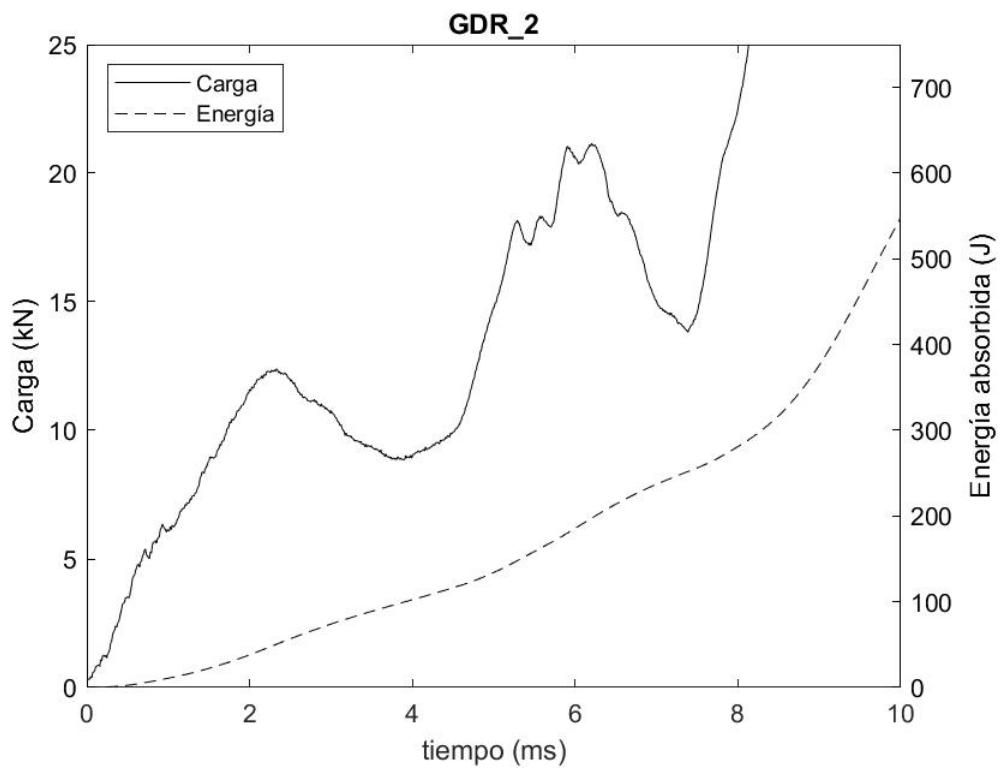


Figura 113. Curvas de impacto radial; a) CDR y b) GDR.

A continuación, se analizan la superficie de fractura de los perfiles impactados y los micro-mecanismos de fractura en los puntos de fallo (Figura 114).

- Impacto axial

Al igual que en los ensayos cuasi-estático, los principales mecanismos de fractura del perfil CDA observados son la separación y la rotura de las fibras (Figura 114a). Aunque el nivel de energía de impacto absorbido por la muestra CDA ha sido menor, la cantidad de rotura de anillos de fibra ha sido mayor que en el caso cuasi-estático. También se ha observado la rotura de fibras en los perfiles GDA post-impactados (Figura 114b), sin embargo, no se han encontrado signos de *splaying* de fibras. La disminución del *SEA* axial del GDA se debe a un cambio en mecanismo de fractura basado en la fractura de fibras. Además, se observaron evidencias de arranque de fibras en las probetas impactadas de ambos materiales.

- Impacto radial

El perfil CDR ha mostrado un colapso frágil durante el impacto con descensos repetidos en el valor de la carga. Por un lado, las grietas longitudinales y la rotura de fibras producidas durante el fallo de CDR se muestran en la Figura 114c y Figura 114e. Estas son debidas a la menor tenacidad y alargamiento hasta la rotura que presenta el material cCF/PA [Iragi2019]. Por el contrario, el perfil GDR que ha mostrado una respuesta dúctil. En la Figura 114d y Figura 114f se observan las grietas entre cordones y entre capas en la muestra GDR.

Se han encontrado diferencias en la formación del tipo rótulas, al comparar la superficie de fractura de ambos materiales. El mecanismo de fractura transversal ha provocado la rotura frágil de los anillos de fibra de CDR. Mientras que los mecanismos de flexión y delaminación dieron lugar a la formación de rótulas plásticas en las probetas de GDR. En los modos de absorción de energía relacionados con el fallo interlaminar se la deformación plástica de la matriz, fractura y deslizamiento (fricción) entre capas y cordones.

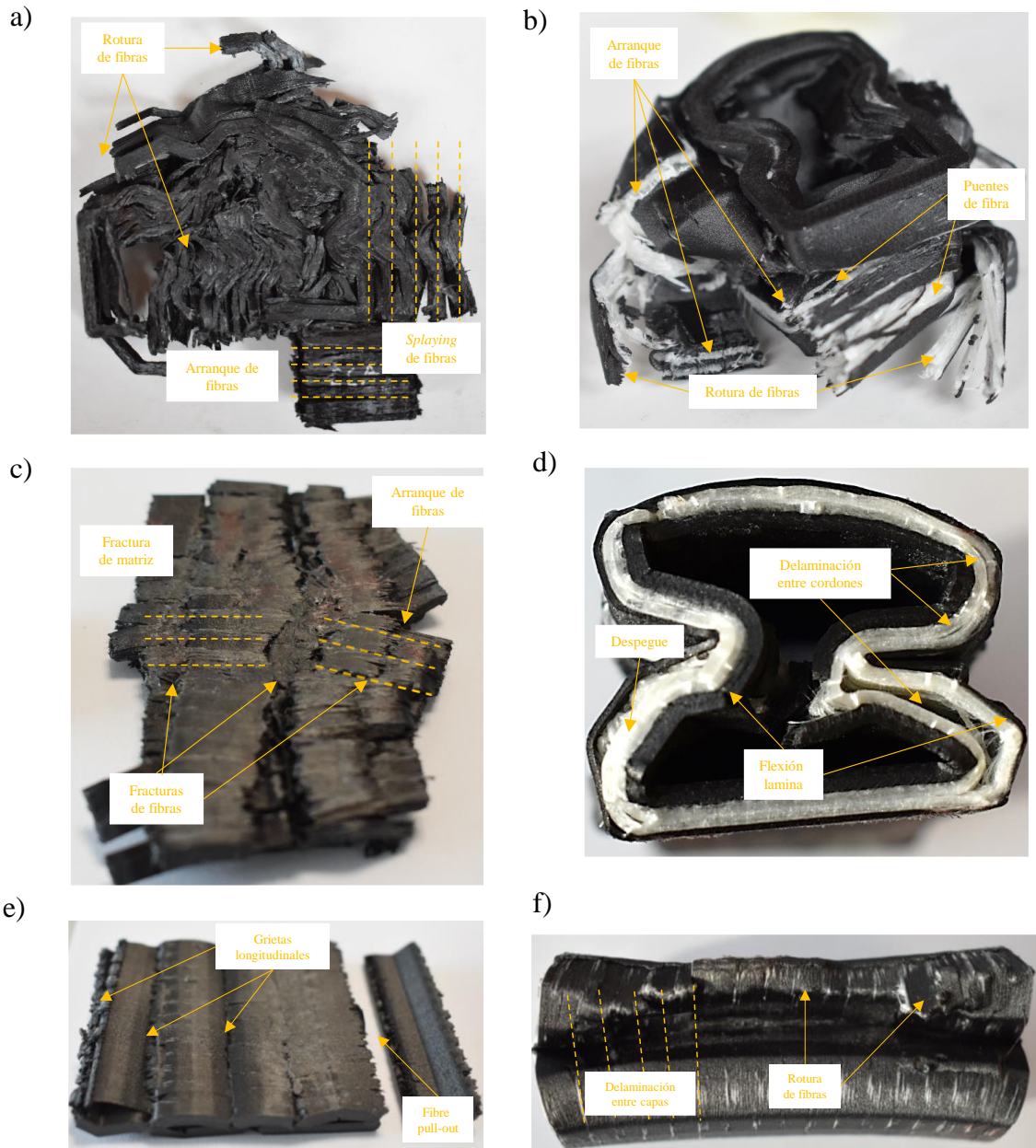


Figura 114. Perfiles impactados. a) Delaminación y rotura de fibras en CDA, b) puentes de fibra y fracturas en GDA, c) Rotura y arranque de fibras en CDR, f) Fallo interlaminar entre cordones y flexión de lámina en GDR, e) Grieta longitudinal en CDR y f) fallo interlaminar y rotura de fibras en GDR.

6.2. EFECTO DE LA VELOCIDAD DE ENSAYO

De los resultados del presente capítulo se puede concluir que la naturaleza de los constituyentes (fibra y matriz) controla las diferencias entre el comportamiento a impacto de ambos perfiles, por delante de las diferencias microestructurales específicas generadas durante la impresión 3D.

De hecho, la naturaleza amorfa de la matriz de cCF/PA y la semi-cristalina del cGF/PA [Pascual-Gonzalez2020] podrían explicar la diferencia entre los mecanismos de fractura y la dependencia de la velocidad de deformación que presentan las probetas de cGF/PA. En primer lugar, la unión entre las capas y los cordones es diferente en ambos materiales: un menor rendimiento de la intercara de las probetas cGF/PA promueve un crecimiento estable en la zona delaminada [Caminero2018b] y fomenta el deslizamiento y el rozamiento entre capas en lugar de la rotura de las fibras (Figura 114).

En cuanto al efecto de la velocidad de deformación, hay que tener en cuenta las condiciones para transferencia de calor. A bajas velocidades de deformación, el calor generado durante el colapso puede ser evacuado y, por tanto, la temperatura no varía. Sin embargo, durante los ensayos de impacto, el tiempo para evacuar el calor es menor y la temperatura de la probeta puede aumentar [Siviour2016]. En consecuencia, dado que la temperatura de transición vítrea de la matriz de cGF/PA está en torno a los 50 °C, y la de cCF/PA se acerca a los 150 °C [Pascual-Gonzalez2020], se intuye que un mayor reblandecimiento del cGF/PA permita una mayor disipación de energía. Además, las fibras de vidrio muestran un comportamiento de endurecimiento por deformación, como en el caso de Arao *et al.* [Arao2012], mientras que las fibras de carbono no, por lo que se comportan mejor bajo cargas de impacto.

6.3. ABSORCIÓN DE ENERGÍA DE IMPACTO

Los niveles de absorción de energía alcanzados por los perfiles sometidos a carga axial han sido superiores a los niveles obtenidos a carga radial, ya que la rigidez lateral de los perfiles es limitada. Las propiedades de *SEA* axial obtenidos en este apartado (20 kJ/kg) difieren considerablemente de los valores de la *SEA* (Tabla 27) obtenidos para el proceso de fabricación convencional del composite de matriz termoplástica. De la misma manera que se comentó en el capítulo 5, la diferencia de estos resultados se podría atribuir al hecho de que los composites impresos tienen un menor contenido en volumen de fibra (máx. 30%) y un mayor contenido en volumen de huecos (mín. 7%) [Iragi2019].

Tabla 27. Valores de *SEA* para impacto axial.

Material	Arquitectura fibra refuerzo	Orientación fibra	Proceso fabricación	vol. fibra (%)	Geometría perfil	SEA (kJ/kg)	Tipo ensayo	Referencia
GF/PA6	Twill Wave Fabric	0/90° (80-20%)	Termo conformado	47	Omega	24	Impacto	[Striwe2018]
GF/PA6	Woven Fabric	-	Termo conformado	50	Rectangular	49	Impacto	[Zarei2008]
CF/PA6	Woven Fabric	-	Termo conformado	50	Hexagonal	37	Impacto	[Zarei2008]

No se ha podido encontrar ninguna evidencia en la literatura sobre ensayos de impacto radial en perfiles de matriz termoplástica, por lo que, se han utilizado los resultados de *SEA* radial en perfiles de matriz termoestable. Cabe destacar que se han conseguido unos niveles de *SEA* entre 2-3 veces superiores en comparación con los valores mostrados en la Tabla 28.

Tabla 28. Valores de *SEA* para *crush* radial.

Material	Arquitectura fibra refuerzo	Orientación fibra	Proceso fabricación	vol. fibra (%)	Geometría perfil	SEA (kJ/kg)	Tipo ensayo	Referencia
GF/Epoxy	Woven Fabric Prepeg	0/90°	Laminado a mano	-	Tubular	2.8	Quasi-estático	[LiS2020]
CF/Epoxy	Woven Fabric Prepeg	0/90°	Laminado a mano	-	Tubular	2.1	Quasi-estático	[Rouzegar2015]
CF/Epoxy	Woven Fabric Prepeg	±45°	Compresión en caliente	64	Tubular Autobloqueo	5.4	Quasi-estático	[Zhao2020]

El comportamiento a impacto se ha mejorado, añadiendo filamento continuo de fibra de vidrio en direcciones concéntricas, ya que las fibras proporcionan un refuerzo local. Por consiguiente, se produce el aumento de la capacidad de carga y de absorción de energía en dirección radial.

6.4. CONCLUSIONES

El presente apartado ha analizado el comportamiento frente a cargas cuasi-estático y de impacto de perfiles impresos en 3D - FFF y reforzados con fibras continuas de carbono y de vidrio. Se ha estudiado que tiene la fibra continua de refuerzo con respecto a la microestructura resultante del proceso de impresión, el efecto de la velocidad de deformación y su relación con los materiales constituyentes de los filamentos pre-impregnados (matriz-fibra de refuerzo)

6.4.1. Conclusiones del análisis microestructural

El proceso de impresión en 3D ha generado una microestructura y unos defectos similares en ambos materiales, siendo la orientación de las fibras el aspecto microestructural más significativo.

Dado que las probetas se han fabricado utilizando un patrón de impresión de fibras concéntricas, se han detectado torsiones y *folding back* de las fibras para radios inferiores a 3 mm, pero por encima de este tamaño sólo han aparecido signos de torsión de las fibras. Para ambas probetas de material se ha observado una ondulación de las fibras y los defectos como poros/vacíos entre cordones se han visto magnificado debido a las trayectorias concéntricas de las fibras. Este fenómeno es particularmente reseñable en el caso de las probetas de cGF/PA, donde las fibras se curvan como resultado de su menor rigidez.

6.4.2. Conclusiones de la velocidad de ensayo

En condiciones cuasiestáticas, los perfiles cCF/PA se comportan mejor que los cGF/PA. El valor de *SEA* de cCF/PA es un 30% mayor que el de cGF/PA para la carga radial, y muy parecido para la carga axial. No obstante, se ha observado un comportamiento más dúctil para el perfil cGF/PA debido a su mayor tenacidad.

En cuanto a los ensayos de impacto, los valores de *SEA* obtenidos bajo carga radial para los perfiles cGF/PA han sido superiores con respecto de los ensayos cuasi-estáticos (85%). La respuesta al impacto del perfil cGF/PA es mayor, ya que el material ha presentado una dependencia de la velocidad de deformación, mientras que el cCF/PA muestra una marcada disminución de sus propiedades.

6.4.3. Conclusiones de la matriz de pre-impregnado

A pesar de las diferencias microestructurales específicas generadas durante la impresión 3D, la naturaleza de los constituyentes (fibra y matriz) controla la diferencia de comportamiento de colapso entre ambos materiales.

Los mecanismos de fractura y la dependencia de la velocidad de deformación presentada por las probetas de cGF/PA pueden explicarse a través de la naturaleza (semi-cristalina) de la matriz de cGF/PA. Una menor adhesión de las intercaras de cGF/PA promueve la absorción de energía a través de un crecimiento estable de la zona delaminada, y potencia

un deslizamiento entre capas. Además, el aumento de la temperatura de las probetas de cGF/PA por encima de su T_g durante el impacto provoca una respuesta más flexible del perfil. Esto, en combinación con la respuesta de endurecimiento por deformación exhibida por las fibras de vidrio, permite una mayor disipación de energía y un mejor rendimiento bajo la carga de impacto

.

Capítulo 7

Comportamiento a impacto de perfiles con núcleos auxéticos

CAPÍTULO 7

Comportamiento a impacto de perfiles con núcleos auxéticos

El presente capítulo analiza la mejora del comportamiento frente a impacto mediante la combinación de perfiles huecos de poliamida reforzados de fibra continua y núcleos celulares complejos. Para ello, se han analizado tres materiales de refuerzo en el contorno (Carbono, Vidrio y Kevlar[®]), y tres geometrías de núcleos auxéticos reentrantes (*honeycomb* convencional, *honeycomb* modificado y tipo estrella).

El objetivo de este estudio, por tanto, es comparar la respuesta al impacto radial de los perfiles huecos con sección Fold y núcleos auxéticos. También se han investigado el modo de colapso y los micro-mecanismos de fractura de núcleos y perfiles rellenos. A continuación, se muestra los objetivos operativos que se abordado en este capítulo:

- Desarrollar un núcleo fabricado en composite de fibra corta mediante impresión 3D - sCF y basado en una estructura celular auxética con propiedades mejoradas a impacto, lo que implica:
 - o Seleccionar el tipo de estructura celular compleja.
 - o Dimensionar la celda unitaria.
- Diseñar una estructura rellena que integre perfil y núcleo auxético mediante impresión 3D - cFF, de tal forma que se consiga un efecto sinérgico a impacto radial. Para ello será necesario:
 - o Seleccionar la combinación de material de refuerzo y núcleo auxético.

7.1. SELECCIÓN DEL NÚCLEO AUXÉTICO

7.1.1. Caracterización microestructural de los núcleos

Los procesos de impresión FFF presentan dificultades para rellenar paredes de pequeño espesor, más aún cuando el espesor de pared no es un múltiplo entero de la suma de la anchura de los cordones de Onyx[®]. Los defectos típicos de llenado en los núcleos auxéticos se muestran en la Figura 115. Los defectos se localizan en las intersecciones o nodos de la celda unitaria, lo cual afecta directamente en la rigidez de la estructura celular.

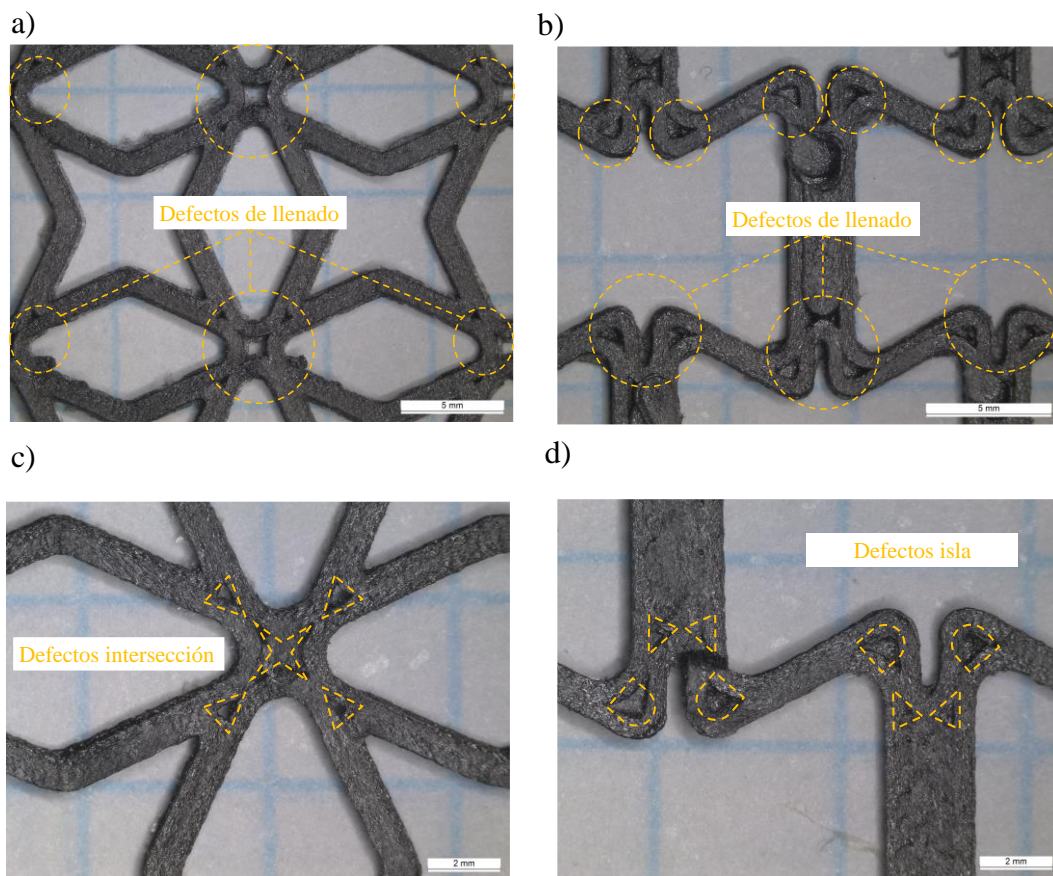


Figura 115. Defectos de llenado en los núcleos auxéticos. Celda; a) RSH y b) ASH. Nodo; c) RSH y d) ASH.

7.1.2. Caracterización mecánica de los núcleos auxéticos

7.1.2.1. Ensayo de compresión en el plano cuasi-estática

Los patrones de colapso en el plano de los núcleos auxéticos (Figura 116 y Figura 117) se definen por: una zona de respuesta lineal de la estructura celular (1) hasta alcanzar un punto de inflexión o codo (2), donde se produce un cambio de rigidez (3) debido al contacto entre las caras interiores de la celda y finalmente se produce la densificación, donde la respuesta del núcleo se corresponde con la respuesta del material base.

La estructura RSH presenta (Figura 117) una rigidez lineal mayor (punto 1) en comparación con las otras dos. Se observa un único codo para un nivel de desplazamiento de 18 mm (punto 2), que se corresponde con el plegado de las celdas centrales y el contacto de sus nodos horizontalmente. El proceso de plegado de las celdas inferiores y superiores continua hasta que las caras interiores entran en contacto verticalmente (punto 3). A partir de este punto la carga aumenta rápidamente debido al proceso de densificación.

La estructura ASH muestra una mayor rigidez inicial que la RH (punto 1'), dado que su diseño contempla paredes verticales reforzadas con respecto a las paredes verticales. La estructura ASH también presenta un único punto de inflexión previo a la densificación a 16 mm de desplazamiento (punto 2').

La RH muestra un primer codo para un desplazamiento de 12 mm (punto 2''), coincidiendo con el giro de las paredes verticales y el contacto entre las paredes horizontales. Según progresa el plegado de la estructura se produce un segundo codo (punto 3'') debido al contacto vertical entre vértices y las paredes horizontales. A partir de este punto se produce la densificación de la estructura (punto 4'').

El patrón de colapso de los núcleos reentrantes (ASH y RH) es análogo ya que ambos están basados en un mecanismo de plegado de las paredes horizontales mientras, las paredes verticales permanecen rectas. Por otro lado, la estructura RSH presenta un mecanismo de plegado doble dada su geometría inicial de tipo estrella, por lo que se puede decir que es doblemente reentrante.

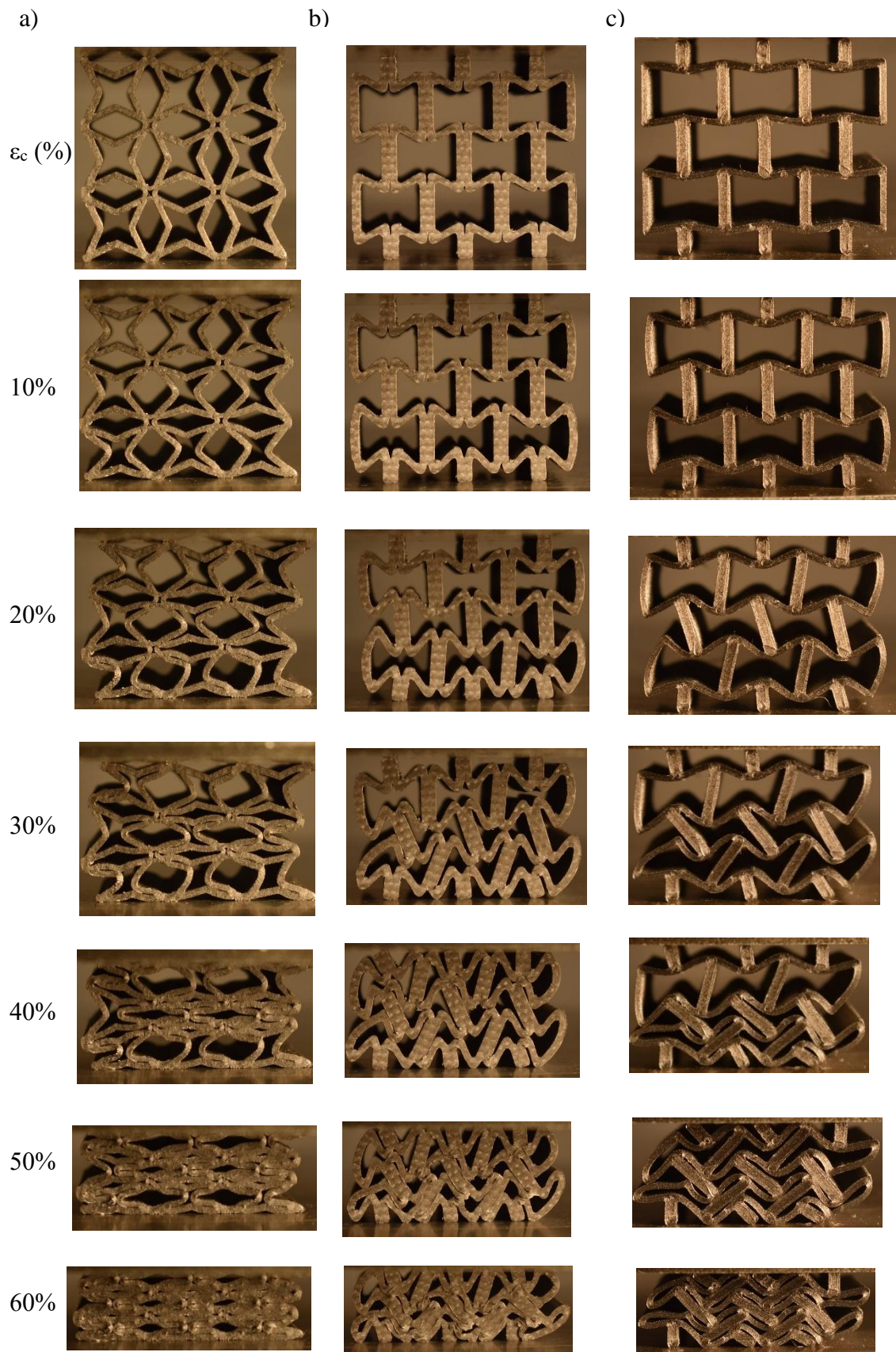


Figura 116. Patrón de colapso de los núcleos auxéticos deformación; a) RSH, b) ASH y c) RH.

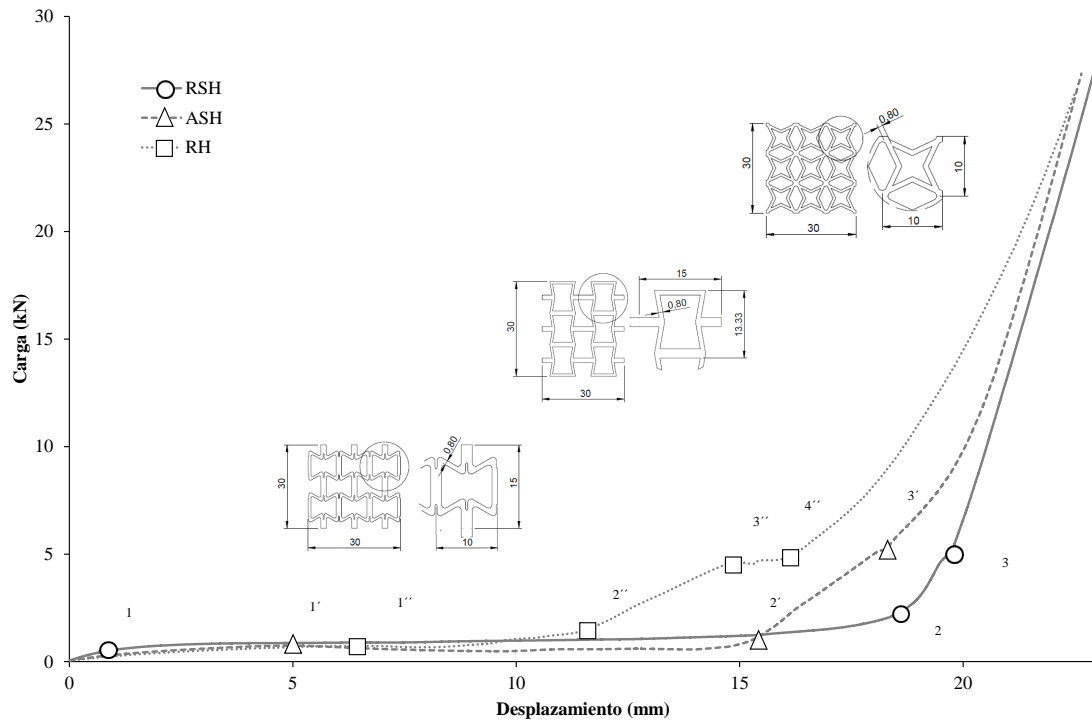


Figura 117. Curvas de colapso; RSH, ASH y RH

Los resultados de los ensayos de compresión se muestran en la Tabla 29. La capacidad de absorción de energía es similar para las tres estructuras, no obstante, el núcleo RSH presenta un valor *SEA* superior con respecto de ASH y RH (1 y 15%, respectivamente). Los valores de carga media (2,7 kN) y carga máxima (23,2 kN) alcanzada por RSH son los más altos de los tres tipos de núcleos. Sin embargo, el nivel de *CFE* alcanzado por RSH es un 45% menor que el RH.

Tabla 29. Resultados de compresión de los núcleos.

Ref.	P_{mean} (kN)	P_{max} (kN)	<i>CFE</i> (%)	<i>SE</i> (%)	m_t (g)	<i>SEA</i> (kJ/kg)	Modo fallo
RSH	2,7 ($\pm 0,1$)	23,2 ($\pm 0,1$)	12	75	10,7	8,8 ($\pm 0,1$)	Estable
ASH	2,6 ($\pm 0,1$)	18,8 ($\pm 3,0$)	14	75	10,7	8,7 ($\pm 0,3$)	Estable
RH	2,2 ($\pm 0,1$)	10,2 ($\pm 0,4$)	22	75	9,1	7,5 ($\pm 0,6$)	Estable

7.1.2.1. Ensayo de impacto en el plano

Las respuestas dinámicas de los núcleos se presentan en la Tabla 30 y sus curvas de impacto se muestran en la Figura 118. La curva de carga del núcleo RSH, es bastante plana en comparación con las otros dos. Una mayor flexibilidad y el plegado progresivo de la estructura de RSH puede explicar una respuesta dinámica tan estable. Las curvas de ASH y RH no obstante, muestran un pico de carga para un instante de tiempo similar.

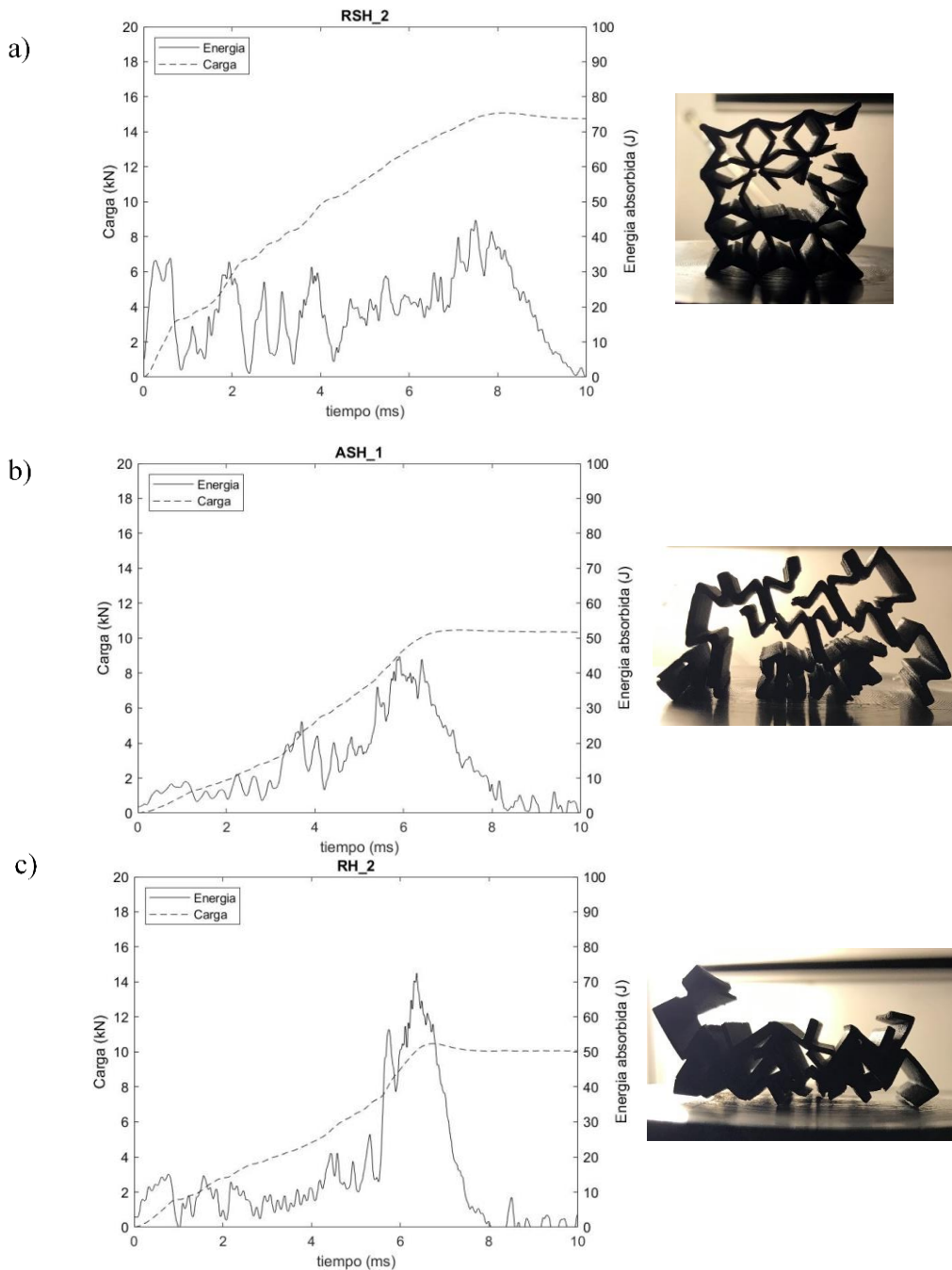


Figura 118. Curvas de impacto: a) RSH, b) ASH y c) RH.

Tabla 30. Resultados de impacto en el plano.

Ref.	P_{mean} (kN)	P_{max} (kN)	CFE (%)	SE (%)	m_i (g)	SEA (kJ/kg)	Modo fallo
RSH	2,7 ($\pm 0,2$)	6,5 ($\pm 0,6$)	42	66	10,7	8,5 ($\pm 0,1$)	Estable
ASH	2,5 ($\pm 0,1$)	8,9 ($\pm 1,3$)	28	69	10,7	6,8 ($\pm 0,3$)	Estable
RH	2,3 ($\pm 0,1$)	12,8 ($\pm 1,7$)	18	77	9,1	7,9 ($\pm 0,4$)	Estable

Se ha observado una reducción en las propiedades de los núcleos con respecto a los valores cuasi-estáticos. La carga media se ha reducido con respecto del caso cuasi-estático, un 3% en el caso del RSH y un 25% y 14% para ASH y RH, respectivamente. Por ello, la capacidad de absorción de energía también se ha visto reducida. La estructura RSH presenta los valores de SEA más alto en comparación con ASH y RH, siendo un 13% y 25% superiores con respectivamente. Los valores de carga máxima son más inferiores a los obtenidos en comparación con los valores cuasi-estáticos, debido a que se produce la fractura del núcleo antes que su densificación.

En cuanto al análisis de fallo de los núcleos a impacto (Figura 118), se ha observado que las tres configuraciones de núcleo presentan un mecanismo de fallo por cortadura. Las fracturas de los tres núcleos se han localizado en los nodos unión y se han relacionado con defectos de llenado o poros en los puntos de intersección de las celdas unitarias (Figura 115).

7.2. ANÁLISIS DE PERFIL HUECO DE cCF/PA, cGF/PA Y cKF/PA

7.2.1. Caracterización microestructural del perfil hueco cKF/PA

7.2.1.1. Análisis microestructural

En este apartado se analiza la calidad del proceso de impresión y aspecto de la intercara de cKF/PA. En la Figura 119, se muestran las imágenes de microscopio óptico de la sección transversal, a diferentes aumentos. Primeramente, cabe mencionar que se han encontrado defectos para el material cKF/PA similares a los encontrados también en cCF/PA y cGF/PA, atribuidos a la microestructural inicial del filamento [Goh2018, Pascual-Gonzalez2021]. En la Figura 119a-b, se aprecia la intercara de impresión con una alta concentración de poros. Además, se aprecia que la altura y anchura de las distintas capas de cKF/PA son regulares. Dado que los diámetros iniciales del filamento cKF/PA

y cGF/PA son iguales (340 μm), su altura de capa (0,1 mm) y la anchura resultante de su cordón (1 mm) son iguales [Goh2018, Chabaud2019].

La intercara entre filamentos adyacentes también es fácilmente identificable debido a la presencia de grandes poros (Figura 119c). En concordancia con las observaciones de Goh *et al.* [Goh2018], el solapamiento entre los filamentos no es uniforme a lo largo de la trayectoria de impresión y por ello se produce grandes poros longitudinales entre los filamentos. De acuerdo con las investigaciones de Caminero *et al.* [Caminero2018b], una mayor concentración de poros en la zona de la intercara y entre cordones puede explicar una menor adherencia entre capas de cKF/PA en comparación con cCF/PA y cGF/PA.

Las diferencias más significativas entre los tres materiales se encuentran entre el contorno de pared de Onyx[®] y los filamentos interiores reforzados con fibra. El solape en algunas capas de cKF/PA, al igual que en el cGF/PA, es insuficiente, lo que genera poros más grandes que en el cCF/PA (Figura 119d).

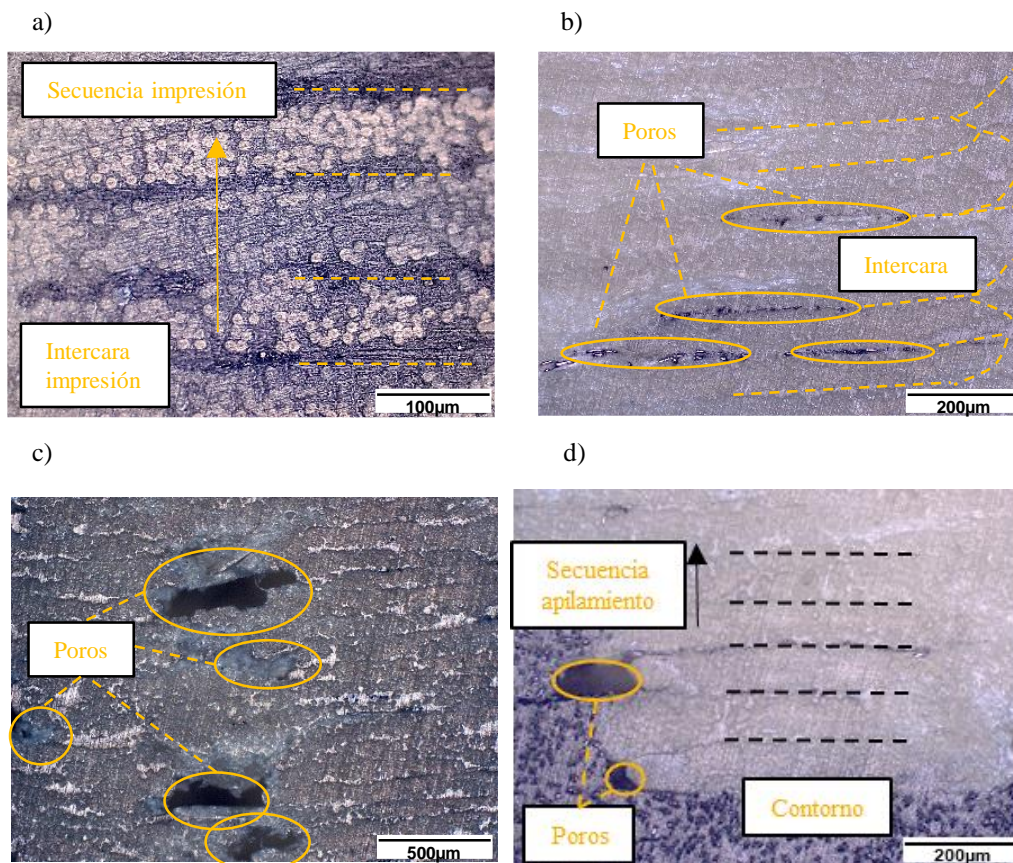


Figura 119 Calidad del proceso de impresión y aspecto de la intercara de cKF/PA; a) Intercara de impresión, b) poros entre capas, c) poros entre cordones, d) paredes de material Onyx[®] e intercara de unión cKF/PA.

7.2.1.2. Análisis del proceso de impresión de fibra

En esta sección se analiza la influencia de la geometría del perfil, la rigidez del filamento pre-impregnado y el patrón de impresión sobre los defectos de impresión. Para interpretar los resultados debe tenerse en cuenta que, la rigidez del filamento cKF/PA (27 GPa) es menor que cCF/PA (60 GPa) pero mayor que cGF/PA (21 GPa).

Los defectos observados en cKF/PA se muestran en las Figura 120. Es importante señalar que el patrón de impresión concéntrico induce ondulaciones en las fibras [Blok2018, Melenka2016] y genera vacíos entre los cordones como se muestra en la Figura 120a. Únicamente se han observado signos de torsión de las fibras (Figura 120b) en trayectorias curvas, como en el radio inferior y superior (3 mm) o en el radio de corrugación (4 mm) (Figura 120c). No se han encontrado evidencias de rotura de fibras, dada la flexibilidad del filamento y los amplios radios del perfil. No obstante, si se han encontrado defectos como desalineaciones de fibras (Figura 120b-c) en la zona de los radios superior e inferior [Quan2020, Dong2020].

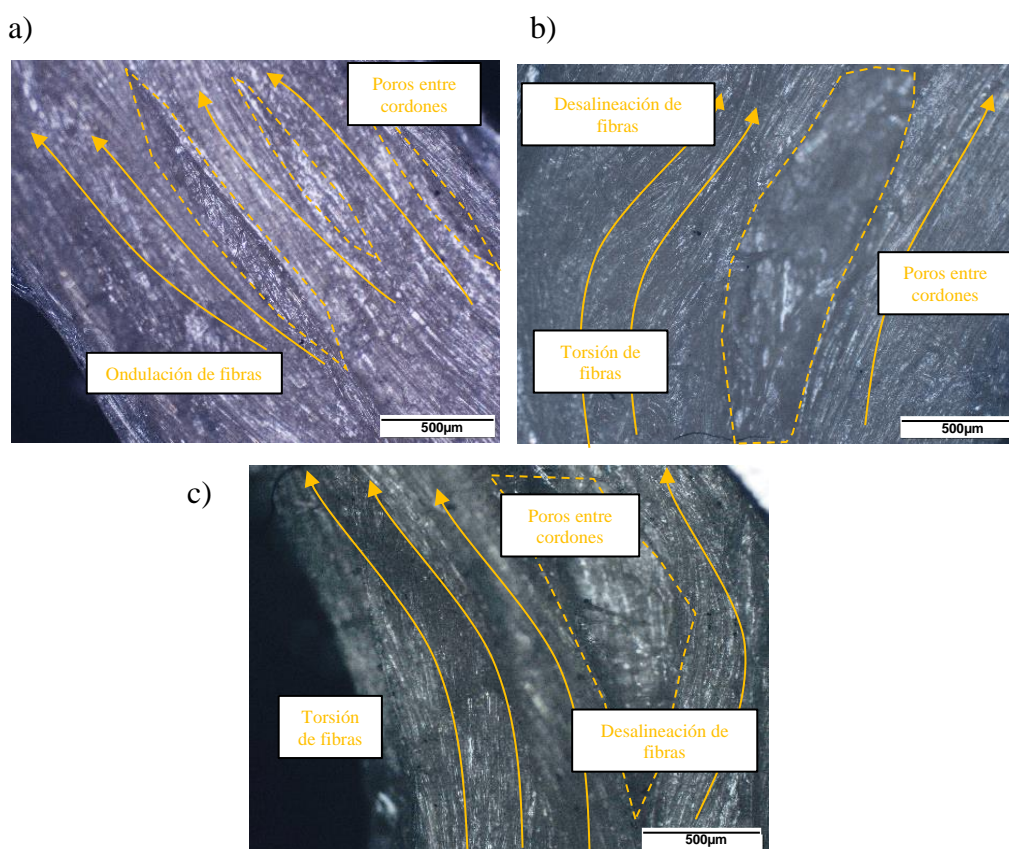


Figura 120. Defecto de impresión de fibra. Perfil cKF/PA; a) Poros entre cordones, trayectoria recta. Torsión y desalineación de la fibra en b) zona corrugación y c) radio superior.

7.2.2. Caracterización mecánica de los perfiles huecos

7.2.2.1. Ensayo de compresión cuasi-estática

Las curvas fuerza-desplazamiento y los patrones de colapso de los perfiles huecos se muestran en la Figura 121 y las propiedades compresión cuasi-estática se muestran en la Tabla 31. Como se puede observar en la Figura 121, el modo de colapso es estable para los tres perfiles. Sin embargo, la respuesta inicial del perfil CS es superior a la respuesta mostrada por GS y KS, debido a que las propiedades estáticas del cCF/PA son mejores que las de cGF/PA y cKF/PA. La curva de CS presenta varios picos de carga, debido a la rotura de los anillos de carbono. El modo de colapso del perfil GS y KS son similares, sin saltos en la carga. El perfil GS presenta una clara zona de meseta seguido de un pico secundario anterior a la densificación. Por el contrario, el KS no muestra pico de carga, siendo su colapso el más estable de todos, con la zona más amplia a carga constante. El mecanismo de colapso pseudo-dúctil observado en el perfil KS es similares al observado en el GS, basado en la formación de rótulas plásticas en las zonas críticas del perfil, lo que permite el plegado de la sección Fold. Si bien las dimensiones de las probetas son mayores que las probetas de los capítulos 5 y 6, no se han encontrado diferencias en los modos de colapso de perfiles fabricados en cCF/PA y cGF/PA.

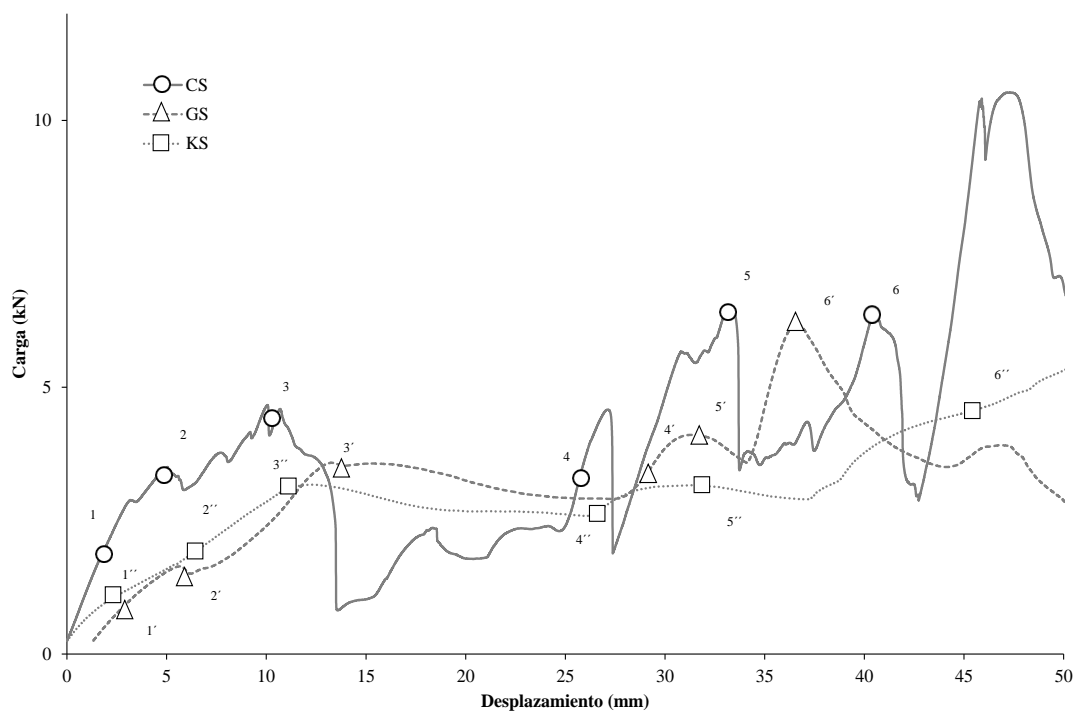


Figura 121. Curvas y patrones de compresión radial cuasi-estática; a) cCF/PA, b) cGF/PA y cKF/PA.

Los valores de carga media (4,3 kN) y carga máxima (10,5 kN) se han alcanzado para el perfil CS. Además, el perfil de CS es el que presenta la mayor eficiencia a *crush* con un *CFE* de 51%. No obstante, el perfil hueco KS presenta el valor de *SEA* más alto (4,6 kJ/kg), valor que supera al de GS (3,9 kJ/kg) y al CS (4,2 kJ/kg).

En comparación con los resultados presentados en los capítulos 5 y 6, se observa que los valores de absorción de energía y de *SEA* son menores. Por lo que se corrobora que la capacidad de absorción en dirección radial es dependiente de las dimensiones geometría del perfil Fold, mejorando el *SEA* cuanto menor es la esbeltez del perfil.

Tabla 31. Resultados de compresión cuasi-estática de perfil huecos.

Ref.	P_{mean} (kN)	P_{max} (kN)	<i>CFE</i> (%)	<i>SE</i> (%)	m_r (g)	<i>SEA</i> (kJ/kg)	Modo fallo
CS	4,3	10,5	41	69	53	4,2	Estable
GS	3,4	6,2	20	80	53	3,9	Estable
KS	3,7	9,4	40	80	49	4,6	Estable

7.2.2.2. Ensayo de impacto radial

La respuesta de los perfiles y los patrones de colapso a impacto radial se muestran en Figura 122, y los resultados en la Tabla 32.

La curva carga-tiempo del perfil CD (Figura 122a), presenta un primer pico de carga que denota la rotura de fibras y la pérdida de capacidad de carga del perfil de carbono, debido a su menor tenacidad a la fractura. El segundo de pico de carga se corresponde con el impacto contra la base de ensayo. Su repentina rotura limita su capacidad de absorción de energía. La curva correspondiente a GD (Figura 122b), presenta un rizado en la carga que denota fractura de las fibras, pero su colapso estable. En cuanto al perfil KD, su pico máximo de la curva de KD (Figura 122c) es más reducido y su evolución es estable.

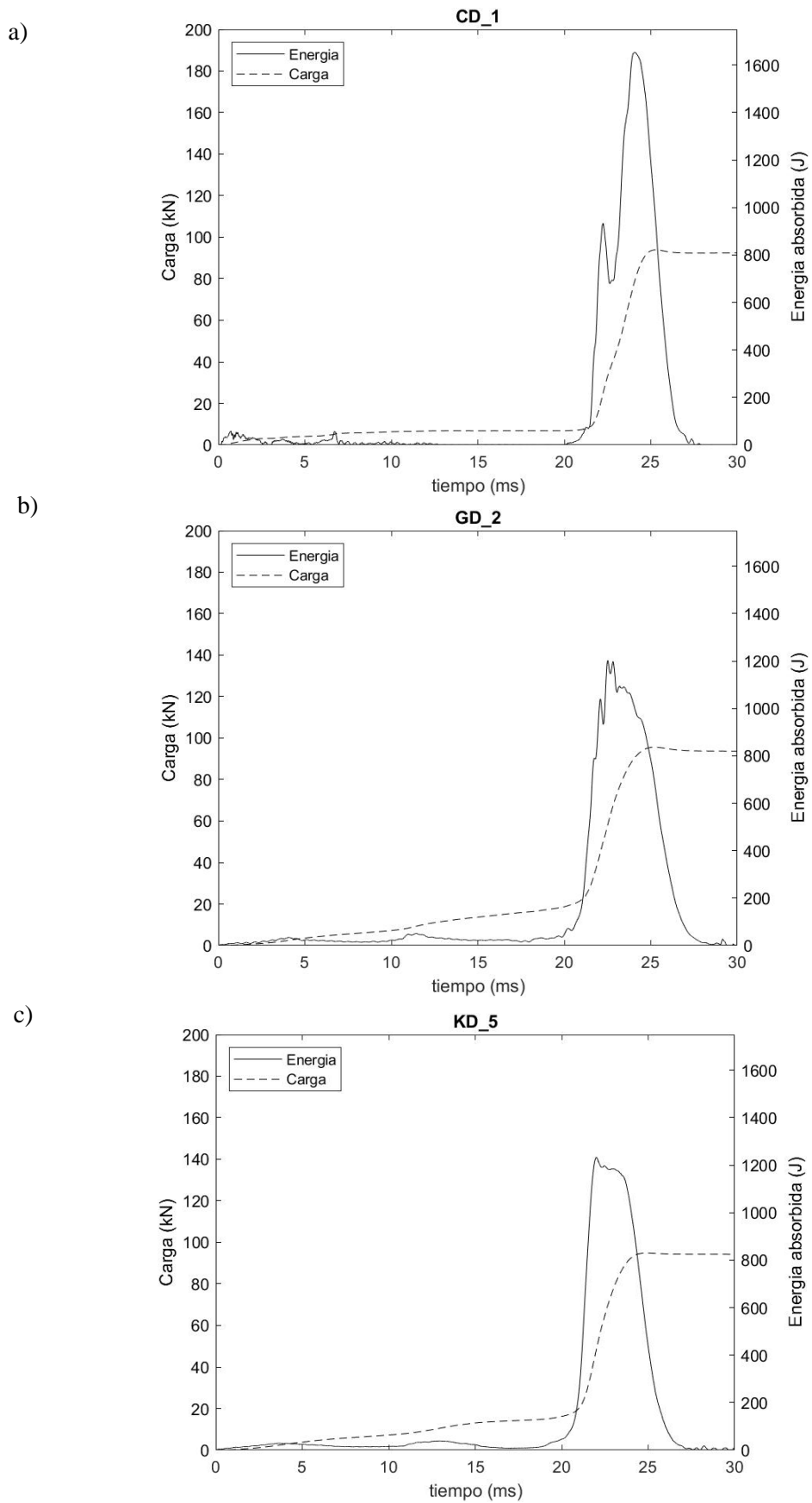


Figura 122. Curva de impacto radial de los perfiles huecos; a) CD, b) GD and c) KD.

Los valores de carga para un nivel de compresión del 90% para los perfiles CD, GD y KD son 9,1, 14,2 y 27,6 kN, respectivamente.

Tabla 32. Resultados de impacto radial de perfil huecos.

Ref.	P_{mean} (kN)	P_{max} (kN)	CFE (%)	SE (%)	m_t (g)	SEA (kJ/kg)	Modo fallo
CD	1,3 ($\pm 0,2$)	9,1 ($\pm 1,1$)	14	90	53	1,5 ($\pm 0,2$)	Inestable
GD	2,2 ($\pm 0,8$)	14,2 ($\pm 1,0$)	27	87	53	2,5 ($\pm 0,9$)	Estable
KD	2,8 ($\pm 0,4$)	27,6 ($\pm 0,5$)	10	87	49	3,6 ($\pm 0,5$)	Estable

El perfil hueco KD presenta un nivel de SEA (3,6 kJ/kg), superior al de GD (2,5 kJ/kg) y al CD (1,5 kJ/kg). El modo de colapso estable de los perfiles KD y GD y su comportamiento dúctil durante el impacto, explican una mayor capacidad de absorción frente CD. Por el contrario, el perfil CD presenta un fallo frágil y su colapso es inestable. Los perfiles KD y GD presentan una reducción en su capacidad de absorción del 22 y 36%, respectivamente mientras que el CD presenta una caída de más del 64% con respecto los valores de SEA cuasi-estático. La respuesta dinámica y modo de colapso seguro obtenido para el perfil hueco KS coincide con las observaciones de Farley *et al.* [Farley1991], en las que los perfiles reforzados con fibra de aramida presentaban siempre un colapso estable independientemente de la orientación de la fibra.

7.3. COMBINACIÓN DE NÚCLEO Y PERFIL

El aspecto del perfil relleno con núcleo RSH se presenta en la Figura 123. En el siguiente apartado se analiza el efecto combinado del perfil relleno con el núcleo auxético RSH.

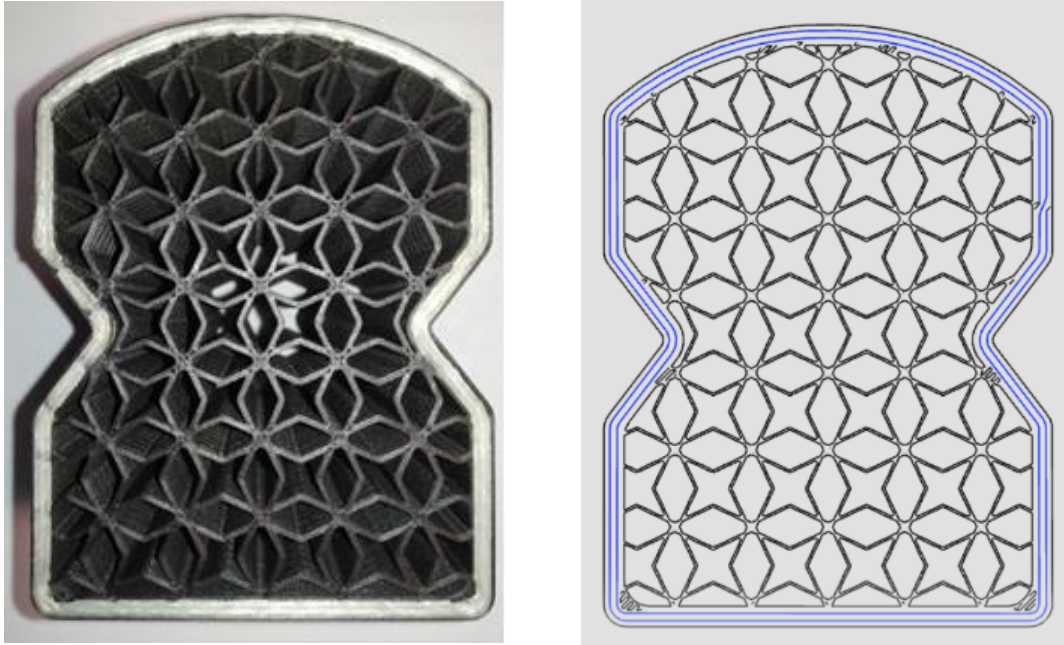


Figura 123. a) Aspecto *as printed* de perfil de CGF/PA con relleno RSH y b) configuración en Eiger®.

7.3.1. Caracterización microestructural de los perfiles rellenos

Cabe destacar que en el perfil relleno se han identificado los mismos defectos de impresión anteriormente comentados en la caracterización microestructural del perfil hueco y núcleo auxético (apartados 7.1.1 y 7.2.1). Estos defectos han sido identificados, clasificados y posicionados en la sección transversal del perfil (Figura 124). Estos puntos no son sólo singulares geoméricamente (concentradores de tensiones) sino también por representar un defecto en la microestructural del perfil relleno. Consecuentemente son candidatos para el inicio del fallo y generación de grietas longitudinales.

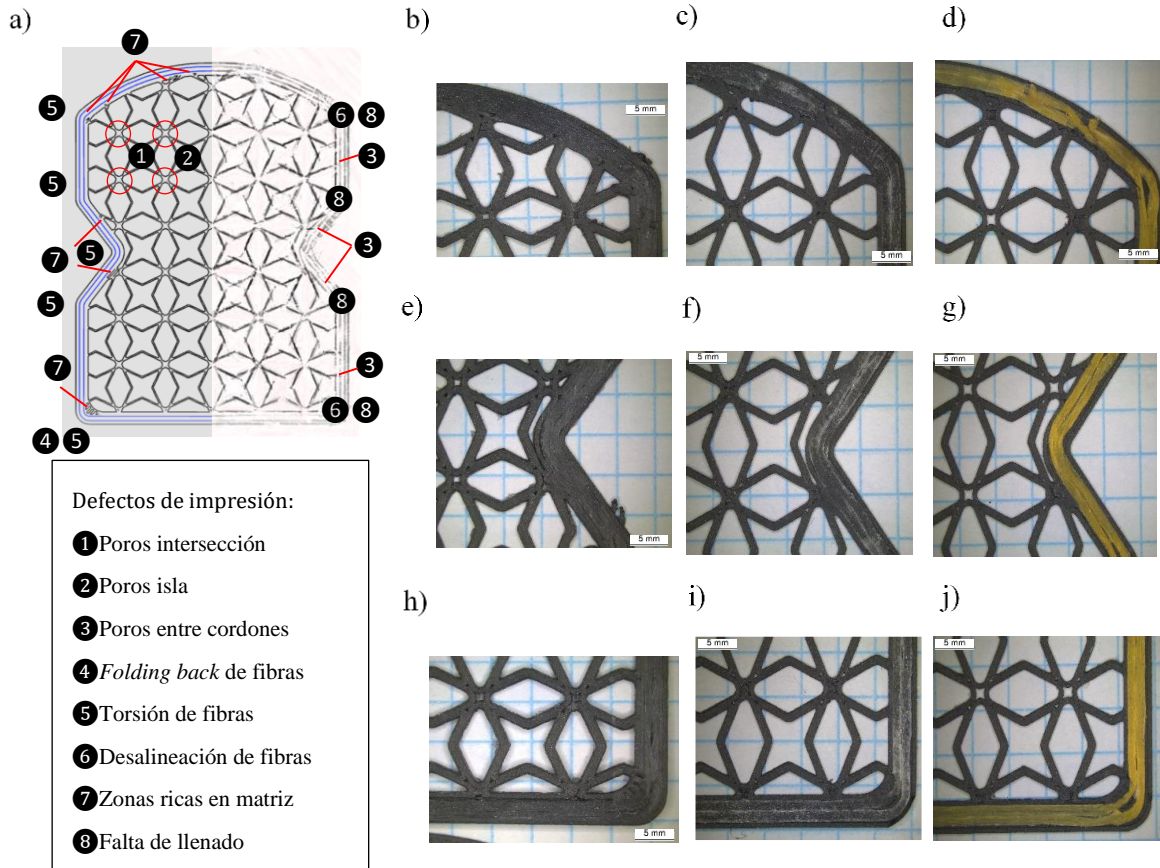


Figura 124. a) Distribución de defectos de impresión; b-d) ondulaciones, poros de isla e intersección, radios no intencionados y falta de material, e-g) poros entre cordones, torsión de fibras y zonas ricas en matriz y h-j) torsión, *folding back* de fibras y falta de material.

7.3.2. Caracterización mecánica de los perfiles rellenos

7.3.2.1. Ensayo de impacto radial

Las curvas de impacto radial de los perfiles rellenos se muestran en la Figura 125 y las propiedades principales a impacto se resumen en Tabla 33. Se han identificado notables diferencias entre el colapso del perfil CDD y los demás. El perfil relleno CDD es la configuración con la menor capacidad de absorción de energía, ya que presenta un fallo frágil y un colapso inestable, mientras que la GDD y KDD han formado rótulas plásticas que indujeron un fallo progresivo del perfil.

La capacidad de absorción de energía de impacto del perfil CDD es limitada (12 kJ/kg), y su nivel de carga máxima alcanzado en el perfil CDD (95,7 kN) es inferior comparado con la capacidad de GDD (136,2 kN) y KDD (135,3 kN). El perfil KDD ha presentado los mejores valores de *SEA* 20,6 kJ/kg, los cuales son un 16% y un 72% superiores a los obtenidos por los perfiles GDD y CDD, respectivamente.

Tabla 33. Resultados de impacto radial de perfil rellenos.

Ref.	P_{mean} (kN)	P_{max} (kN)	CFE (%)	SE (%)	m_r (g)	SEA (kJ/kg)	Modo fallo
CDD	15,8 ($\pm 0,8$)	95,7 ($\pm 8,9$)	17	75	99	12,0 ($\pm 0,6$)	Inestable
GDD	24,0 ($\pm 0,1$)	136,2 ($\pm 4,6$)	18	79	99	17,7 ($\pm 0,9$)	Estable
KDD	23,8 ($\pm 1,0$)	135,3 ($\pm 8,3$)	18	79	87	20,6 ($\pm 0,1$)	Estable

En la Figura 126, se muestran los patrones de colapso de los tres perfiles. Para el perfil CDD (Figura 126a), la rotura se produce en el punto medio de la parte superior del perfil, seguido de roturas a ambos lados en la zona del radio superior. Al producirse la fractura del perfil en los primeros estadios del colapso, se produce la cortadura y despegue del núcleo-perfil. Consecuentemente, el colapso del núcleo es independiente del colapso del perfil y la disipación de energía es menor.

En el caso del perfil GDD (Figura 126b), la generación de rotulas plásticas, permite al perfil deformarse, y al núcleo plegarse y densificarse. El proceso del colapso del núcleo comienza en las celdas superiores. Cabe destacar, que se produce desuniones puntuales entre núcleo y perfil pero que no afecta al colapso global del perfil. Según avanza el proceso de colapso del perfil relleno, se produce una segunda densificación en la zona de la corrugación donde el perfil se contrae. El modo de plegado bidireccional permite al núcleo colapsar tanto horizontalmente como verticalmente. Cuando las caras superiores e inferiores contactan en la zona de la corrugación, se producen finalmente rotulas plásticas en los radios inferiores, promoviendo aún más la contracción horizontal del perfil. Se ha observado que el perfil GDD no se expande en dirección longitudinal, manteniendo su longitud inicial.

De manera análoga, se produce el colapso del perfil KDD, con ciertas particularidades; el perfil se expande en la dirección longitudinal debido al mecanismo de cortadura entre capas, el cual se produce de forma simultánea al colapso y densificación en el plano vertical. De hecho, la desconexión progresiva entre núcleo y perfil no produce en ningún momento la pérdida de la estabilidad estructural ni la capacidad de soportar la carga del perfil KDD.

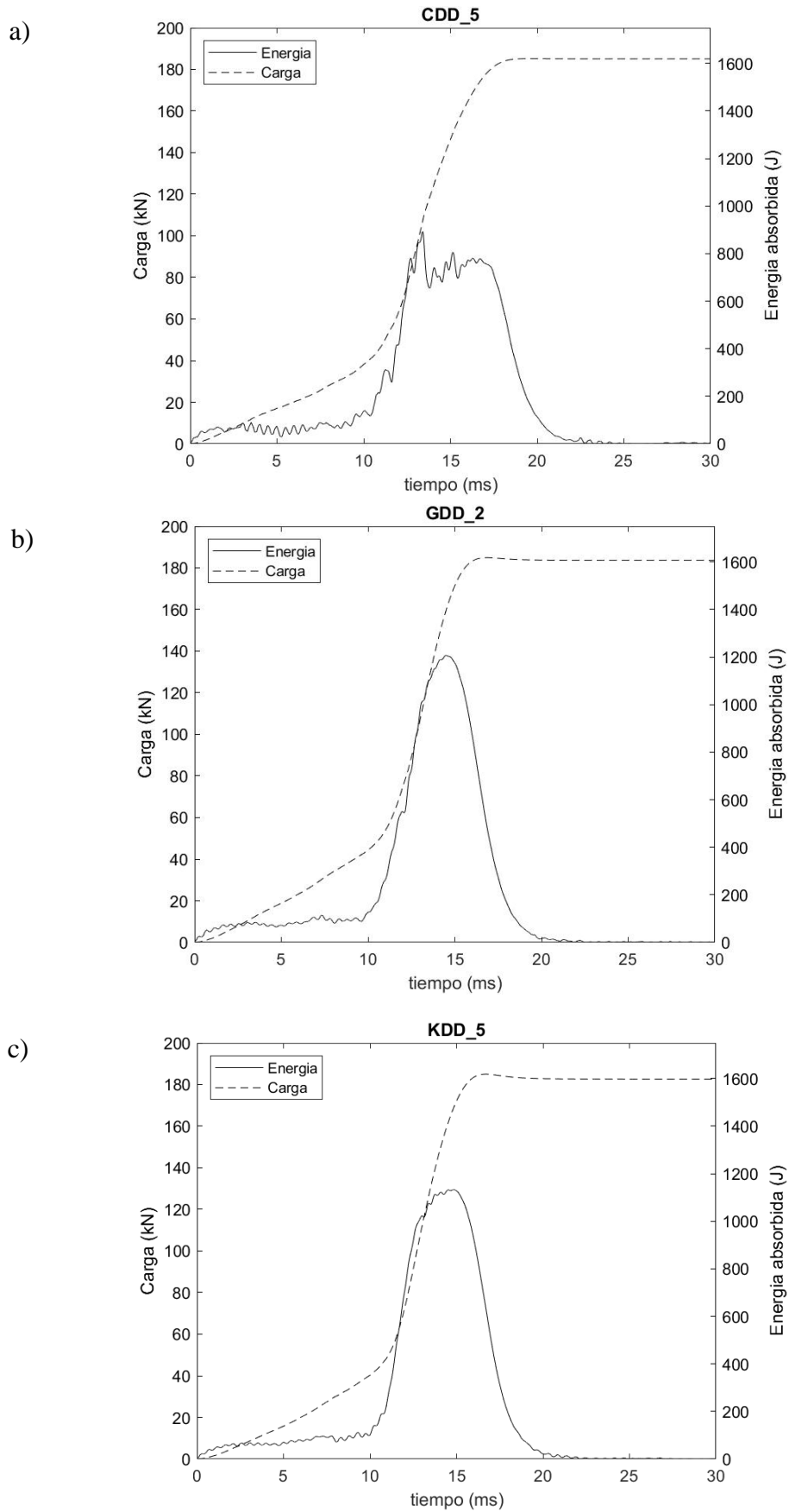


Figura 125. Curva de impacto radial de los perfiles rellenos; a) CDD, b) GDD and c) KDD.

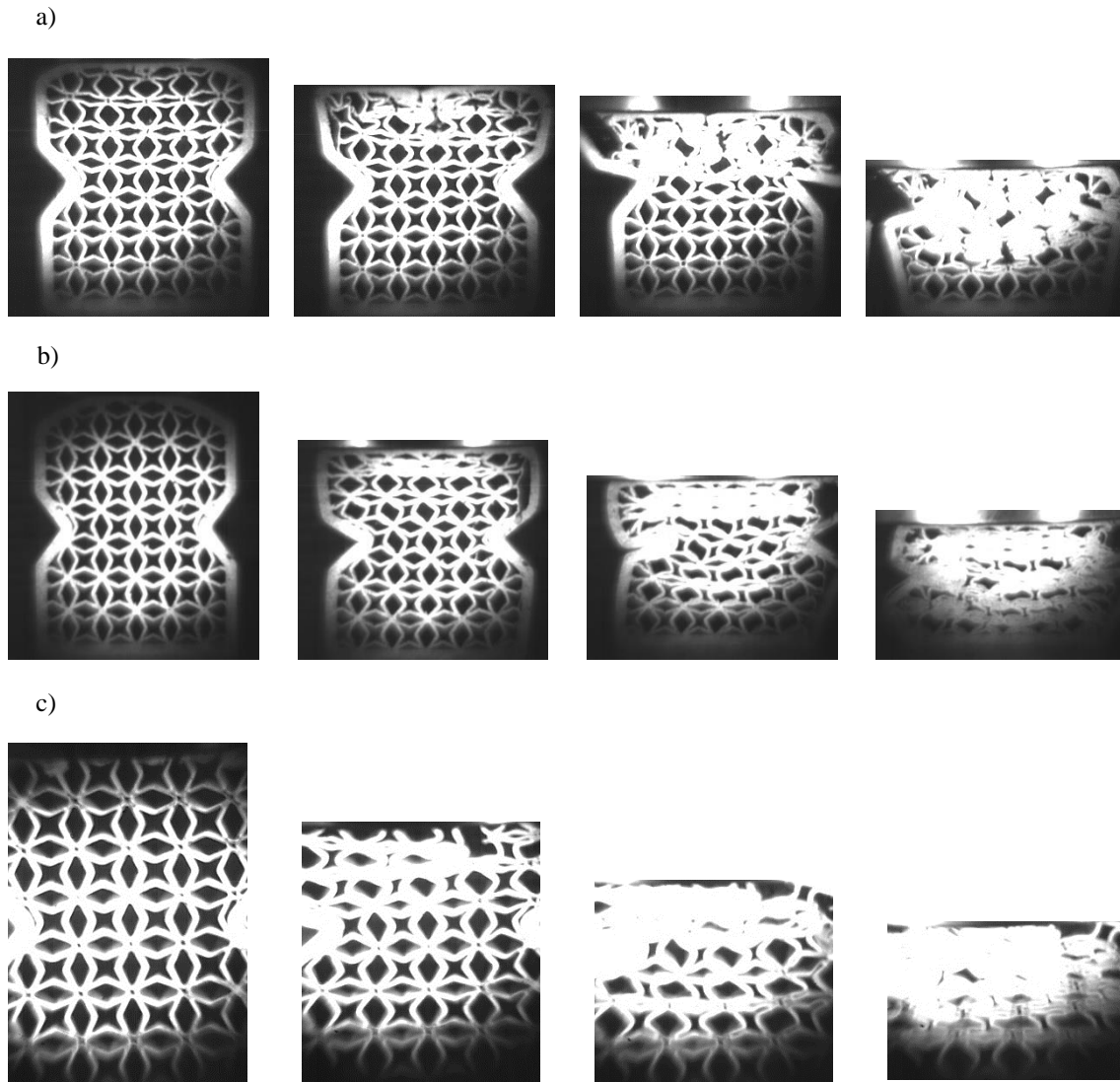


Figura 126. Patrones de colapso radial de los perfiles rellenos; a) CDD, b) GDD and c) KDD.

A continuación, se analizan los micro-mecanismos de deformación y fractura presentes en los perfiles post-impacto. Los perfiles KDD y GDD mostraron un fallo dúctil y posterior colapso progresivo, mientras que el perfil CDD dio una respuesta frágil seguido de un colapso inestable.

Los principales mecanismos de fractura presentes el perfil KDD han sido; cortadura y delaminación de matriz PA entre capas y entre cordones y, el despegue del núcleo-perfil. La combinación de ambos provocó la aparición de grietas a través de las capas y los cordones (Figura 127a-c), que aumentaron progresivamente, absorbiendo la energía de impacto de manera estable. La mayor cantidad de grietas generadas (en dos planos: entre capas y cordones) podría explicar la mayor capacidad de absorción de energía del KDD en comparación con los demás.

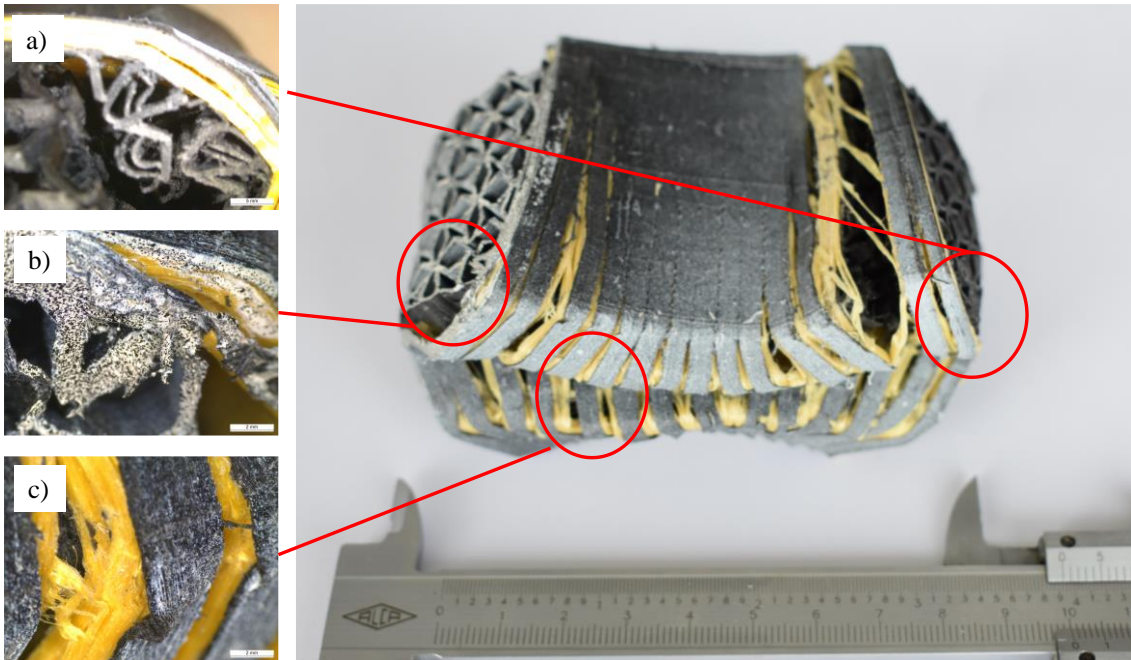


Figura 127. Perfil relleno KDD post-impacto. a) Delaminación entre capas y entre cordones, b) cortadura y despegue del núcleo y c) detalle de la delaminación intercapa y puentes de fibra de Kevlar®.

El perfil GDD también ha presentado un mecanismo de absorción basado en una delaminación entre cordones. Sin embargo, en el GDD no se ha encontrado ningún mecanismo de delaminación entre capas (Figura 128a-b). Adicionalmente se han observado mecanismos de rotura de fibras de vidrio en la zona de la corrugación (Figura 128c-d).

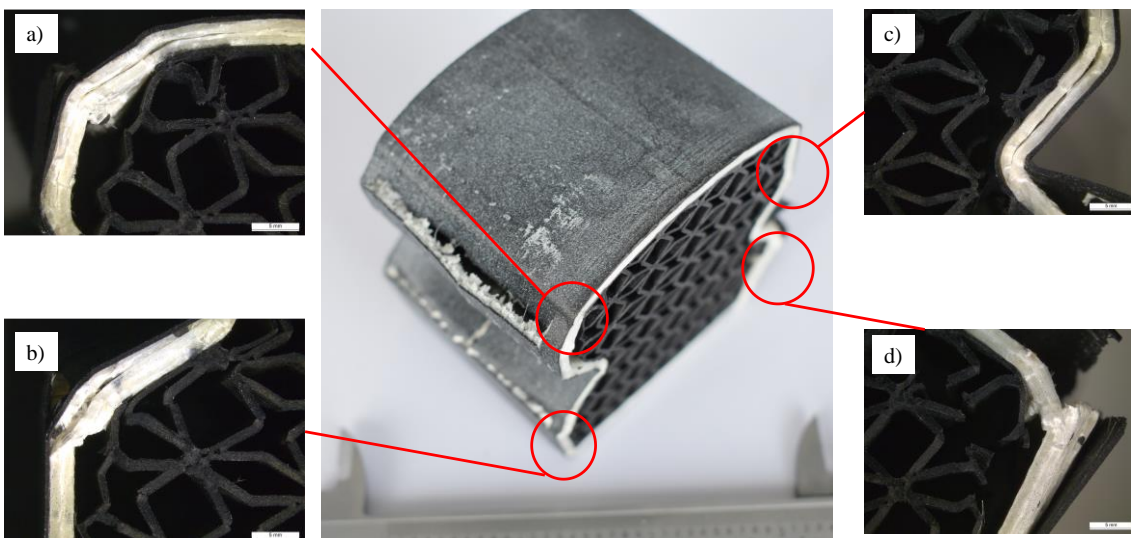


Figura 128. Perfil relleno GDD post-impacto. a) Delaminación entre cordones y despegue de núcleo-perfil, b) rotura de fibras, c) delaminación entre cordones y cortadura del núcleo y d) rotura de fibras.

El perfil CDD ha mostrado grietas longitudinales y rotura de fibras (Figura 129a-c), debido a la menor tenacidad y alargamiento a rotura del material cCF/PA [Iragi2019]. También se encontraron diferencias significativas en la formación de rótulas. Mientras que el mecanismo de flexión y desconexión de las láminas dio lugar a la formación de rótulas plásticas en las probetas KDD y GDD, el mecanismo de fractura en dirección transversal de la fibra provocó la rotura frágil de los anillos de CDD.

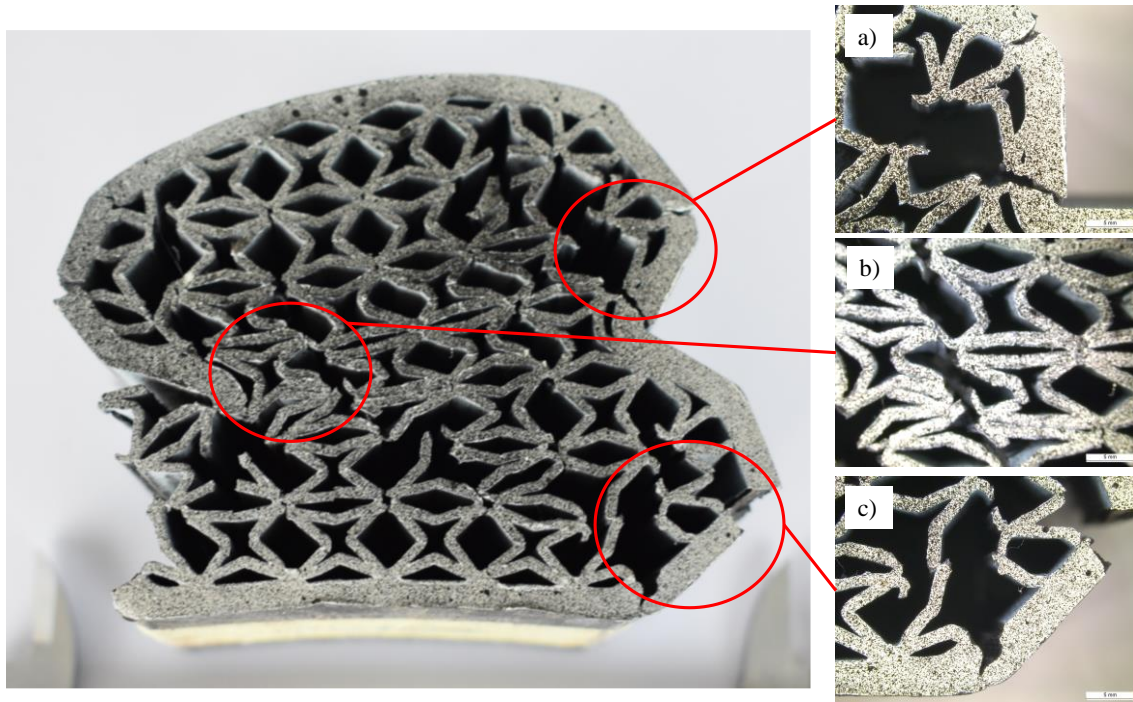


Figura 129. Perfil relleno CDD post-impacto. a) Rotura de fibras y cortadura del núcleo, b) Plegado y fractura del núcleo, en la corrugación y c) Rotura de fibras.

7.4. EFECTO SINÉRGICO: ABSORBEDORES DE ENERGÍA POR IMPRESIÓN 3D

Únicamente se ha observado un colapso combinado de perfil y núcleo para los perfiles relleno GDD y KDD, de acuerdo con las curvas de impacto (Figura 125b-c) y patrones de colapso (Figura 126b-c). Por ello, sólo en estos dos tipos de perfiles se ha observado un efecto sinérgico, por el cual los perfiles KDD y GDD multiplican su capacidad de absorción de energía con respecto de los perfiles huecos por un factor de 5,7 y 7 respectivamente. No se han encontrado, en la literatura, resultados de ensayos de impacto radial de perfiles con núcleos complejos de materiales compuestos termoplásticos, por lo que se han utilizados los resultados disponibles de la *SEA* radial de composites convencionales (Tabla 34). Los valores de *SEA* radial alcanzados en el presente capítulo muestran una mejora de *SEA* 35% superior a los valores de carga cuasi-estática.

Tabla 34. Valores de *SEA* para crush radial.

Perfil				Núcleo			
Material	Arquitectura refuerzo		Proceso fabricación	Material	Tipo	<i>SEA</i> (kJ/kg)	Reference
KF/Epoxy	Woven Fabric	0/90°	Filament winding	CF/Epoxy	Octogonal	3	[Mahdi2014]
KF/Epoxy	Woven Fabric	0/90°	Filament winding	CF/Epoxy	Hexagonal	2.1	[Mahdi2014]
cCF/PLA	Filamento	0°	cCF-3D Printing	cCF/PLA	Hexagonal	15	[Zeng2021]

7.5. CONCLUSIONES

En este apartado, se ha analizado la mejora del comportamiento frente a impacto y el aumento de la capacidad *SEA* de perfiles de poliamida reforzados de fibra continua con núcleos celulares complejos obtenidos mediante impresión 3D. Para ello, se ha seleccionado el tipo de núcleo auxético y el composite cFF para el contorno del perfil relleno. Como resultado más destacado, es el efecto sinérgico producido por la combinación de perfil Fold y núcleo RSH. A continuación, se muestran las principales conclusiones obtenidas:

7.5.1. Selección y dimensionamiento del núcleo auxético

Se han encontrado defectos similares de falta de llenado en las tres estructuras, localizados principalmente en los puntos de intersección o vértices de las celdas unitarias. La porosidad no sólo influye en la rigidez del nodo y el modo de colapso del núcleo auxético, sino también en el modo de fallo por cortadura.

La estructura doblemente reentrante de RSH, es la estructura celular que presenta las mejores propiedades de compresión en el plano y además es la única que no presenta reducción en sus propiedades de absorción debido la carga de impacto.

7.5.2. Selección del composite

La geometría del perfil hueco es más esbelta que en los capítulos 5 y 6 y limita la absorción de energía debido a una carga de pandeo inferior y, por lo tanto, se reduce los valores de *SEA* bajo carga cuasi-estática como dinámica. Dado que los radios son más amplios no se han encontrado evidencias de defectos ni *folding-back* ni roturas de las fibras. Sin embargo, si se han encontrado evidencias de torsión de fibra, desalineaciones de fibras, trayectorias curvas no deseadas y poros entre cordones. Estos defectos se han encontrado magnificados en los perfiles de cKF/PA.

La naturaleza semi-cristalina de la matrix de cGF/PA y cKF/PA permite alcanzar valores de *SEA* superiores a los de cCF/PA, debido a un efecto de ablandamiento al superar la temperatura de transición vítrea durante el impacto. Añadido a una peor adherencia interlaminar de la matriz (entre capas y entre cordones), permite a cKF/PA absorber mayores niveles de energía de forma estable y progresiva, generando una mayor cantidad de grietas. La baja tenacidad a la fractura de las fibras de carbono explica los niveles más bajos de *SEA* obtenidos para los perfiles de cCF/PA.

7.5.3. Efecto combinado de núcleo y perfil

La capacidad de absorción de energía de los perfiles se ha visto aumentada gracias al núcleo auxético. Esto se debe a un efecto sinérgico entre núcleo-perfil seleccionado y su colapso combinado, alcanzando unos valores de *SEA* entre 6-8 veces superior con respecto de los perfiles huecos.

El valor de *SEA* radial más alto alcanzado en el presente capítulo se ha obtenido para el perfil relleno KDD (20,6 kJ/kg) lo que supone una mejora de *SEA* 35% con respecto de los valores de bibliografía (Tabla 34). Los valores de *SEA* alcanzado para el GDD y el CDD son inferiores, un 16 y 71%, respectivamente.

El efecto sinérgico es debido al colapso y la densificación progresiva del núcleo y por ello permite al perfil soportar un nivel de carga superior, y por ende absorber mayores niveles de energía. Los mecanismos de colapso observados en el KDD se basan en la cortadura del núcleo, fractura de la unión núcleo-perfil y delaminaciones entre capas y cordones del perfil, sin signos de rotura de fibras. En el GDD, únicamente se han observado mecanismos de cortadura del núcleo, rotura de fibras y delaminaciones entre cordones. En el CDD, no se han encontrado mecanismos de delaminaciones de ningún tipo en este perfil.

Capítulo 8

Sobreimpresión 3D

CAPÍTULO 8

Sobreimpresión 3D

El presente capítulo analiza la hibridación de dos tecnologías fabricación de composite de fibra continua: termo-conformado de *organo-sheet* con la impresión 3D-cFF.

El objetivo de este estudio es analizar efecto de la temperatura del sustrato en la adherencia de la unión sobreimpresa. Para ello, se han caracterizado térmicamente (DSC) tanto el sustrato (*organo-sheet*) como el filamento (cCF/PA) y se han llevado a cabo ensayos de cortadura. También se han analizado y comparado los micro-mecanismos de fractura de la intercara de unión.

8.1. OPTIMIZACIÓN PARAMETROS PROCESO SOBREIMPRESIÓN

8.1.1. Caracterización mecánica del material sobreimpreso

8.1.1.1. Ensayos de cortadura

Las curvas de fuerza-desplazamiento de los ensayos de cortadura para las cuatro temperaturas de intercara analizadas, se muestran en la Figura 130. Se observa que la fase inicial de carga es la misma para todas las probetas. La respuesta lineal se desarrolla hasta aproximadamente 0,4 kN, seguida de un punto de inflexión y una segunda zona de pendiente inferior. La extensión de esta segunda zona es aproximadamente de 0,22 mm, similar para todas las probetas. A continuación, y tras un segundo punto de inflexión, la carga aumenta con una pendiente mayor hasta que se produce la rotura final. Las principales diferencias se han encontrado en esta región final, resultando que los valores de alargamiento a la rotura y F_s aumentan con el T_i , alcanzándose valores similares para temperatura de 167,5 °C y 177,5 °C. De hecho, las diferencias encontradas entre estos valores F_s , se encuentran dentro del rango de error experimental del ensayo.

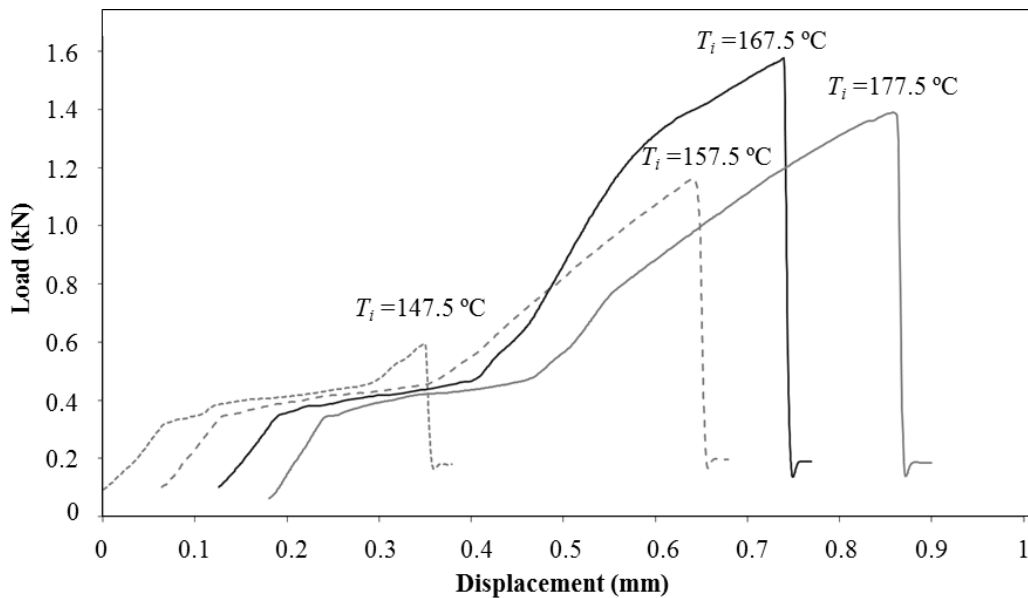


Figura 130. Curvas de los ensayos de cortadura para las cuatro temperaturas de intercara analizados.

(*) Las curvas han sido desplazadas para facilitar la interpretación.

La singularidad en la forma de cada una de las curvas de cortadura se puede justificar a través de los micro-mecanismos de deformación y fractura que producen durante el ensayo. El aspecto de la intercara de las probetas sobreimpresa se muestra en la Figura 131. La intercara original (*as printed*) se muestra en la Figura 131a, mientras que las superficies de fractura de las probetas sobreimpresas a 157,5 y 177,5 °C se presentan en la Figura 131b-c, respectivamente.

Inicialmente se debe analizar la intercara original sobreimpresa para comprender las diferencias entre los modos de fallo de las probetas. Para ello, se observa que la capa exterior de PA6 está intacta, con una orientación de los cordones de impresión a 90° y una buena adherencia entre las capas de piel de PA6 y las interiores de cCF/PA.

Como resultado más significativo, cabe señalar que en todas las probetas ensayadas la fractura en la intercara se produce entre la *organo-sheet* y el composite sobreimpreso. En cuanto a los micro-mecanismos de fractura, se pueden identificar dos tipos de modos de fallo: a) delaminación de la intercara para probetas sobreimpresas por debajo de T_i 167,5 °C, y b) fallo por cortadura para aquellas imprimidas por encima de 167,5 °C.

En lo que se refiera al fallo por delaminación, en la Figura 131b, se distinguen dos zonas en la superficie de la fractura; a) una zona rugosa, debida a la plastificación y posterior desgarro del material, formando bandas estrechas debido al esfuerzo cortante, y b) otra zona lisa y sin signos aparentes de daño, donde las líneas de extrusión verticales aún son visibles. La distribución no uniforme de ambas zonas a lo largo de la superficie de fallo indica una falta de homogeneidad y una baja resistencia de la unión para estas condiciones de sobreimpresión. Para el modo de fallo por cortadura, no obstante, los micro-mecanismos de cortadura y desgarro están distribuidos de forma uniforme (Figura 131c), y las líneas de extrusión iniciales (ver Figura 131a) han desaparecido.

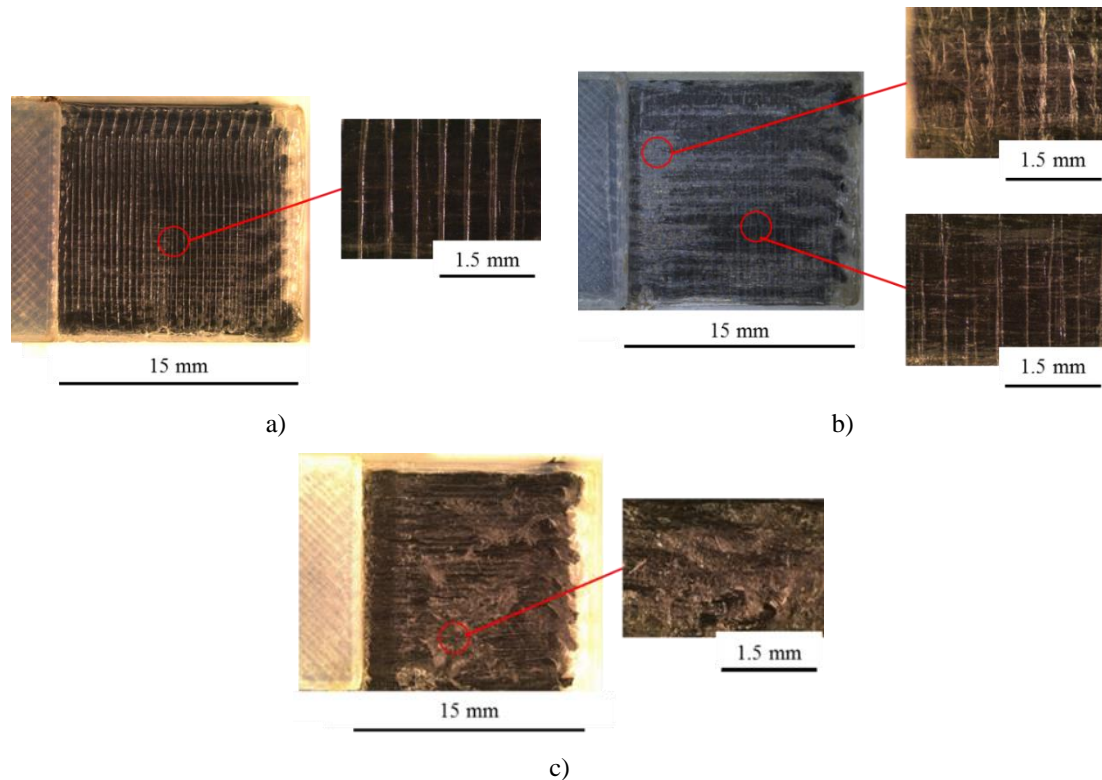


Figura 131. Detalle de las diferentes morfologías de intercara sobreimpresas; a) intercara original, b) superficie de fractura de la probeta con T_i (157,5 °C), y c) superficie de fractura de la probeta con T_i (177,5 °C).

8.1.2. Relación entre parámetros de proceso de sobreimpresión y propiedades mecánicas

8.1.2.1. Adherencia de la unión

Las diferencias, tanto cualitativas como cuantitativas, encontradas en la unión dependen de la temperatura de la intercara de sobreimpresión. Por ello, la caracterización térmica del sustrato y su comportamiento de fusión es fundamental en el análisis de las propiedades de adherencia de la unión.

La Figura 132 muestra un único pico endotérmico (estrecho), en torno a los 150 °C y el área bajo el pico máximo revela que la cristalinidad es baja. Adicionalmente, en la Figura 132, se puede observar la variación de la resistencia de cortadura (τ) con la temperatura de la intercara:

Para valores de T_i por debajo de la temperatura máxima, solamente se funde una pequeña cantidad de material. En consecuencia, como se puede observar en la Figura 132b, la unión resultante es débil y su τ es baja (2,4 MPa).

Para valores de T_i igual a 157,5 °C, a pesar de que la temperatura de la intercara está por encima del pico de temperatura de fusión, todavía existe una fracción del material en estado sólido. Para las probetas con un T_i (claramente) por encima del pico de fusión, la matriz del sustrato está completamente fundida y por lo tanto se obtiene una intercara más resistente. Este hecho se corresponde con un modo de fallo por cortadura (Figura 131c) y valores de resistencia más altos (5,7 MPa).

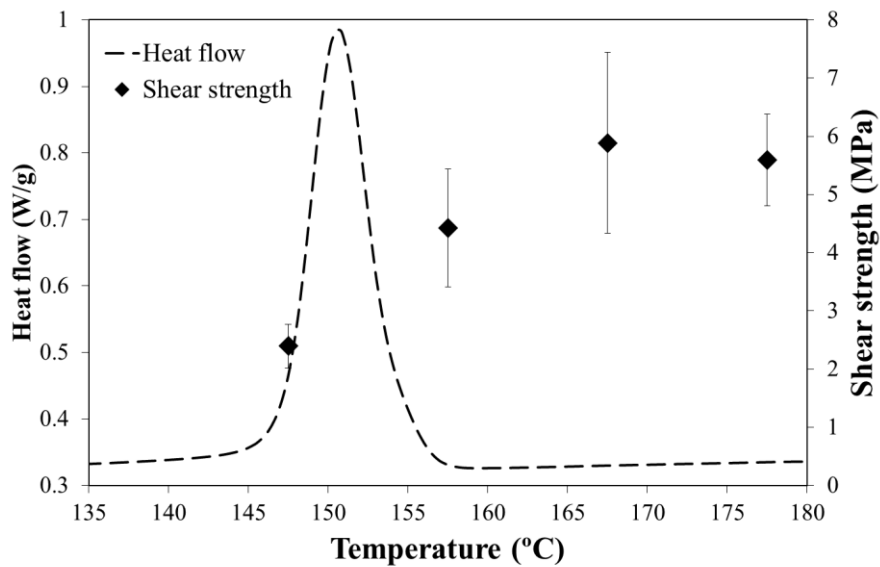


Figura 132. Pico de fusión del sustrato y resistencia a cortadura de las intercaras a diferentes temperaturas.

8.2. CONCLUSIONES

Como conclusión de este apartado de tecnología de sobreimpresión 3D, cabe mencionar que se ha demostrado la viabilidad de este nuevo proceso de fabricación híbrido, que combina un proceso convencional como es la estampación de *organo-sheet* de PA12 reforzadas con fibra de carbono y la impresión 3D-cFF.

El factor clave es la temperatura de la intercara ya que la resistencia a la cortadura aumenta con el aumento de temperatura, y una vez que supera la temperatura máxima de fusión del sustrato, la resistencia llega a un máximo. Por tanto, se concluye que existe una temperatura óptima para cual se puede encontrar un punto de equilibrio entre las prestaciones mecánicas y la rentabilidad del proceso.

No obstante, se han identificado otros parámetros del proceso como la temperatura de extrusión o la presión de compactación, o tratamientos superficies como los texturizados o la adición de adhesivos tipos *hot-melt*, que pueden mejorar las propiedades de adhesión entre el sustrato y el proceso de sobreimpresión 3D.

Capítulo 9

Explotación de resultados

CAPÍTULO 9

Explotación de resultados

En este capítulo se explora las posibilidades de validación del potencial de negocio/oportunidad a través de los resultados obtenidos en la presente tesis doctoral. Para ello, en primer lugar, se presenta la metodología empleada para la creación de la *Startup*. A continuación, se reflexiona a través del *Business case* sobre el potencial de la tecnología para su industrialización y se propone un modelo de negocio basado en la metodología *Lean Startup*, que es un proceso iterativo utilizado para pasar de proyecto a empresa poniendo el foco en las necesidades del cliente.

9.1. INTRODUCCIÓN

La Economía Circular viene a romper con los sistemas de fabricación tradicionales basados en economía lineales donde los productos manufacturados eran desechados una vez alcanzada su vida útil. Esta nueva filosofía de fabricación prevé el reaprovechamiento de los residuos, rechazos y/o productos usados a través del reciclado, reintroduciéndolos en sistema de fabricación mediante un *upgrade* (Figura 133). Con ello se consigue:

- Reducir el consumo en material primas.
- Reducir el consumo de energía para producirlas.
- Reducir el volumen de residuos.

Se busca desacoplar del consumo de materiales y la generación de residuos mediante el impulso de medidas de Economía Circular [Ellen2018].

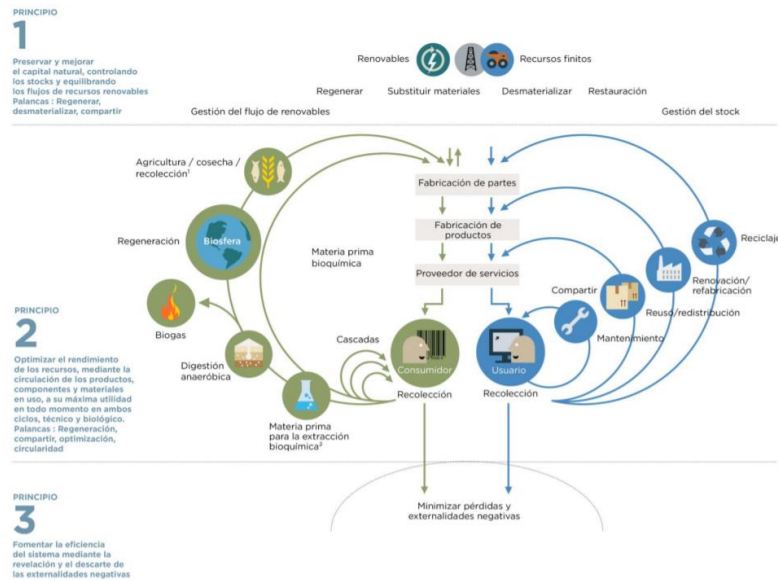


Figura 133. Transformación hacia la Economía Circular [Ellen2018].

Aunque el impulso para el empleo de la Economía Circular podría responder a unas reivindicaciones de sostenibilidad medioambiental, de conciencia social y de lucha contra el cambio climático, sino que también se trata de una motivación empresarial. El beneficio económico de la aplicación de la Economía Circular es claro (Figura 134), además de cumplir de manera colateral con la actual legislación medioambiental [ProyectoEC2018].

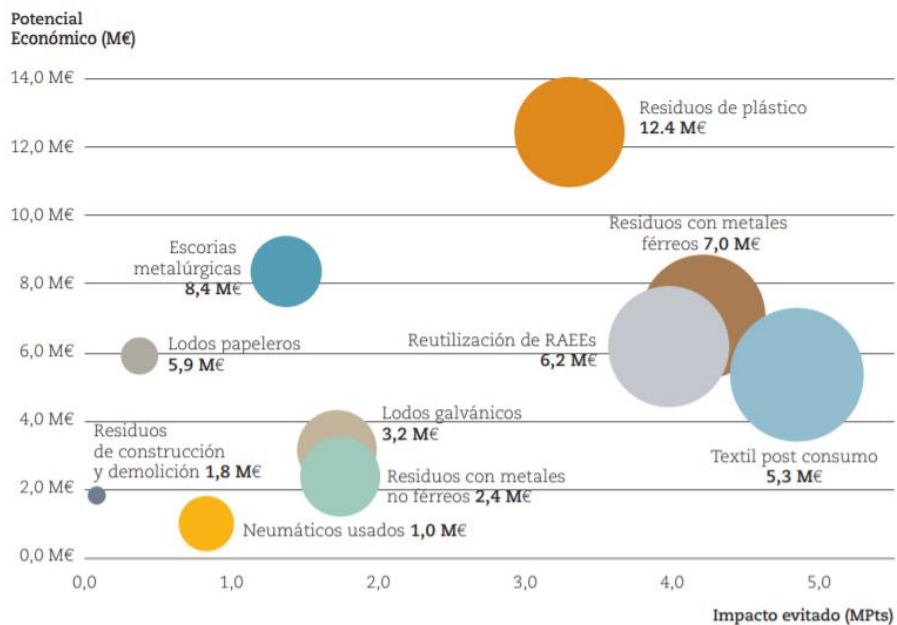


Figura 134. Potencial económico e impacto ambiental de ciclo de vida evitable de los materiales contenido en flujos de residuos con destino a los vertederos (Mil puntos de *Recipe/Ecoinvent*) [ProyectoEC2018].

Por otro lado, la fabricación de materiales poliméricos con buenas propiedades mecánicas, térmicas aislantes y peso reducido evitan a su vez, el cambio climático dado que permiten a nuestros vehículos aumentar su autonomía y conservar mejor el calor de nuestras casas (Figura 135).

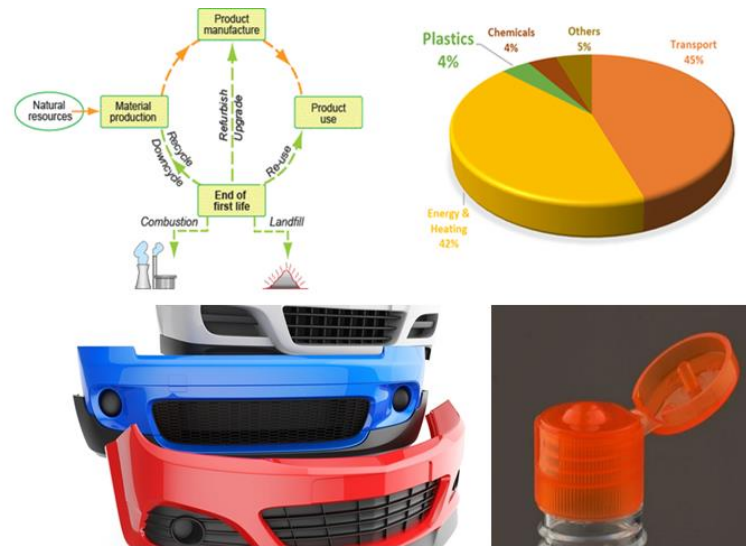


Figura 135. Concepto de economía circular aplicada a la fabricación de materiales poliméricos.

Fuente: CES EdupPack (Ecoaudit).

9.2. IMPACTO

9.2.1. Reciclaje de plásticos

Para las empresas la Economía Circular y el uso eficiente de materiales puede suponer mejorar significativamente en su situación competitiva, rentabilidad y sostenibilidad (*People, Planet and Profit*). En Euskadi, se han identificado cinco líneas prioritarias en Economía Circular: el ecodiseño; la re-manufactura y reparación avanzada; la servitización; el reciclado de residuos conteniendo metales clave; y los plásticos. La mejora de los procesos de reciclaje y el consiguiente aumento del flujo de material reciclado supondría un descenso de la necesidad de importaciones y una disminución de la extracción de recursos naturales domésticos, contribuyendo a una economía más circular. En la comunidad autónoma vasca se han identificado oportunidades para la EC para el sector automoción (en menor medida en FFCC) y su cadena de valor, concretamente en la industria de los plásticos, composites y caucho. Así como en las etapas del ciclo de vida correspondiente a la obtención de materias primas y de fin de vida (Figura 136) [Diagnostico2018].

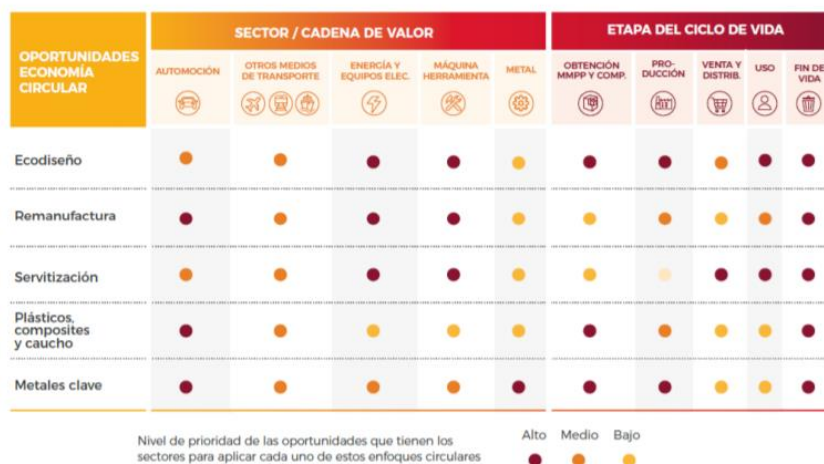


Figura 136. Oportunidades de la Economía Circular por sector de actividad y etapas de ciclo de vida [Diagnostico2018].

El potencial de las oportunidades de Economía Circular no se está aprovechando. La oportunidad asociada a la remanufactura es la menos desarrollada y al ecodiseño la que más implantación ha tenido. Las empresas que ven las ventajas competitivas que podrían obtener de la implementación de estas estrategias requieren de financiación. Entre los retos de la Economía Circular del sector de automoción (otros transportes como el FFCC) en Euskadi, se encuentran: la innovación en materiales (avanzados y sostenibles), procesos y productos, reducir el consumo de las materias primas, prolongar la vida útil de los productos y la generación de residuos e incrementar el uso de materias primas secundarias [EstrategiaEC2020].

La Estrategia 2030 de Economía Circular de Euskadi fija tres objetivos estratégicos:

- Aumentar en un 30 % la productividad material
- Aumentar en un 30 % la tasa de uso de material circular.
- Reducir en un 30 % la tasa de generación de residuos por unidad de PIB.

La Comunicación «Cerrar el círculo: un Plan de Acción de la UE para la Economía Circular», aprobada por la Comisión Europea en diciembre de 2015, identifica varias líneas de actuación fundamentales: 1) Diseño de producto. 2) Proceso de producción eficiente. 3) Consumo. 4) Gestión de residuos. 5) Mercado de materias primas secundarias.

De las 9 líneas de actuación definidas (Figura 137) para la consecución de los objetivos 2030: la gestión sostenible de residuos y materias primas secundarias, se alinean con aumentar la tasa de uso de material circular [EstrategiaEC2020].



Figura 137. Líneas de actuación 2030 [EstrategiaEC2020].

9.2.2. Tecnología de sobreimpresión 3D

La impresión 3D, es una de las tecnologías habilitadora de la *Industry 4.0* e identifica en la estrategia de especialización inteligente RIS3 de Euskadi, no es atractiva como tal ni por elevado coste, ni por elevado tiempo de fabricación. Lo verdaderamente interesante de la impresión 3D radica en la posibilidad de fabricación de geometrías complejas, junto con su fácil integración de la Economía Circular mediante tecnologías FFF, en base a filamentos o pellet de origen reciclados.

Por lo tanto, la hibridación de la impresión 3D con procesos de fabricación convencionales como el termo-conformado, moldeo por compresión, la inyección y/o extrusión de plásticos reforzados puede resultar la combinación perfecta. Es por ello, por lo que se busca un equilibrio entre coste/tiempo de fabricación aceptables y poder fabricar piezas complejas (con un nivel alto de detalle) con moldes más sencillos e intercambiables.

9.3. METODOLOGÍA *LEAN STARTUP*

Es una realidad que el 75 % de las *Startups* fracasan [York2018], algo que no es de extrañar dado que son organizaciones que crean nuevos productos en condiciones de gran incertidumbre [Rancic2012].

Este hecho implica que la elección de la metodología correcta para su creación es algo crucial. Existen multitud de ejemplos de nuevas empresas, que en un principio parecían prometedoras, pero que tras una gran inversión acaban precipitándose al desastre. Esta metodología, denominada *Lean Startup*, presenta tres principios clave por sus semejanzas con el *Lean Manufacturing* desarrollado por Toyota [York2018, Rancic2012, Llamas2018, Blank2013]:

- Resumir las hipótesis.
- Testear las hipótesis con el cliente.
- Desarrollar ágilmente el producto o servicio en colaboración con el cliente.

Para la realización del primer punto, Steve Blank [Blank2013] destaca la herramienta creada por Osterwalder y Pigneur [York2018, Osterwalder2010] denominada *Business Model Canvas* (BMC). El BMC se puede subdividir en 3 bloques: cómo crear, entregar y capturar valor. En ella se presentan todas las hipótesis separadas en dos bloques principales, la creación de la propuesta de valor en el mercado y cómo llevar a cabo dicha propuesta. Para la creación de la propuesta de valor, Osterwalder y Pigneur recomiendan el empleo de la herramienta conocida como *Value Proposition Canvas* (VPC), pensada para comparar las necesidades del cliente con la propuesta de valor [Osterwalder2010].

El segundo punto, se lleva a cabo mediante lo que se denomina producto mínimo viable (PMV), el cual consiste en la creación de un prototipo de mínimo coste, dirigido a confirmar las hipótesis generadas en el modelo de negocio. Una vez testeado el PMV, comienza el último punto, el cual consiste en escuchar y aprender del cliente para ajustar el producto final a sus necesidades reales. No obstante, es posible que el PMV no sea validado en la segunda fase, en ese caso, el emprendedor deberá pivotar y comenzar el proceso de nuevo [Llamas2018, Blank2013, Osterwalder2010].

A continuación, se desarrolla un modelo de negocio basado en la metodología *Lean Startup*, para la fabricación de protecciones frente al impacto de balasto en FFCC en un entorno o Ecosistema favorecedor del empleo de economía circular y la sobreimpresión 3D.

9.4. BUSINESS CASE

9.4.1. Business need/problem

Es importante destacar que las *Startups* más exitosas son aquellas que se centran en un único mercado [Rancic2012]. El intento de abarcar muchos mercados puede resultar en un fracaso por fraccionamiento de esfuerzos y, por lo tanto, el presente estudio se va a centrar en un único mercado, concretamente, en la industria del ferrocarril y en concretamente en sistemas de protección frente a impacto de balasto (Figura 138). Se han evaluado otros sectores como el sector de automoción y aeronáutico, sin embargo, se ha optado por comenzar por el sector ferroviario ya que los niveles exigidos en cuanto a productividad, plazo de suministro y/o homologación son menores. A pesar de ello, la tecnología y el concepto de sistema de fabricación basado en la definición de un ecosistema local se puede extrapolar a otros sectores y/o productos.



Figura 138. Modelo de negocio protecciones frente al impacto de balasto.

Las protecciones frente a impacto a balasto/hielo en FFCC vienen a representar:

- Protecciones del material rodante como los ejes de los bogies en formato de fundas y/o chaquetas.
- Paneles de protección de los sistemas auxiliares del tren como instalaciones neumáticas y/o aire acondicionado.
- Testeros o sistemas de protección contra impacto de obstáculos en vía.

A fin de acotar el análisis de explotación de resultado, se ha desarrollado únicamente en el modelo de negocio para el casquillo de protección de eje (Figura 139) y por ello, el enunciado de hipótesis y su contraste sólo se centran en él. Para la de hipótesis se ha propuesto un plan validación (visita y entrevista con algunos de agentes involucrados).

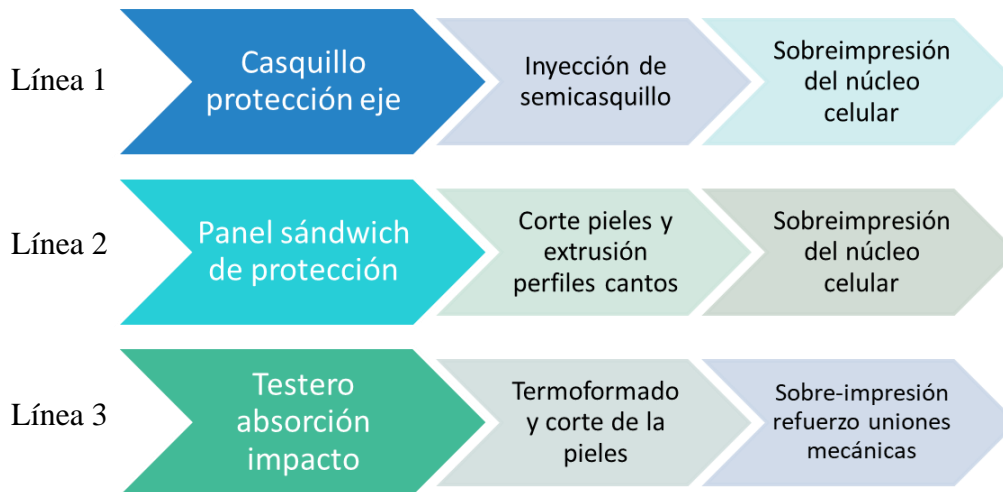


Figura 139. Definición de líneas de productos y flujos de entrada y salida de material.

Inicialmente sólo nos vamos a centrar en la fabricación de protección de eje, elemento crítico del bogie. El comportamiento a fatiga del eje se ve mermado debido a los daños producidos por el impacto del balasto, el cual salta e impacta con los bajos del tren a su paso. Dado que el desarrollo de la alta velocidad los conceptos/sistemas de protección frente a impacto han quedado obsoleto, así como la normativa de ensayo.

Existen en el mercado soluciones basadas en pinturas y/o recubrimientos difíciles de retirar para inspeccionar el eje montado (Figura 140).



Figura 140. Protecciones frente al balasto basado en pinturas o (recubrimientos). Fuente: Luccini RS.

Por otro lado, también existen en el mercado soluciones basadas en semi-casquillos fabricados en material polimérico que se unen mediante unión mecánica. Existen conceptos protegidos por patentes en vigor que cuentan con acanaladuras para evacuar agua o humedad que permiten combinar con la protección de corrosión (pintura) y una alta absorción de energía.

En la patente correspondiente a la compañía CAF S.A. (Figura 141) se basa en una carcasa de material termoplástico junto con tiras de material elastómero mientras que el diseño de SJ AB (Figura 142) se basa en un polietileno reticulado.

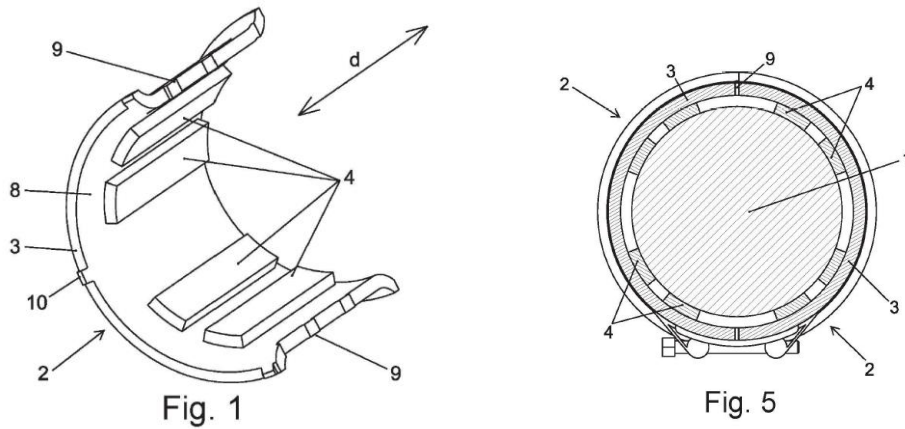


Figura 141. Protector de eje de rodadura (ES2647961B1). Titular patente: CAF S.A. [ES2647961B1]

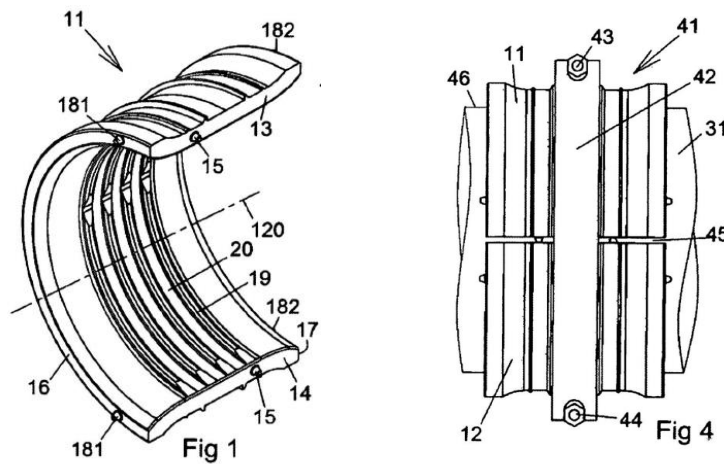


Figura 142. Cubierta de eje de rueda (ES2399383T). Titular patente: SJ AB.[ES2399383T].

9.4.2. Análisis DAFO

A continuación, se analizan las debilidades, amenazas, fortalezas y oportunidades para la fabricación de protecciones ferroviarias a partir de tecnologías de sobreimpresión 3D y materiales de impresión provenientes de un flujo economía circular. Este DAFO es el resumen de un análisis interno y un análisis externo llevado a cabo (Figura 143).



Figura 143. Análisis DAFO.

En primer lugar, se deben analizar las oportunidades actuales que ofrece creación de un ecosistema local en el entorno de la fabricación de protección ferroviarias a partir de la recogida y revalorización de residuos plásticos. La oportunidad de aumentar la circularidad de las materias, reduciendo los residuos generados. Y creando una red (mercado) de materias secundarias, evitando el envío vertederos.

La creación de un ecosistema local ubicado entre las comarcas de Oarsoaldea y Bidasoaldea, permite:

- gestión de los eficiente de los residuos industriales,
- creación de un flujo para su reutilización,
- transformación en nuevo modelo productivo, basado en la economía circular y la creación de productos de alto valor añadido.
- transformación de sociedad mediante la generación de nuevos puestos, mano de obra altamente cualificada y la creación de nuevas empresas de base tecnológica.

La situación del ecosistema es un enclave geografía (Figura 144) donde concurren:

- Estación internacional FFCC (Renfe/Adif y SNCF)

- Factorías de montaje y mantenimiento vehículo ferroviario (cocheras de Euskotren y factoría de CAF S.A.)
- Operadores logísticos mercancías (Railsider).

El tipo de industria afincada en la zona se centra en negocios:

- Construcciones y operaciones auxiliares para la fabricación, montaje y acabado para estructuras FFCC (corte, soldadura, ...)
- Industria transformadora del plástico inyección, extrusión y termo-conformado para el sector automoción
- Fabricante de molde inyección para sector automoción, envases y bienes de consumo.

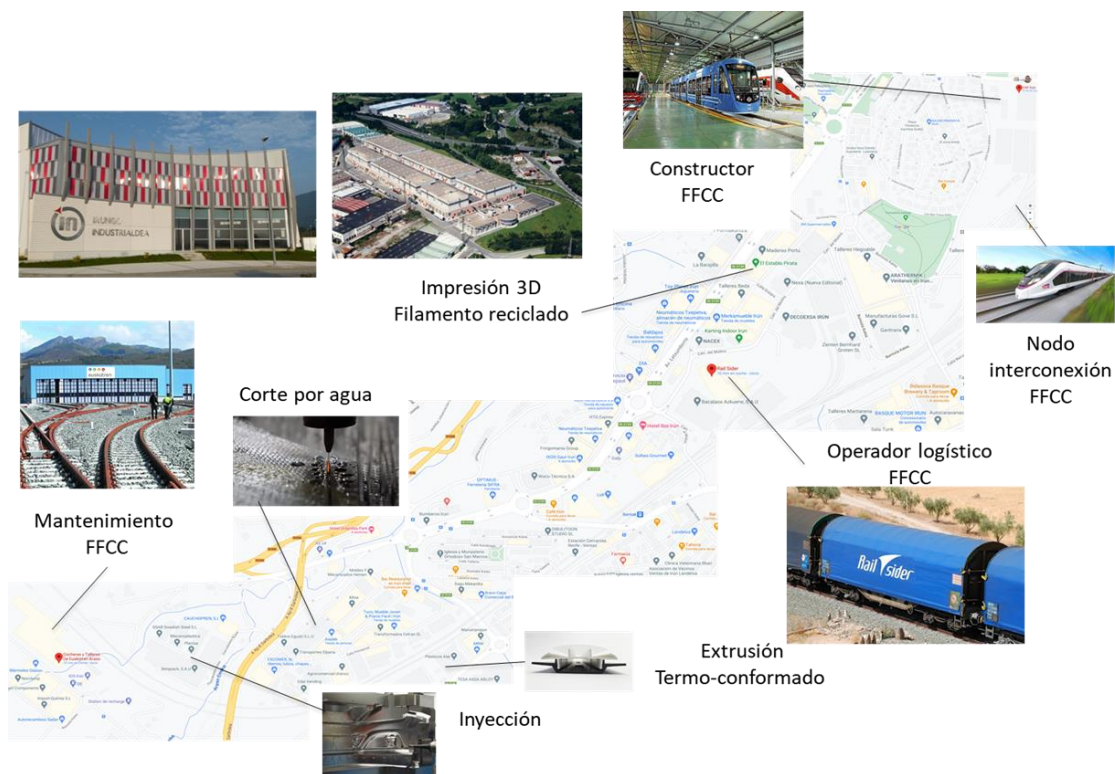


Figura 144. Definición del Ecosistema (Oarsoaldea-Bidasoalde)

[Garmulewicz2018] han observado que para la plena explotación de las capacidades de las tecnologías de impresión 3D y la economía circular existen barreras a cinco niveles: tecnológico, económico, sociocultural, organizacional y legislativo (regulación). Primeramente, se comenta que existe un vacío en el conocimiento de los materiales reciclados de origen local y/o susceptibles de ser utilizados para impresión 3D, la carencia

de puntos de recogida (local) y fabricación distribuida de nuevos productos revalorizados mediante impresión 3D. Por otro lado, se subraya que nosotros como consumidores no percibimos como tal el valor añadido de un producto impreso a partir de residuo reciclado. A otro nivel, se señala la falta de cualificación en tecnologías de fabricación y economía circular, así como la carencia de perfiles curriculares que formen a los técnicos especialistas en temas de sostenibilidad y creación de nuevos negocios a partir de las oportunidades que permite la economía circular. Se hace especial mención que existe una gran incertidumbre en cuanto a la regulación que permita la gestión y revalorización de los residuos, en muchos casos en manos de empresas privadas. Por último, se afirma que existe también barreras o reticencias en cuanto a la colaboración de empresas (ecosistemas) debidas a la falta de legislación en términos de Propiedad Intelectual derivada de la colaboración entre las empresas claves en la cadena de valor de los materiales reciclados para impresión 3D.

Entre las fortalezas cabe destacar que los composites de matriz termoplástica pueden disipar cinco veces más energía de impacto que los metales para un reduciendo del peso de hasta un 70 % [ParkCK2012]. Los composites de fibra discontinua (corta y/o larga) se han venido utilizando en el sector transporte por su compromiso prestaciones/coste/productividad. Tanto en el sector FFCC como el sector de automoción el coste unitario es el principal *driver* para el diseño de una pieza de protección. No obstante, la inversión en moldes y prensas de inyección es alta y por ello la industria de los composites está realizando un gran esfuerzo en desarrollar nuevos procesos y técnicas más rentables. Como ya se ha mencionado anteriormente, la impresión 3D no es competitiva ni por elevado coste, ni por elevado tiempo de fabricación. No obstante, se ha comprobado que la hibridación de tecnologías convencionales y la impresión 3D será capaz de abrir nuevos nichos de mercados ya que se aúnan las ventajas de ambas. Es por ello, que la concepción/diseño de una protección ferroviaria a partir de un proceso primeramente de inyección con un molde sencillo con apenas detalles que reduzcan su coste y aumente su productividad (facilitando en el llenado del molde) y posterior sobreimpresión de nervaduras o creces es muy interesante. Si a ello, le sumamos que el origen del filamento utilizado proviene de procesos de revalorización y reutilización de materiales compuestos, se torna doblemente interesante. Para el caso de estudio se ha optado por utilizar, a modo ilustrativo, una poliamida 6, plástico técnico ampliamente utilizado por sus altas prestaciones ingenieriles.

Las fuentes de generación de residuo/rechazo que se han identificado son:

- Retales y recortes provenientes de procesos de corte (por chorro de agua) de subproductos como laminados termoplásticos de fibra continua (*organo-sheet*).
- Bebederos y canales de inyección provenientes de procesos de inyección, así como las piezas de rechazadas.
- Soportes y desechos provenientes de procesos de impresión 3D, así como piezas impresas defectuosas.

Al reducir el volumen de material de desecho y rechazo, se prevé un ahorro en los costes de gestión de residuos y tasas medioambientales. Además de una reducción en los costes en materias primas. Cabe mencionar que a los materiales (pellet/filamento) revalorizados pueden ser reforzados por la adicción de fibras cortas (carbono o vidrio) durante el proceso de *upgrade* o si bien se mezcla plásticos de inyección sin reforzar con recortes de paneles de *organo-sheet*. En un primer demostrador, los materiales reciclados únicamente provienen de soportes de impresión y piezas 3D rechazadas.

Las ventajas de la impresión 3D se han mencionado anteriormente, como son la fabricación de geometrías complejas que permiten niveles de aligeramiento y aumento de la absorción de energía por empleo de estructuras auxéticas. El proceso de impresión mediante FFF es fácilmente integrable en otros procesos y/o automatizar, además de unos costes de inversiones relativamente bajos.

La tecnología de sobreimpresión 3D es relativamente novedosa frente a otras tecnologías como el sobremoldeo o sobreinyección. En ambos casos, exige un precalentamiento de la pieza substrato para conseguir una adhesión correcta de las capas sobreimpresas. Se asemeja a un proceso de unión soldadura térmica, por lo que la naturaleza y el dimensionamiento de la intercara limitan sus propiedades mecánicas. Por ello es de reseñar que existen ciertas debilidades (limitaciones e incertidumbres) en cuanto estos materiales en la actualidad:

- Comportamiento a impacto en condiciones de baja temperatura,
- Protección frente fuego.
- Compatibilidad con los hidrocarburos (aceites y grasas) presentes en los sistemas de rodadura y auxiliares bajo el tren.

- Comportamiento frente a fatiga rotaria, creep, relajación tensional o fluencia de la pieza en rotación.
- Equilibrado del sistema bogie protección, de acuerdo con las diferencias geometrías y de masa de las protecciones impresas.
- Sistema de recogida de las protecciones dañadas o totalmente rotas distribuidas por todo el territorio País Vasco/Nacional.

No obstante, se ha definido un proceso de fin de vida útil para las protecciones que no admitan más procesos de reciclaje, basado en un proceso depolimeración con el que obtener el monómero de partida. Este proceso vendría a sustituir el método tradicional de incineración y recuperación de energía remanente de todo material polimérico.

Entre las amenazas se han identificado, las siguientes:

- Nuevos materiales o conceptos de protección basados en poliuretanos termoplásticos (TPU).
- Nuevas tecnologías emergentes como el proceso Digital Light Processing (DLP), más rápido que las tecnologías FFF y con una gama de resinas fotocurables cada día más amplia.
- Cambio legislativo en la gestión de residuos industriales o tasa sobre los materiales plásticos.
- Dificultades para localizar/recoger las protecciones distribuidas por todo el territorio de la CAV o nacional. Es por ello, por lo que se han planteado replicar el Ecosistema de Oarsoaldea-Bidasoaldea en otros dos puntos geográficos: Badajoz/Elvas (conexión España-Portugal) y Portbou-Cerbère/Perpiñán (conexión España-Francia).

9.4.3. Stakeholder map

A continuación, se ha confeccionado un mapa (Figura 145) de los principales *stakeholders* involucrados en la definición de la cadena de valor y por lo tanto en el ecosistema que permita la fabricación de protecciones ferroviarias a partir de fuentes sostenibles. Estos *stakeholders* se han clasificado en cuatro grupos:

- OEMs (constructores), operadores y *End-users* de material rodante ferroviario. Dedicados a la fabricación del vehículo completo (Talgo, CAF, Siemens o Bombardier), fabricantes de subestructuras (CAF-MiiRA) y su mantenimiento, operadores logísticos de transporte de mercancías (ADIF, RAILSider, Euskotren-kargo, ...) y pasajeros (SNCF, Euskotren, ...). Todos ellos son los encargados de trasladar necesidades actuales y futuras del negocio ferroviario. Trabajan en la redacción de normativa, regulación y homologación de nuevas estructuras ferroviarias.
- Materiales y procesos para sobreimpresión 3D. Fabricantes de maquinarias, material primas, así como servicio de impresión 3D. Centrados en concebir nuevos conceptos/arquitecturas de máquina y materiales susceptibles de ser impresos en términos de calidad, fiabilidad y altas prestaciones. Adaptación del proceso a las necesidades del sector FFCC (normativa a fuego, propiedades a impacto y durabilidad). Poseen el conocimiento de las reglas de diseño y los parámetros óptimos del proceso de impresión.
- Materiales y procesos para transformación del plástico. Los fabricantes de molde para extrusión, inyección y termoformado son en ocasiones productores de componente (con y sin refuerzo). Poseen el conocimiento de los métodos de fabricación tradicional, optimización de la producción y la minimización de residuos. Su búsqueda se centra en encontrar la combinación prestaciones-coste-tiempo de fabricación exigida por el sector.
- Centros de investigación, asociaciones, clúster y plataformas/factorías 3D. Su labor se centra en el acompañamiento de las empresas en la búsqueda de nuevas soluciones innovadoras y técnico-económicamente viables para el sector FFCC. Seguridad, aligeramiento, sostenibilidad ahorro energético y de material son algunos de las líneas de investigación de estos centros. Preocupados y ocupados en la integración de nuevos materiales como los materiales compuestos reforzados multifuncionales y de origen sostenible y nuevas arquitecturas de vehículo. Las asociaciones y clúster deben promocionar e impulsar las nuevas tecnologías de impresión 3D, buscando nichos de mercado y aplicaciones que permitan desarrollar y afianzar las tecnologías aditivas. Por último, plataformas, *hub* y factorías que permiten testear nuevos conceptos estructurales, materiales y de proceso en entornos semi-industriales.

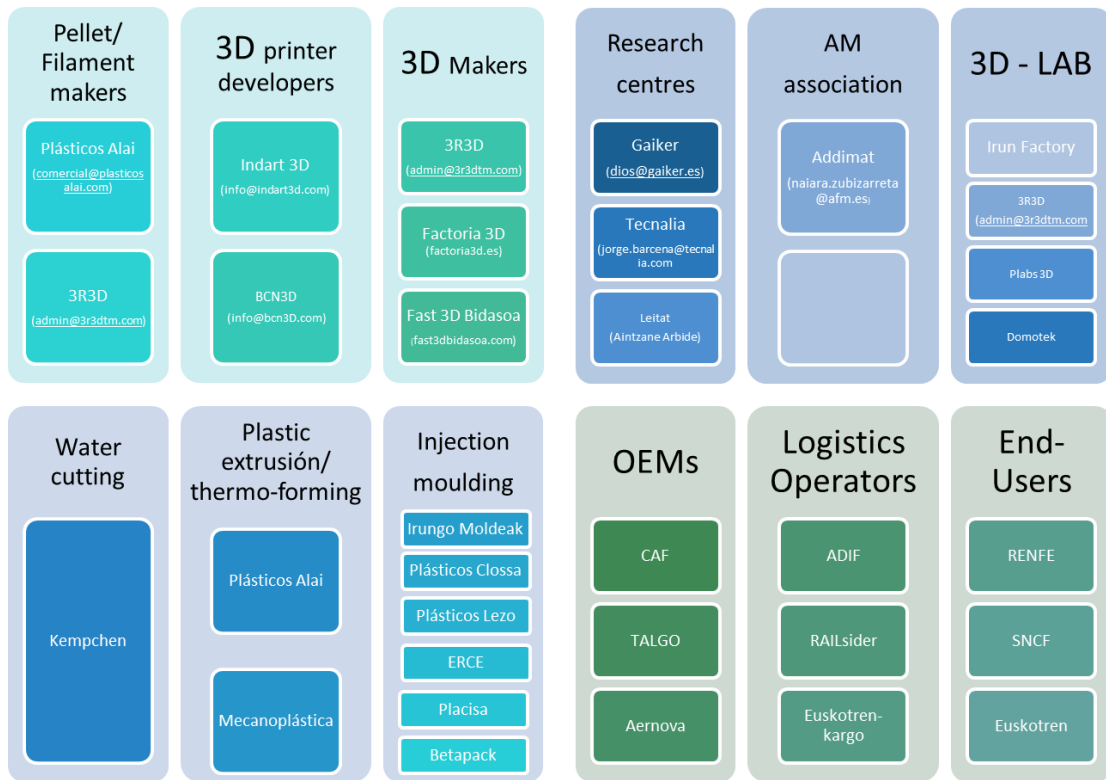


Figura 145. Stakeholder map.

9.4.4. Cadena de valor

A partir del mapa de *stakeholders* se ha diseñado la cadena valor (Figura 146), diagrama de flujo y una estructura de proyecto para la fabricación de las protecciones. En el que se han identificado los agentes implicados en la generación de cada una de las protecciones.

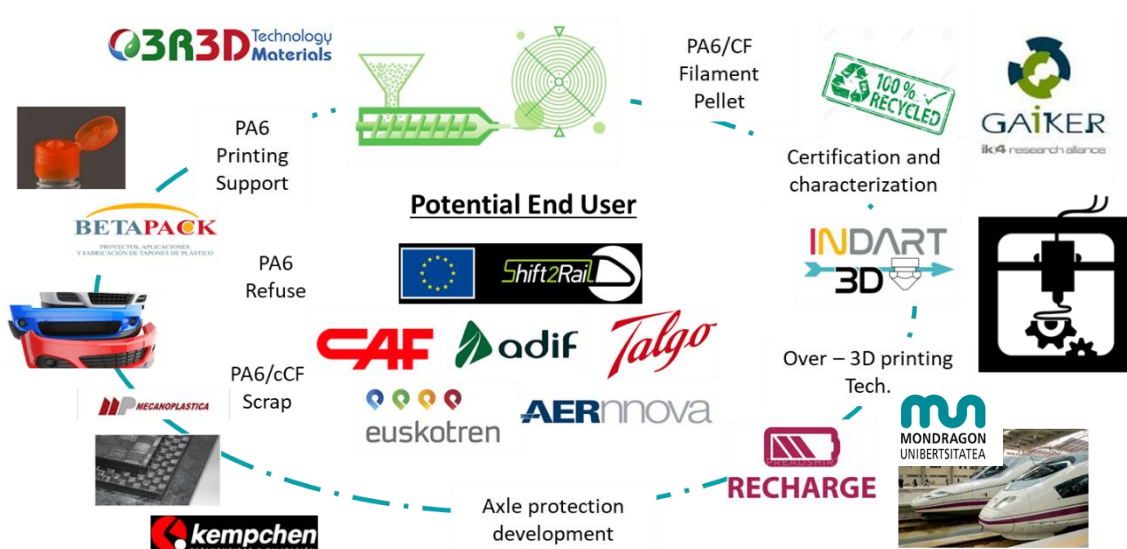


Figura 146. Cadena de valor.

9.5. VALUE PROPOSITION CANVAS

Mediante el VPC la futura *Startup* puede resumir sus hipótesis, las cuales se dividen en dos bloques principales: las necesidades del cliente (derecha) y la propuesta de valor (izquierda). El objetivo principal de esta herramienta consiste en poner en contraposición las necesidades y miedos del cliente, con la propuesta de valor que ofrece la *Startup* [York2018]. Una vez completado el lienzo, el emprendedor o emprendedores deberán evaluar si su propuesta de valor está realmente ligada con las necesidades del cliente.

Como ya se ha comentado, el modelo de negocio desarrollado en este capítulo está enfocado a la industria del ferrocarril, y concretamente a los OEMs de dicha industria. Por lo tanto, el VPC que se muestra en la Figura 147 está dirigido a este tipo de clientes.

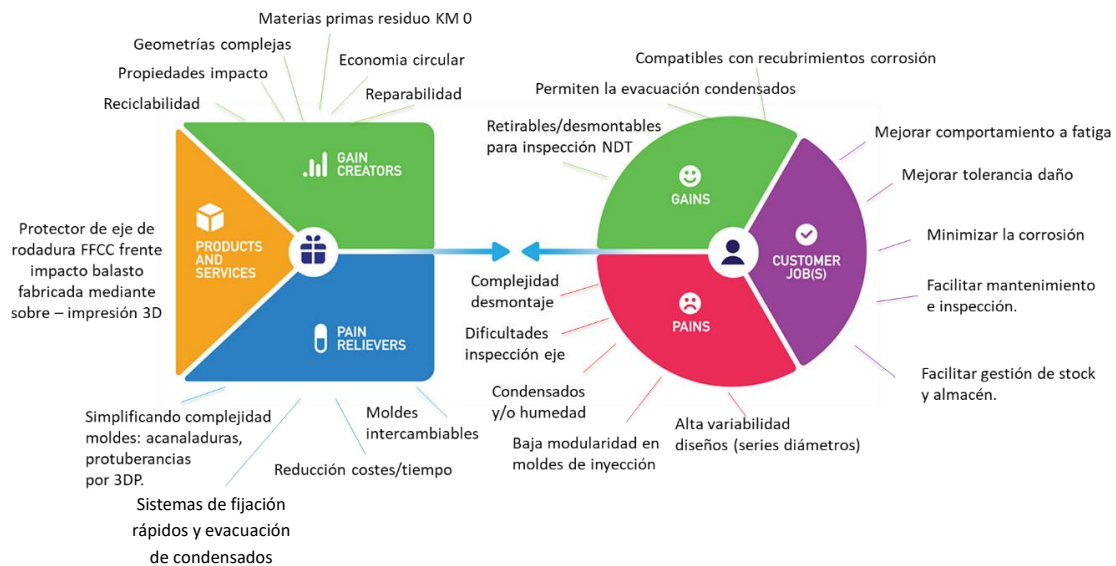


Figura 147. Value proposition canvas.

9.5.1. Necesidades del cliente

En este bloque se establecen las hipótesis relacionadas con los clientes potenciales de la *Startup*. Estas hipótesis deben reflejar qué esfuerzos está realizando el cliente para solucionar una problemática (*customer jobs*), qué problemática se quiere resolver mediante dichos esfuerzos (*gains*) y qué miedos o frustraciones tiene el cliente para adoptar una solución a la problemática (*pains*)

9.5.1.1. *Customer jobs*

Como ya se ha observado en el apartado del *Business case*, el objetivo principal de los fabricantes de material rodante ferroviario está dirigido a alargar la vida en servicio de los componentes del eje montando. Por ello, el empleo de protecciones termoplásticas permite por un lado mejorar la tolerancia al daño del sistema eje-protección y por ende, alargar la vida a fatiga de los bogies. De forma adicional, previene al eje de las condiciones atmosféricas de humedad y/o ambientes corrosivos. Por último, dado que se trata de una protección modular facilita la gestión del stock y almacenes, pudiendo crear librerías digitales de repuestos para su fabricación distribuida.

9.5.1.2. *Gains*

Las tareas de mantenimiento y reparación del material rodante suponen costes en medida de tiempo y dinero tanto para el operador (servicio transporte FFCC) como para el fabricante (contrato de mantenimiento). Por lo que una protección compatible con los sistemas de anti-corrosión (pinturas), que permite evacuar los condensados y retirable fácilmente, permite una rápida inspección del eje supone un ahorro directo en operaciones de mantenimiento y por lo tanto una ventaja competitiva frente a otros sistemas de protección.

9.5.1.3. *Pains*

Una de las mayores frustraciones que tiene la industria del FFCC con respecto al empleo de protecciones retirables termoplásticas, es la baja modularidad de moldes y utillajes, la alta variabilidad (series de diámetros) diseños de eje y el alto coste de los procesos de fabricación. Por otro lado, el desconocimiento de las nuevas tecnologías de fabricación híbridas emergentes, se traduce en que los principales OEMs sean reticentes a la hora de invertir.

Además, la industria del FFCC se caracteriza por presentar altos estándares de calidad (ISO/TS 22163) y seguridad (EN 45545), siendo una de las mayores preocupaciones la seguridad frente incendio.

9.5.2. Propuesta de valor

En este bloque se pone de manifiesto la propuesta de valor que ofrece la *Startup* para dar respuesta a las necesidades del cliente. Para tal fin, se deben plantear el valor que la *Startup* propone para afrontar los esfuerzos del cliente (*products*), cómo estos productos son capaces de resolver su problemática (*gain creators*) y las características del producto dirigidas a reducir sus preocupaciones y frustraciones (*pain relievers*).

9.5.2.1. Products

Mediante un proceso de sobreimpresión 3D se pueden fabricar protectores desmontables de eje ferroviario frente a posibles impactos de balasto, a partir de materia prima proveniente de un proceso de reciclaje. Estas protecciones son productos de alto valor añadido que pueden afrontar los esfuerzos dirigidos a la alargar la vida en servicio del material rodante ferroviario. Además de ser un producto diferenciador de los existentes.

9.5.2.2. Gain creators

El empleo de estructuras complejas, como núcleos auxéticos RH o RSH, confieren a las defensas una capacidad de absorción de energías superiores en comparación a diseños convencionales para inyección y/o moldeo por compresión. Las protecciones son reutilizables, reparables y reciclables, dado que se trata de un material compuesto termoplástico. Como se ha indicado anteriormente, mediante las protecciones desmontables se reducen los costes durante el proceso de inspección y mantenimiento. Además, estas protecciones se fabrican a partir de residuo local (KM 0) por lo que reducen los costes asociados a la gestión de los residuos, en este caso de impresión 3D. De hecho, ya existen en el mercado soluciones como las de CAF S.A. y/o SJ AB.

9.5.2.3. Pains relievers

El empleo de un proceso de sobreimpresión permite reducir costes y tiempo de producción ya que las partes lisas o geoméricamente sencillas de la defensa se producen en moldes sencillos (sin acanaladuras ni postizos) por procesos convencionales (rápidos y baratos) mientras los núcleos complejos se producen por un proceso de FFF. Por lo que, la tecnología de sobreimpresión habilita el empleo de molde intercambiables mientras que la variabilidad (series de diámetro) se consigue mediante la impresión 3D.

9.5.3. Plan de validación

Para el contraste de la VPC, se ha llevado un plan validación con algunos de los agentes. En este caso se ha llevado a cabo entrevistas con agentes de diferentes segmentos: suministrador de filamento, fabricante de equipamiento de impresión 3D, administración pública y un posible cliente. Se han planteado las siguientes 6 hipótesis, a las cuales se han añadido otras 2 hipótesis más identificadas/aprendidas durante el proceso de contraste. El sistema de protección FFCC fabricado por impresión 3D y material reciclado permite/habilita/promueve:

- H1. Introducción de nuevos productos reciclado en el mercado.
- H2. Alianza y cooperación entre Industrias Intensivas del plástico.
- H3. Personalización de productos, moldes o utillajes.
- H4. Proponer actividades de sensibilización industrial.
- H5. Rediseño de los planes de estudio.
- H6. Reducir los gastos en gestión de residuos industriales.
- H7. Facilita la gestión de stock de almacenes.
- H8. Facilita el mantenimiento.

Se han eliminado las hipótesis que se corresponden con especificaciones del componente. Todas ellas, se han clasificado en función de su grado de criticidad y certeza (Figura 148) y se han identificado que las H1 y H2 son las hipótesis prioritarias en la validación del PVC.

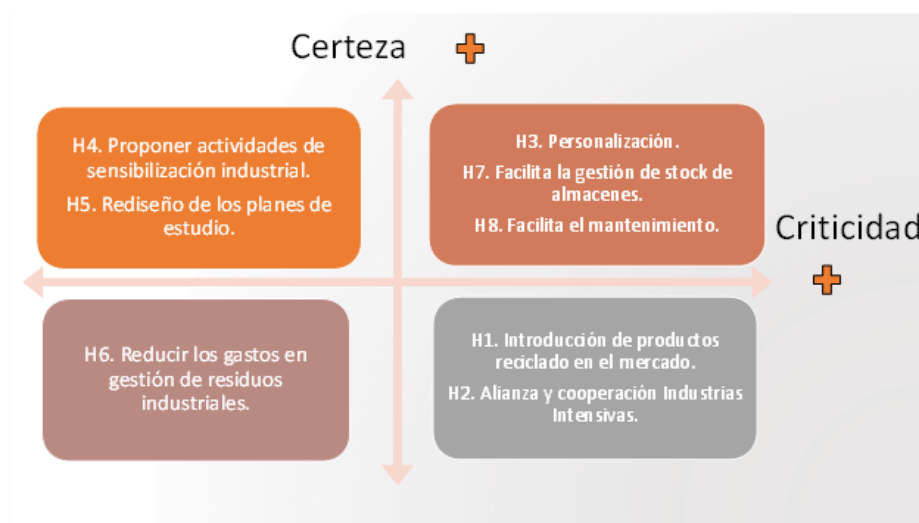









Figura 148. Matriz grado criticidad y certeza de las hipótesis.

La validación de las hipótesis de personalización, gestión de almacenes y tareas de mantenimiento han quedado validadas por 3 de los 4 agentes entrevistados. Las hipótesis de introducción de nuevos productos reciclados o sostenibles y la creación de alianzas ecosistemas entre empresas solamente ha sido validada por 1 y precisa un mayor número de entrevistas entre los potenciales clientes o aliados clave. En cuanto a las actividades de sensibilización y rediseño de planes de estudio han sido validado por todos los entrevistados, con especial interés por parte de las administraciones públicas de hacer alguna acción conjunta. En estos momentos MGEP se encuentra en proyectos de I+D con asociaciones como EIT-Raw materials (<https://breakitproject.eu/>) o SPIRE (www.spire2030.eu/cirnet) que buscan la redefinición los perfiles curriculares de los ingenieros en sostenibilidad y economía circular.

9.6. BUSINESS MODEL CANVAS

Una vez desarrollada la propuesta de valor, se puede realizar el BMC (Figura 149). Como ya se ha comentado, el modelo de negocio de la *Startup* se ha enfocado en el sector del FFCC y, por lo tanto, el BMC únicamente está dirigido a este sector.

<p>Socios clave</p>  <p>3R3D GAIKER Mondragon Unibertsitatea Indart3D Mecanoplastica</p>	<p>Actividades clave</p>  <p>Diseño Producción I+D+i Marketing</p>	<p>Propuesta de valor</p>  <p>Maximizar el ciclo de vida de los ejes, reducir coste de mantenimiento y proporcionar una ventaja competitiva gracias al desarrollo de una tecnología propia.</p>	<p>Relación con clientes</p>  <p>TIER-1 Desarrollo de producto personalizado</p>	<p>Segmentos de cliente</p>  <p>Sector de ferroviario</p>
	<p>Recursos clave</p>  <p>Personas Conocimiento</p>		<p>Canales</p>  <p>Comerciales Web y redes sociales Conferencias Foros/Cluster especializados</p>	



Estructura de costos		Fuentes de ingresos	
	Materias primas Fabricación Mano de obra Costes indirectos Inversión inicial		Venta directa. Servicio de recogida, reparación y/o reciclaje protecciones.

Figura 149. *Business Model Canvas.*

A continuación, se analizan cada uno de los puntos del BMC:

9.6.1. Segmentos de cliente

Este bloque define los diferentes grupos de personas u organizaciones que la *Startup* tiene como objetivo alcanzar y servir. En este caso, el modelo de negocio se ha enfocado en la industria ferrocarril y concretamente en los OEMs del sector ferroviario. A continuación, se presentan los clientes potenciales:

- Fabricantes de trenes (Talgo, CAF, Bombardier, Alstom-Siemens).

Y como principales aliados claves:

- Operadores servicio (Renfe, Euskotren, SNCF).
- Operadores logísticos (Railsider, Algeposa, Adif).

Aliados que actúan como prescriptores de componentes y sistemas ferroviarios, los cuales pueden exigir a los fabricantes de trenes la incorporación de productos sostenibles (sistemas de protección), reciclados de origen local. También pueden favorecer incorporar los principios de la EC en el diseño y fabricación en el sector ferroviario.

9.6.2. Propuesta de valor

Este bloque define la propuesta de valor que se ofrece al cliente. Como ya se ha comentado a lo largo de este capítulo, la propuesta de valor consiste en maximizar el ciclo de vida de los ejes, reducir coste de mantenimiento y proporcionar una ventaja competitiva gracias a la venta de productos (protecciones), tecnología desarrollo propio (sobreimpresión 3D) y/o venta de propiedad intelectual (patente).

9.6.3. Canales

En este bloque se muestra el tipo de comunicación que se establecerá entre la *Startup* y los clientes para hacer llegar la propuesta de valor. Dicha comunicación se realizará de manera directa, la *Startup* tendrá su propia red comercial o personal de ventas que estará a cargo de la comunicación con los clientes. Esta red comercial, realizará una distribución y venta directa de los productos. Además, se diseñará una web para la empresa con el objetivo de facilitar la búsqueda de información, productos o servicios al cliente. En la misma vía, la empresa tendrá presencia en diferentes redes sociales como LinkedIn. Por último, la empresa estará presente en diferentes conferencias o foros especializados como en asociaciones/clústeres (Shift2Rail o MAFEX) para ampliar la red de contactos y la visibilidad.

9.6.4. Relación con clientes

Este bloque presenta el tipo de relación que tendrá la *Startup* con los clientes. Como se ha comentado en el bloque anterior, el personal de ventas o la red comercial tendrá una relación directa con el cliente. Esta relación será personalizada, donde el producto será diseñado y fabricado según las necesidades del cliente. Al tratarse de un suministrador de componentes directamente al OEM, la *Startup* estará en la primera posición de la cadena de suministro, por lo que será considerada como un proveedor de nivel 1 (TIER-1).

9.6.5. Actividades clave

Primeramente, se definen las líneas de actividad principales de producto y activos diferenciadores.

Para ello, las actividades clave son:

- Diseño: los clientes definirán el cuaderno de especificaciones de la pieza, las dimensiones generales de la protección y las propiedades mecánicas, entre otras. La *Startup* por su parte, se encargará de definir espesores y tamaños de celda unitaria que permitan cumplir con las especificaciones del cliente. En este punto, será donde mayor contacto se producirá con el cliente y tendrá un componente de personalización importante. Así mismo, esta actividad también englobará los ensayos de validación del diseño y los estudios de productividad de la pieza objetivo.

- Producción: una vez diseñada y validada la pieza, la actividad principal consistirá en su industrialización mediante un proceso híbrido sobreimpresión. En esta actividad se necesitarán operarios de máquina y técnicos de calidad. También será necesaria la presencia de un ingeniero, que se encargará de supervisar la correcta fabricación de la pieza y mantendrá al cliente informado de las posibles incidencias.
- I+D+i: enfocado al desarrollo de nuevas soluciones de protección, optimización del proceso de sobreimpresión y/o definición de estándares en las propiedades materiales reciclados, en este aspecto la *Startup*, se apoyará en la universidad y centros tecnológicos.

9.6.6. Recursos clave

Este bloque define los recursos necesarios para llevar a cabo las actividades clave definidas anteriormente. En primer lugar, se presenta una estimación del personal necesario para el inicio de la *Startup*:

- 3 ingenieros: serán los encargados de industrializar la tecnología. Dos de ellos estarán destinados al equipo de diseño y fabricación, el tercero será el encargado del departamento de calidad y labores comerciales. Todos ellos ocuparán puestos de dirección.
- 3 operarios: los operarios serán los encargados de puesta en marcha de los equipos, de su mantenimiento y reparación. Además, desarrollarán tareas de fabricación y almacenaje de las piezas.

Por otro lado, se deben tener en cuenta los recursos clave relacionados con la fabricación, para lo que principalmente serán necesarias las siguientes materias primas:

- Materias primas de origen sostenible.
- Servicio de caracterización y certificación material de impresión 3D.
- Máquinas y equipamiento de impresoras 3D.
- Servicio de caracterización de producto.

Finalmente, debido al alto componente tecnológico y de innovación de la tecnología, el conocimiento se debe considerar como uno de los recursos más importantes, el cual está directamente relacionado con los trabajadores.

9.6.7. Socios clave

Con el objetivo de crear un modelo de negocio estable y fuerte, la *Startup* deberá generar una red de socios y proveedores. Como se ha comentado anteriormente, los proveedores suministrarán las materias primas para la actividad y, por lo tanto, la relación con ellos será decisiva.

Por lo que se plantean las siguientes relaciones con proveedores en función de los recursos clave:

- 3R3D Technologies Material: Proveedor de materia prima reciclada. Se encargará de tareas de recogida y revalorización del residuo 3D. Suministrará material de impresión reciclado en formato pellet/filamento.
- GAIKER: Certificador del material de impresión (100% sostenible) y llevará a cabo tareas de caracterización del material, así como tomará parte en el desarrollo de nuevas mejoras en el proceso de reciclado.
- Indart3D: Suministrador de impresoras 3D, optimizará los parámetros de extrusión e impresión de acuerdo con los grados de poliamida empleado en función del origen del residuo.
- Mondragon Unibertsitatea: Validador/testear del producto. Llevará a cabo los ensayos mecánicos y asesorará a proveedores y suministradores en el diseño de máquina y del proceso de impresión de las piezas sobreimpresa.
- *Startup (Recharge)*: Diseñador del producto. Llevará a cabo tareas de dimensionamiento estructural y adaptación del diseño de protección al proceso de sobreimpresión.
- Mecanoplastica: Fabricante de casquillos por inyección. Llevará a cabo de industrialización de parte de la protección y por ello tomará parte también el proceso de adaptación del diseño al proceso de inyección.

Por un lado, debido a la complejidad del modelo de negocio planteado, se ha decidido reducirlo a un B2B (*Business to Business*): un único proveedor de residuos y un producto. Por otro lado, se ha de tener en cuenta que las empresas TIER-1 son el miembro más importante de la cadena de suministro y, por lo tanto, deben conocer el mercado. En consecuencia, es necesario asociarse con alguna empresa que esté afianzada en el sector de ferroviario.

9.6.8. Estructura de costos

En este bloque se define la estructura de costos de la *Startup*. Se ha de remarcar que la información relativa a los costes y márgenes de beneficio no va a ser reflejado en este documento por motivos de confidencialidad. No obstante, se presenta un breve análisis de los elementos a tener en cuenta:

- Materias primas: estos costes corresponden a la materia prima reciclada necesaria para la fabricación del sistema de protección ferroviaria y a los costes derivados a la compra de casquillo exterior (inyección).
- Equipamiento: estos costes corresponden a la adquisición de impresoras 3D (pellet/filamento)
- Fabricación: los costes correspondientes a la fabricación dependerán del volumen de piezas y de su complejidad, entre otros.
- Mano de obra: los costes correspondientes al capital humano se decidirán internamente en función de cada categoría (ingeniero u operario).
- Costes indirectos: los costes indirectos están relacionados con todo el proceso productivo, abarcarían el coste del alquiler de la nave industrial, los costes administrativos, vehículos de empresa o la energía consumida, entre otros.
- Inversión inicial: al tratarse de una *Startup* fabril, la inversión inicial para poner en marcha la empresa sería alta. En un inicio, se montarían una primera línea de fabricación destinadas a producción de casquillos, y otras dos líneas quedarían en espera. El coste total de la inversión se realizará de manera interna, así como el cálculo de su amortización.

9.6.9. Fuentes de ingresos

Este bloque representa el flujo de ingresos que la *Startup* generará a partir de la propuesta de valor ofertada al segmento de clientes. En esta primera etapa, la única fuente de ingresos será la venta directa de productos y servicios.

Dentro el catálogo de producto (venta directa) se encuentran:

- Producto: Sistemas de protección (Casquillos, bajeras y testers).
- Equipamiento: Tecnología de sobreimpresión.
- Material prima impresión 3D: Ronix[©]

Dentro de los servicios añadidos se encuentran:

- Servicios de asesoramiento tecnológico.
- Servicio de recogida y reparación.
- Servicio de reciclado.

No obstante, la *Startup* financiará los proyectos destinados a la generación de conocimiento e investigación mediante financiación pública, tanto a nivel nacional como internacional. Además, no se descarta acogerse a los programas de emprendimiento.

9.7. CONCLUSIONES

En este apartado se ha desarrollado un modelo de negocio basado en la metodología *Lean Startup*. A través del *Business case*, se han establecido las oportunidades que ofrece la industria del ferrocarril y se han comparado con las debilidades, fortalezas y amenazas que presenta los sistemas de protección eje desmontables y sostenibles fabricados en composite termoplástico mediante un proceso de sobreimpresión. Se ha observado una ventaja competitiva en el mercado, por lo que se ha desarrollado un *Business Model Canvas* basado en la propuesta de valor que puede ofrecer la tecnología a la industria del ferrocarril. Se ha observado que el producto posee un carácter innovador y diferenciador frente a los productos ya existentes en el mercado.

La propuesta de valor de los productos fabricados mediante la impresión 3D y la economía circular encajan con las necesidades del sector de ferrocarril y se presenta como una oportunidad de crecimiento económico-social en la zona del Bidasoaldea-Oarsoaldea. El mayor riesgo en la industrialización de la tecnología corresponde en el modelo de negocio a definir entre los agentes implicados en la cadena de valor. Inicialmente, se ha planteado un modelo reducido (B2B) a un tipo de residuo (material de impresión) y un único proveedor (casquillo).

Como conclusión, a través del análisis desarrollado en este capítulo, se puede afirmar que la creación de la *Startup (Recharge)* tiene potencial, pero que su viable no ha podido ser demostrado en el trascurso de la presente tesis. Se ve la necesidad de hacer un testeo más amplio e involucrar a alguno de los OEM o constructores de vehículo ferroviario.

Capítulo 10

Conclusiones generales y líneas futuras

CAPÍTULO 10

Conclusiones generales y líneas futuras

En este capítulo se presentan las conclusiones generales a partir de la investigación desarrollada en la presente tesis. Del mismo modo se presentan las líneas futuras en las que se considera interesante seguir trabajando y, finalmente, se listan las contribuciones científicas derivadas de los resultados obtenidos en este trabajo.

10.1. CONCLUSIONES

10.1.1. Desarrollo de estructuras fabricadas mediante cFF para la disipación de energía en caso de impacto

Inicialmente, se ha analizado la relación que existe entre los defectos microestructural que producen los patrones de impresión de fibra y los mecanismos de fractura que inducen el colapso estable de los perfiles huecos.

A partir del análisis de la microestructura, el principal defecto encontrado en las probetas Longitudinales es un contenido de fibra no homogéneo a nivel de cada capa mientras que los poros y desalineaciones entre los cordones son los defectos más destacables en los perfiles Concéntricos. Cabe destacar que los defectos de impresión se encuentran en puntos geoméricamente singulares de los perfiles Fold y Hexagonal.

Las configuraciones Concéntricas han mostrado valores de *SEA* axial que doblan los valores de las Longitudinales, con una fuerza máxima menor y un colapso estable. Dado que la intercara de impresión se solicita a compresión durante la carga axial, los mecanismos de fractura que inducen el colapso estable de los perfiles Concéntricos son el deslizamiento relativo entre capas y la rotura de las fibras. En dirección radial, las probetas Concéntricas también mostraron los valores de *SEA* más altos. Además, el mecanismo de cortadura entre cordones permite un crecimiento de grieta estable y un deslizamiento entre las fibras que promueven la absorción de energía.

El patrón de impresión concéntrico proporciona un refuerzo local en zonas singulares del perfil aumentando su capacidad de carga y *SEA* radial, siendo entre 2-3 veces superior a perfiles de material compuesto fabricados por métodos convencionales (Tabla 28). El rendimiento del perfil Fold es mayor que el Hexagonal tanto para carga axial como radial.

En segundo lugar, se ha analizado la influencia de los materiales constituyentes y su sensibilidad a la velocidad del ensayo. Los defectos de impresión de la fibra no sólo dependen del patrón concéntrico y de la geometría Fold sino también de las propiedades mecánicas de los filamentos pre-impregnados.

Los defectos en desalineaciones de las fibras y poros entre cordones se han visto magnificados en las probetas de cGF/PA y cKF/PA, donde las fibras se curvan como resultado de una mayor flexibilidad con respecto de cCF/PA. En condiciones cuasiestáticas, el perfil cCF/PA se comportan mejor que los cGF/PA y cKF/PA, gracias a su mayor adherencia entre capas. No obstante, se ha observado un comportamiento frágil en el perfil cCF/PA. Entre los mecanismos de fractura de cCF/PA se ha identificado la rotura de fibras, mientras que en cGF/PA y cKF/PA no. Los mecanismos de fractura del cGF/PA y cKF/PA muestra delaminaciones entre capas y cordones, que inducen un colapso estable.

La respuesta al impacto de los perfiles cGF/PA y cKF/PA es mejor que cCF/PA, además de tener una mayor dependencia de la velocidad de deformación. La naturaleza de los constituyentes (fibra y matriz) controla la diferencia de comportamiento de colapso entre ambos materiales. La naturaleza semi-cristalina de la matriz de cGF/PA y cKF/PA permite alcanzar valores de *SEA* superiores a los de cCF/PA. Una menor adhesión de las intercaras de cGF/PA y cKF/PA promueve la absorción de energía a través de un crecimiento estable de la zona delaminada, y potencia un deslizamiento entre capas y cordones. Además, el aumento de la temperatura de las probetas de cGF/PA y cKF/PA por encima de su T_g debido al calentamiento adiabático durante el impacto provoca una respuesta más flexible del perfil y el aumento de los valores de *SEA*.

Finalmente, se ha analizado la influencia del núcleo auxético en las propiedades a impacto de perfiles rellenos (cCF/PA, cGF/PA y cKF/PA).

La estructura doblemente reentrante de RSH, es la estructura celular que presenta las mejores propiedades de impacto en el plano. Gracias al núcleo auxético, la capacidad de absorción de energía de todos los perfiles se ha visto aumentada. Se ha observado un

efecto sinérgico, que permite alcanzar valores de *SEA* entre 6-8 veces superior con respecto de los perfiles huecos. El efecto sinérgico es debido al colapso y la densificación progresiva del núcleo y por ello permite al perfil soportar un nivel de carga superior, y por ende absorber mayor nivel de energía. Los mecanismos de colapso observados en el perfil KDD se basan en la cortadura del núcleo, fractura de la unión núcleo-perfil y delaminaciones entre capas y cordones del perfil, sin signos aparente de rotura de fibras. El valor de *SEA* radial más alto alcanzado en el presente trabajo (20,6 kJ/kg) se ha obtenido para un perfil de cKF/PA relleno de una estructura RSH y supone una mejora de *SEA* 35% con respecto de los valores más altos encontrados en bibliografía (Tabla 34).

10.1.2. Hibridación de tecnologías

Se ha demostrado la viabilidad de un nuevo proceso de fabricación híbrido, que combina un proceso convencional como es la estampación de *organo-sheet* de PA12 reforzadas con fibra de carbono y la impresión 3D-cFF. El factor clave es la temperatura de la intercara ya que la resistencia a la cortadura aumenta con el aumento de temperatura, y una vez que supera la temperatura máxima de fusión del sustrato, la resistencia llega a un máximo. Por tanto, se concluye que existe una temperatura óptima para cual se puede encontrar un punto de equilibrio entre las prestaciones mecánicas y la rentabilidad del proceso. No obstante, se han identificado otros parámetros del proceso como la temperatura de extrusión o la presión de compactación que pueden mejorar las propiedades de adhesión entre el sustrato y el proceso de sobreimpresión 3D.

10.1.3. Modelo de negocio

Se ha desarrollado un modelo de negocio basado en la metodología *Lean Startup* para la industrialización de productos y servicios de protección frente a impacto en el sector FFCC. A través del *Business case*, se han establecido las oportunidades que ofrece la industria del ferrocarril y se han comparado con las debilidades, fortalezas y amenazas que presenta los sistemas de protección eje desmontables y sostenibles fabricados en composite termoplástico (reciclados) mediante un proceso de sobreimpresión. Se ha observado una ventaja competitiva en el mercado, por lo que se ha desarrollado un *Business Model Canvas* basado en la propuesta de valor que puede ofrecer la tecnología a la industria del ferrocarril.

La propuesta de valor de los productos fabricados mediante la impresión 3D y la economía circular encajan con las necesidades del sector de ferrocarril y se presenta como una oportunidad de crecimiento económico-social en el ecosistema Bidasoaldea-Oarsoaldea. El mayor riesgo en la industrialización de la tecnología corresponde en el modelo de negocio a definir entre los agentes implicados en la cadena de valor. De hecho, únicamente se ha podido llegar a testear un modelo de negocio reducido a un único tipo de residuo (desechos y rechazo de material de impresión), un producto (protección del eje) y un único proveedor por lo que el modelo sería B2B.

Como conclusión, a través del análisis desarrollado en este capítulo, se puede afirmar que la creación de la *Startup (Recharge)* tiene potencial, pero que su viabilidad en un entorno multisectorial (FFCC, automoción, aeroespacial), multicomponente (casquillos, bajeras y testers) y con todos agentes implicados en la cadena de valor que contemple (OEM, TIER-1, TIER-2) no ha podido ser demostrado en el transcurso de la presente tesis.

10.2. LÍNEAS FUTURAS

En el siguiente subapartado se presentan las líneas de investigación a continuar tras la finalización de la presente tesis, así como los resultados preliminares de las mismas.

10.2.1. Diseño de núcleos con propiedades programables a impacto

En la presente tesis se han llevado a cabo la caracterización de los patrones de colapso de perfiles y núcleos. A pesar de que la mejora en el comportamiento a impacto de los perfiles rellenos con metamateriales ha sido demostrada (capítulo 7), no se ha podido cuantificado el valor de Poisson ni para niveles altos de deformaciones ni para otras tipologías de relleno. Por lo que, el diseño de estructuras con propiedades programables a impacto requiere continuar con las investigaciones en este ámbito:

Una vía para afrontar este reto sería en adaptar las técnicas de tratamiento de imagen o *Digital Image Correlation* (DIC). Las técnicas DIC no son capaces de monitorizar los desplazamientos de aquellos puntos que presentan arrugas, rótulas o corrugaciones que salen del plano transversal. En las siguientes figuras (Figura 150 y Figura 151) se presentan los patrones de colapso cuasi-estáticos a partir de los cuales se extraerán los contornos de deformaciones mediante el uso del software comercial (GOM-ARAMIS).

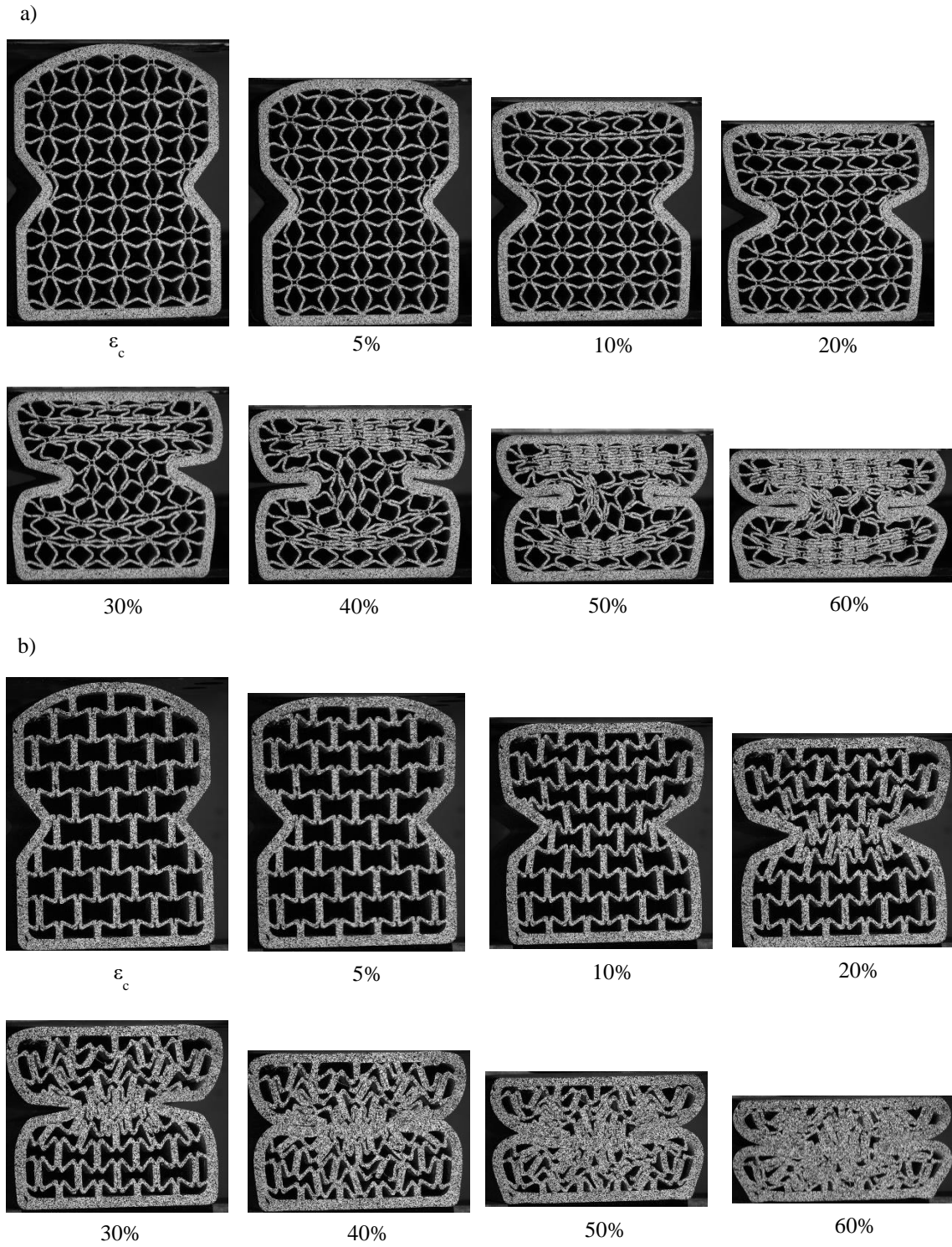


Figura 150. Patrones de colapso cuasi-estático. Perfil relleno sin refuerzo cFF; a) OSD y b) OSS.

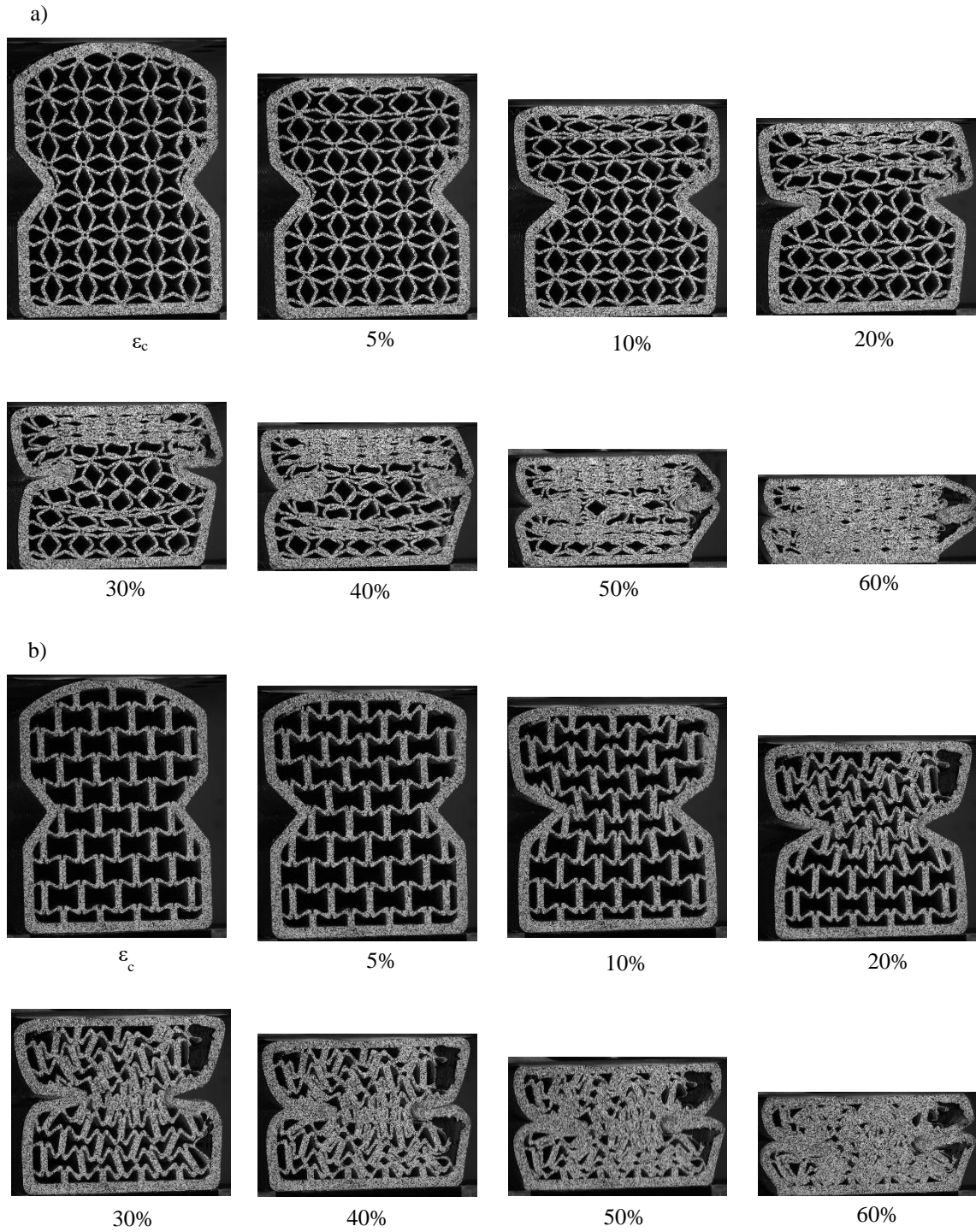


Figura 151. Patrones de colapso cuasi-estático. Perfil relleno reforzado con Kevlar® a) KSD y b) KSS.

10.2.1. Estructuras auxéticas con gradientes funcionales a impacto

En la presente tesis, se han empleado estructuras auxéticas (RSH, ASH y RH) como núcleo de relleno de los perfiles Fold, con un tamaño de celda unitaria y espesor que permitía la fabricación de las probetas en un tiempo admisible. No obstante, se ha llevado a cabo tareas exploratorias (Figura 152 y Tabla 35) y se ha encontrado una relación directa entre las propiedades a impacto y la densidad de la estructura auxética.

A partir de los resultados obtenidos de las pruebas de impacto (Figura 153), se plantea desarrollar estructuras tubulares o de tipo sándwich con gradientes funcionales (tamaño de celda), que permitan controlar o programar su curva de colapso.

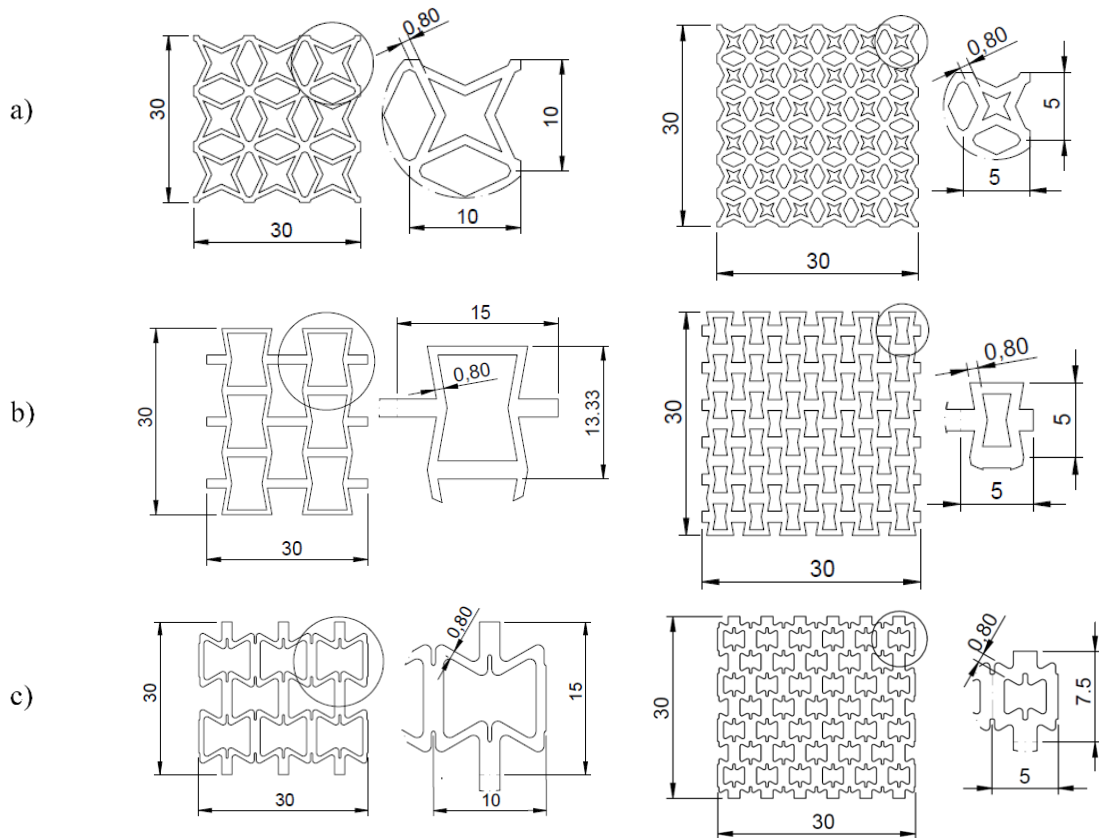


Figura 152. Geometrías de núcleos auxéticos con distintas densidades: a) RSH [Ingrole2017], b) ASH [WangH2019], y c) RH [Quan2020].

Tabla 35 Tipología de estructura auxética, número de repeticiones de celda, masa y densidad.

Tipología	Número (Filas y Columnas)	Masa (g)	Densidad (g/cm ³)
RSH	3x3	10.7	0.35
	4x4	11.6	0.41
	5x5	13.0	0.51
	6x6	16.5	0.60
ASH	3x3	10.7	0.37
	4x4	14.5	0.48
	5x5	17.9	0.50
RH	3x3	9.1	0.30
	4x4	12.4	0.41
	5x5	15.2	0.47
	6x6	20.1	0.67

Los resultados preliminares muestran una relación entre el tamaño de celda, su densidad y la capacidad de absorción de energía.

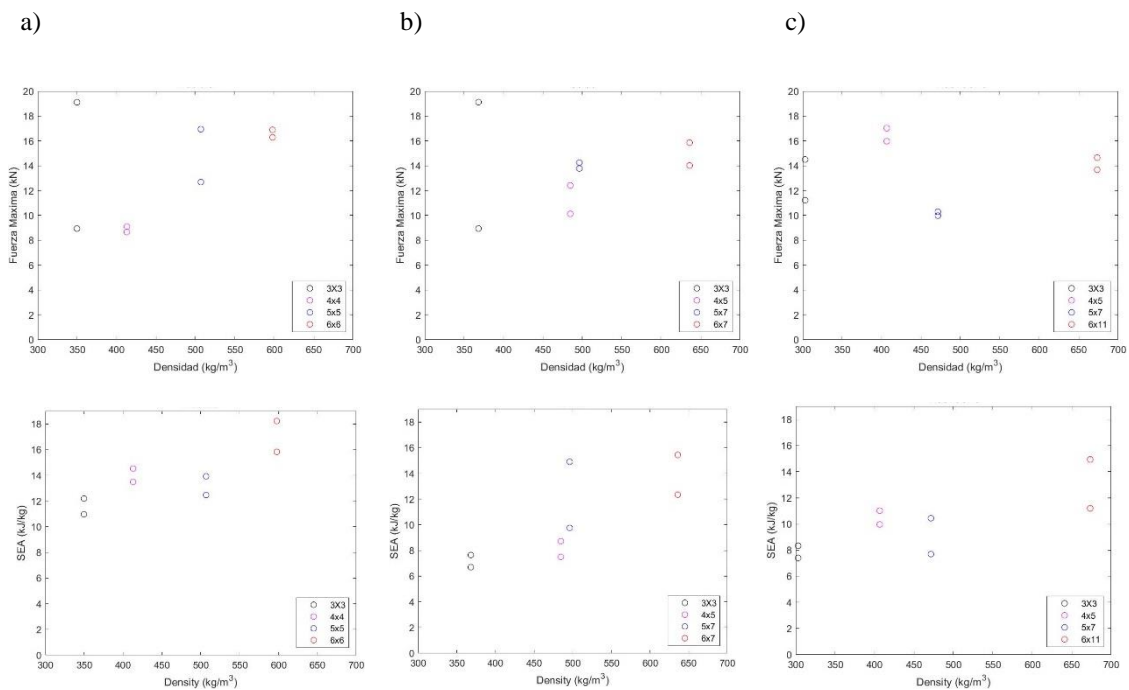


Figura 153. Propiedades de impacto en función de la densidad de núcleo; a) RSH, b) ASH y c) RH.

10.2.2. Sobremoldeo con GMT de preformas 3D-cFF

Se han llevado a cabo las pruebas preliminares de sobremoldeo de las preformas impresas. El aspecto de la microestructura correspondiente a la zona del nervio se muestra en la Figura 154. Se observa que la matriz GMT recubre completamente el refuerzo 3D y se aprecia la consolidación entre ambas matrices. No obstante, se ha encontrado algunos defectos como grietas en la base del nervio que pueden ser atribuidos al proceso de corte de las muestras de material.

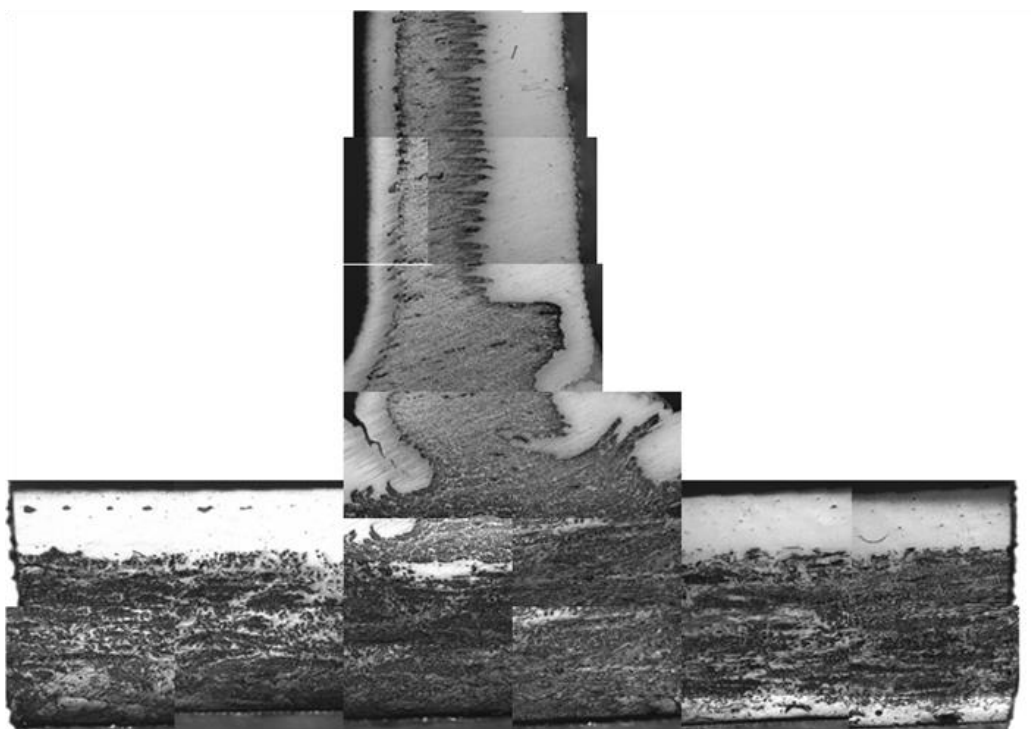


Figura 154. Microestructura del nervio tras el proceso de sobremoldeo.

10.2.3. Reciclado de poliamidas para impresión 3D

A continuación, se detallan el estado de las tareas y las pruebas iniciales en cuanto al reciclado de poliamidas para impresión 3D.

10.2.3.1. Caracterización física

- DSC (calorimetría)

Se llevarán a cabo ensayos de DSC para comprobar si existe algún cambio en las propiedades térmicas de la poliamida 6 reciclada debido a los ciclos repetidos de impresión y reciclado. Se comprobará, a su vez, si existe algún cambio en T_g del material debido al proceso de degradación asociado al reciclado.

- MFI

Se llevarán a cabo medición del índice de fluidez (MFI) y comprobar la variación en el flujo y la viscosidad de la poliamida 6 tras cada ciclo de reciclado.

10.2.3.2. Caracterización mecánica del material reciclado.

- Ensayos impacto

En la Tabla 36, se muestran los primeros resultados de la caracterización mecánica del material reciclado. A partir de estos resultados se observa de una reducción en las propiedades de material debido al primer ciclo de reciclado, se produce una reducción en la carga pico del 45% y en la energía absorbida del 16%.

Tabla 36. Resultados de impacto en material virgen y reciclado.

Ref.	P_{max} (kN)	A_e (J)
Virgen	2.2 (± 0.1)	8.6 (± 1.4)
1P0	1.2 (± 0.1)	7.4 (± 0.3)

La morfología de las curvas de impacto corrobora que el material virgen es más rígido y frágil que el material reciclado (Figura 155). Las diferencias entre las propiedades se atribuyen a la presencia de humedad y contaminación con otros materiales como cCF/PA en el material reciclado.

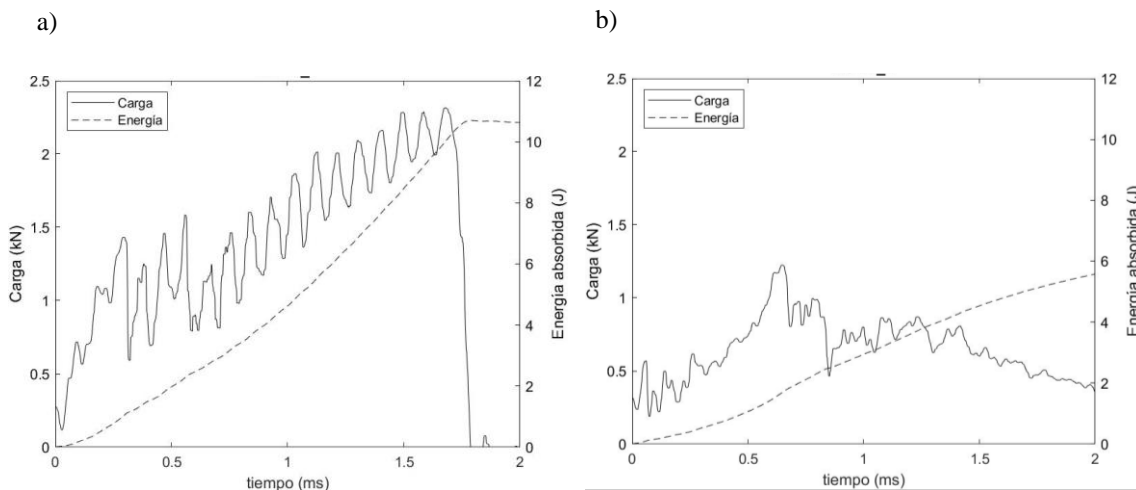


Figura 155. Curvas de impacto. a) Material virgen y b) Muestra 1P0.

10.2.4. Sistema de protección eje ferroviario frente a impacto

En el siguiente subapartado, se detalla las pruebas de validación del sistema de protección ferroviaria. A partir de un cuaderno de especificaciones suministrado por el cliente, se ha acordado llevar a cabo las siguientes pruebas de validación.

- Ensayo a temperatura ambiente
- Puntos de impacto: centro y en el extremo.
- Multi-impacto (3 repeticiones) en la zona central.

10.2.4.1. Caracterización mecánica.

- Impacto de balasto

En las siguientes imágenes (Figura 156 y Figura 157) se muestran las curvas de impacto y aspecto de las protecciones antes y después de los impactos. En la tabla Tabla 37, se muestra los valores de carga, deflexión máxima alcanzada durante el impacto, así como los valores de energía absorbida.

Tabla 37. Resultados de impacto sobre la protección.

Ref.	Punto impacto	P_{max} (kN)	d_{max} (mm)	A_e (J)
Concepto A	Central	5.5	8.9	36
	Extremo	5.9	20.4	60
Concepto B	Central	8.2 (± 0.8)	24.4 (± 0.1)	80.1 (± 0.6)

Existen notables diferencias entre la curva de respuesta del casquillo A y casquillo B. La curva del casquillo A presenta un nivel de absorción de energía de (36 J) y un valor de carga máxima de 5,5 kN a partir de la cual el casquillo se cizalla (Figura 156a). La curva del casquillo B (Figura 156b) presenta una zona de carga constante que denota un proceso de absorción de energía estable (60 J) para el caso de carga en el extremo. Para el caso de carga centrada, la capacidad de carga (8.2 kN) y de absorción de energía (80 J) es mayor. Las curvas (Figura 156c-f) muestran una ligera variación en la respuesta de la protección ante un escenario de impactos múltiples (4 repeticiones).

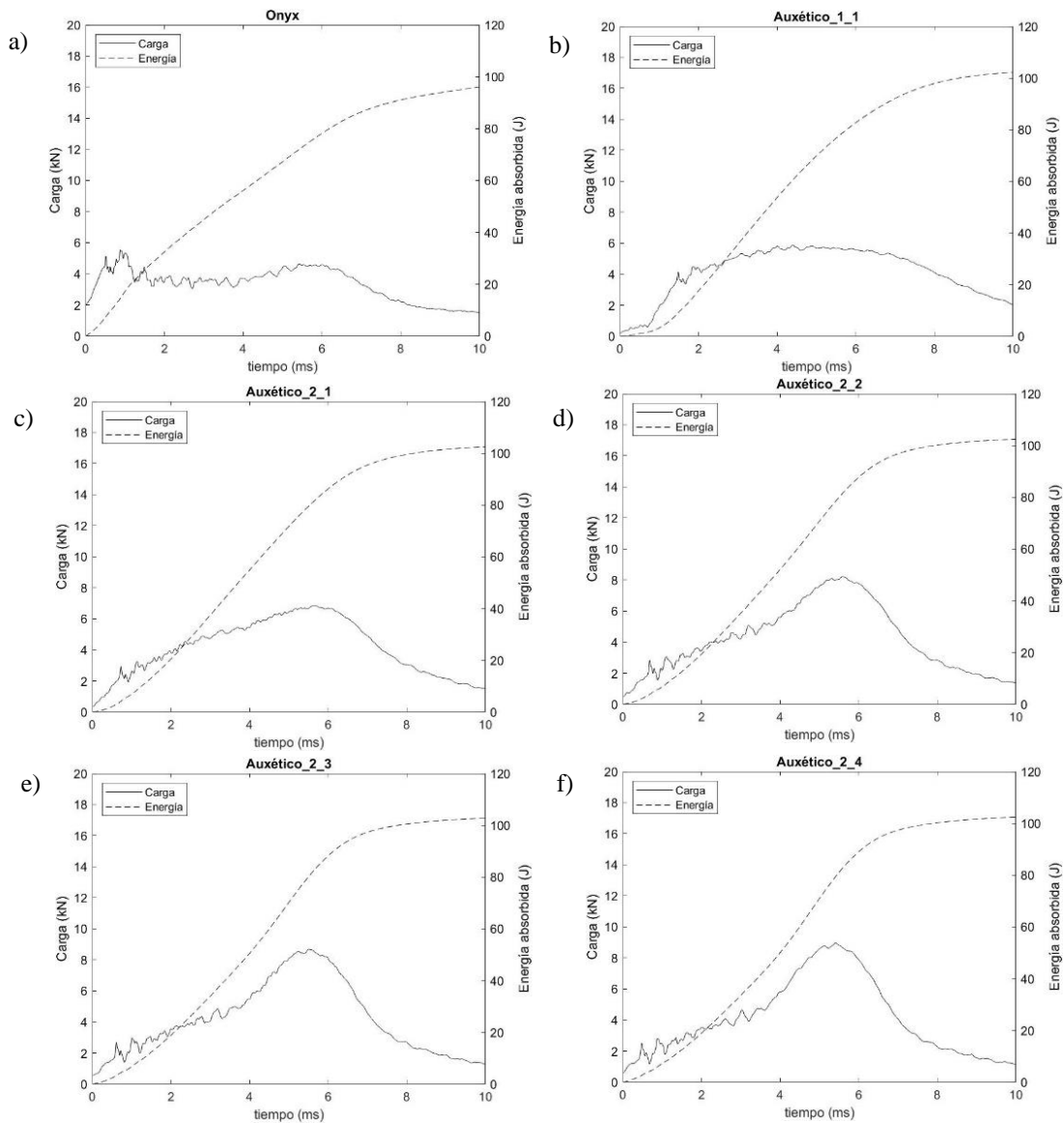


Figura 156. Curvas de impacto. Concepto A; a) Impacto en punto central. Concepto B; b) Impacto en extremo; Impacto en punto central, c) 1º Impacto, d) 2º Impacto, e) 3º Impacto y f) 4º Impacto.

En líneas generales, el comportamiento presentado por el casquillo tipo A (macizo) ha mostrado una respuesta frágil alcanzado un nivel de absorción de energía bajo en comparación con el casquillo B. En la Figura 157b-c se muestra la superficie de rotura (intercara de impresión) y se basa en un modo de fractura por cortadura de la matriz de Onyx[®]. Por otro lado, el casquillo tipo B ha mostrado una capacidad de absorción mayor en función de la zona del impacto. La respuesta es dúctil y no se han encontrado marca de indentación en la superficie de impacto Figura 157f-g. No obstante, se ha encontrado inicios de grieta en la parte interior del casquillo. No se ha podido comprobar si la grieta es resultado del primer impacto o ha ido evolucionando.

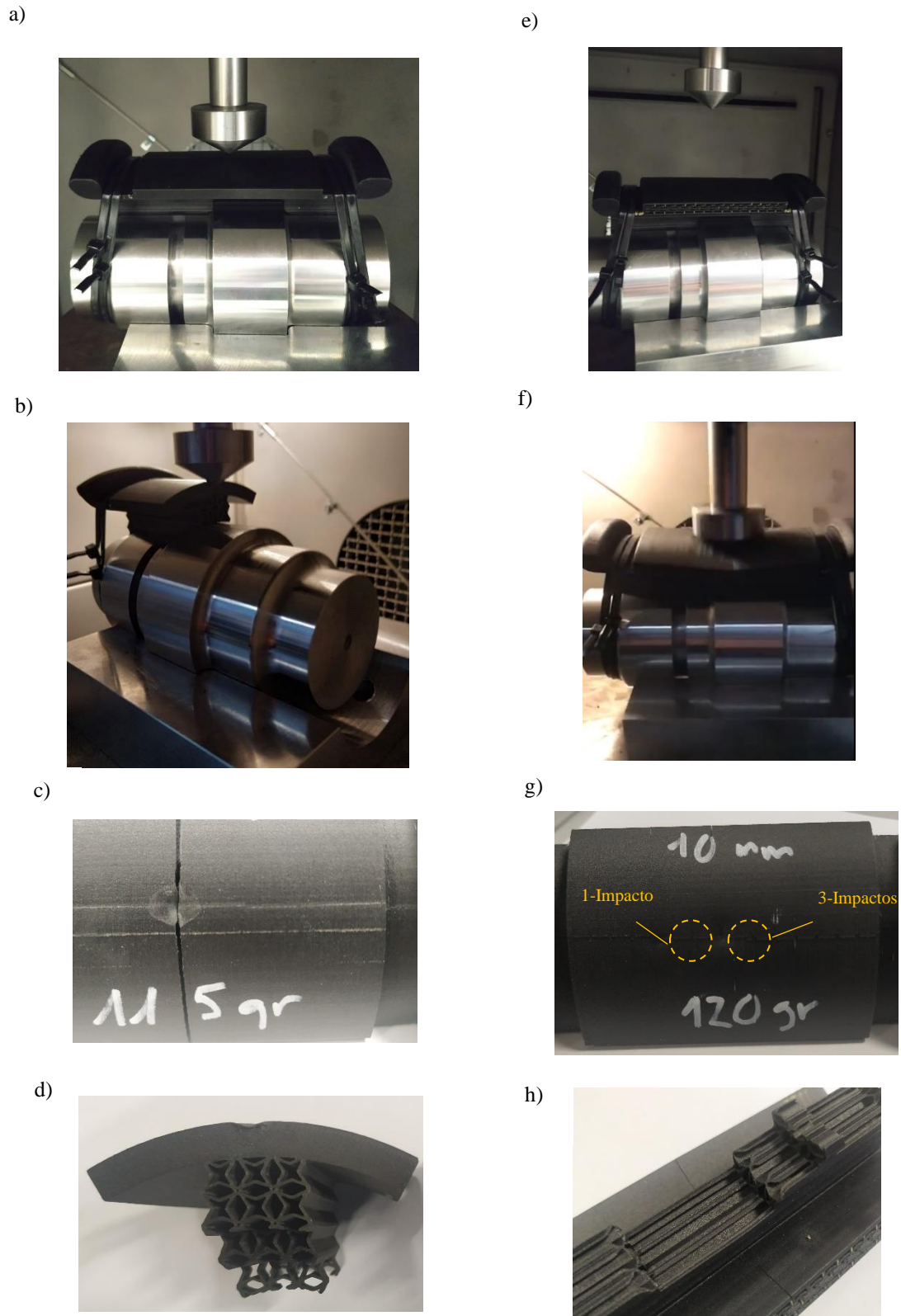


Figura 157. Test de impacto sistema de protección ferroviaria. Concepto A; a) Impacto central, b) Fractura por cortadura, c) Indentación y grieta circunferencial y d) superficie de fractura. Concepto B; e) Impacto central, f) Flexo-compresión, g) Posición y número de impactos y h) fractura por cizalla, parte posterior.

10.3. DIVULGACIÓN DE RESULTADOS

En el marco de la presente tesis doctoral se han realizado las siguientes contribuciones científicas:

10.3.1. Artículos indexados

Como autor principal se ha publicado los siguientes artículos en el primer cuartil (Q1) de “Materials Science – Composites”:

- U. Morales, A. Esnaola, M. Iragi, L. Aretxabaleta and J. Aurrekoetxea. *The effect of cross-section geometry on crushing behaviour of 3D printed continuous carbon fibre reinforced polyamide profiles*. Composite Structures. (Aceptado 3 julio 2021)
- U. Morales, A. Esnaola, M. Iragi, L. Aretxabaleta and J. Aurrekoetxea. *Quasi-static and dynamic crush behaviour of 3D printed thin-walled profiles reinforced with continuous carbon and glass fibres*. Composites Part B: Engineering. (Publicado 17 julio 2021).

Como autor principal se ha preparado (en revisión) el siguiente artículo para su envío:

- U. Morales, I. Sukia, A. Esnaola, L. Aretxabaleta and J. Aurrekoetxea. *Synergetic effect of auxetic infill structures in the radial impact behaviour of 3D printed continuous fibre reinforced polyamide profiles*. Composites Part B: Engineering (Capítulo 7).

Como coautor el siguiente artículo está en revisión en el mismo cuartil (Q1) que los anteriores:

- A. Esnaola, U. Morales, M. Iragi, L. Aretxabaleta and J. Aurrekoetxea. *Customised and integrated sole for cycling manufactured by 3d printing of continuous carbon fibre reinforced polyamide*. Composite Structures. (Enviado 10 julio 2021).

10.3.2. Participación en congresos

Como autor principal se han presentado en comunicación oral los siguientes trabajos:

- U. Morales, A. Esnaola, M. Iragi, L. Aretxabaleta and J. Aurrekoetxea. *Enhanced energy absorption properties in 3D printed polymer matrix composite*. 18th European Conference on Composite Materials (ECCM18), Atenas 2018.
- U. Morales, A. Esnaola, M. Iragi, L. Aretxabaleta and J. Aurrekoetxea. *Over-3D printing of continuous carbon fibre composites on organo-sheet substrates*. AIP Conference Proceedings 2113 (ESAFORM2019), 020015 (2019).
- U. Morales, A. Esnaola, M. Iragi, L. Aretxabaleta y J. Aurrekoetxea. *Compresión axial de tubos auxéticos fabricados mediante impresión 3D de poliamida reforzada con fibra corta de carbono*. XIII Congreso Nacional de Materiales Compuestos (MATCOMP19), Vigo 2019.
- U. Morales, I. Sukia, M. García de Cortazar, A. Esnaola, J. Aurrekoetxea. *Inertzia-bolante baten babes-kontainerraren diseinu eta fabrikazioa zuntz jarraizko 3D inpresio bidez*. Materialen Zientzia eta Teknologia V. Kongresua, Bilbo 2021.

Como coautor se ha participado en el desarrollo de los siguientes trabajos:

- A. Esnaola, I. Saenz-Dominguez, I. Tena, M. Iragi, U. Morales, L. Aretxabaleta, J. Aurrekoetxea. *Diseño de núcleos fabricados mediante impresión 3D para mejorar el comportamiento a compresión radial de tubos fabricados por pultrusión*. XII Congreso Nacional de Materiales Compuestos (MATCOMP17), San Sebastián 2017.
- J. Aurrekoetxea, M. Iragi, U. Morales, A. Esnaola, L. Aretxabaleta. *Zuntz jarrai duten konpositeen 3D inpresioa*. Materialen Zientzia eta Teknologia IV. Kongresua, Donostia 2018.
- M. Baskaran, J. Mendikute, U. Morales, A. Esnaola, L. Aretxabaleta y J. Aurrekoetxea. *Integración de núcleos de impresión 3D en el proceso de CRTM*. XIII Congreso Nacional de Materiales Compuestos (MATCOMP19), Vigo 2019.
- A. Esnaola, U. Morales, M. Iragi, L. Aretxabaleta y J. Aurrekoetxea. *Comportamiento a flexión de estructuras sándwich obtenidas mediante impresión 3D con fibra continua*. XIII Congreso Nacional de Materiales Compuestos (MATCOMP19), Vigo 2019.
- U. Olaziregi, U. Morales, M. Merchán, L. Aretxabaleta, I. Ulacia. *Zuntz-jarraizko konpositeen fabrikazio gehigarrira egokitutako inertzia-bolanteen diseinua*. Materialen Zientzia eta Teknologia V. Kongresua, Bilbo 2021.

10.3.3. Proyectos de I+D

A continuación, se listan los proyectos de investigación en los que se ha colaborado durante el desarrollo de la presente tesis doctoral:

- **PARACOM:** Fabricación de PARAchoques de automoción mediante Pultrusión 3D e impresión 3D de COMposites – Exp. 92/17 (Diputación Foral de Gipuzkoa 2017).
- **ADDICOMP:** Additive Manufacturing of Fibre Reinforced Thermoplastic composites for Transports, Healthcare & Sports (Retos colaboración - RTI2018-094435-B-C33)
- **CIRMET:** Innovative and efficient solution, based on modular, versatile, smart process units for energy and resource flexibility in highly energy intensive processes. (Grant agreement – 820670)
- **SUCOMP:** SUelas de calzado para ciclistas fabricadas en COMPosites de fibra de carbono mediante impresión 3D (Hazitek 2018).
- **VEFADI:** Concepción de una plataforma para Vehículos Eléctricos utilizando herramientas de optimización topológica y Fabricación ADItiva de plásticos reforzados con fibras de carbono continuas. Exp. 576/20 (Diputación Foral de Gipuzkoa 2020)

Capítulo 11

Referencias bibliográficas

CAPÍTULO 11

Referencias bibliográficas

- 3DHubs2020 <https://www.3dhubs.com/> (visitada 20/X/2020)
- Abdewi2008 Abdewi EF, Sulaiman S, Hamouda AMS, Mahdi E. Quasi-static axial and lateral crushing of radial corrugated composite tubes. *Thin-Walled Struct* 2008;46:320–32. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2007.07.018>.
- Aguirre2012 Agirregomezkorta A, Martínez AB, Sánchez-Soto M, Aretxaga G, Sarrionandia M, Aurrekoetxea J. Impact behaviour of carbon fibre reinforced epoxy and non-isothermal cyclic butylene terephthalate composites manufactured by vacuum infusion, *Composites Part B: Engineering* 43 (2012) 2249–2256.
- Akkerman2020 Akkerman R, Bouwman M, Wijskamp S. Analysis of the Thermoplastic Composite Overmolding Process: Interface Strength. *Front Mater* 2020;7. <https://doi.org/10.3389/fmats.2020.00027>.
- AlAbadi2018 Al Abadi H, Thai HT, Paton-Cole V, Patel VI. Elastic properties of 3D printed fibre-reinforced structures. *Compos Struct* 2018. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.03.051>.
- Alwaker2021 Alwekar S, Ogle R, Kim S, Vaidya U. Manufacturing and characterization of continuous fiber-reinforced thermoplastic tape overmolded long fiber thermoplastic. *Compos Part B Eng* 2021;207. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108597>.
- Arao2012 Arao Y, Taniguchi N, Nishiwaki T, Hirayama N, Kawada H. Strain-rate dependence of the tensile strength of glass fibers. *J Mater Sci* 2012;47. <https://doi.org/10.1007/s10853-012-6360-z>.
- Arayo-Calvo2018 Araya-Calvo M, López-Gómez I, Chamberlain-Simon N, León-Salazar JL, Guillén-Girón T, Corrales-Cordero JS, et al. Evaluation of compressive and flexural properties of continuous fiber fabrication additive manufacturing technology. *Addit Manuf* 2018;22:157–64. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.05.007>.
- Ashby2007 Ashby M. Ch20 Materials, processes and environment, in *Materials Engineering, Science, Processing and Design*, ISBN-13: 978-0-7506-8391-3
- Aurrekoetxea2006 Aurrekoetxea J, Castillo G, Cortes F, Sarrionandia MA, Urrutibeascoa I. Failure of multimaterial fusion bonding interface generated during over-injection molding/thermoforming hybrid process. *J Appl Polym Sci* 2006;102. <https://doi.org/10.1002/app.23696>.
- Bannister2001 Bannister M. Challenges for composites into the next millennium - A reinforcement perspective. *Compos - Part A Appl Sci Manuf* 2001;32. [https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(01\)00008-2](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(01)00008-2).
- Bates2016 Bates SRG, Farrow IR, Trask RS. 3D printed polyurethane honeycombs for repeated tailored energy absorption. *Mater Des* 2016;112:172–83. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.08.062>.

- Baumann2017 Baumann F, Scholz J, Fleischer J. Investigation of a New Approach for Additively Manufactured Continuous Fiber-reinforced Polymers. *Procedia CIRP*, vol. 66, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.03.276>.
- Behrens2017 Behrens BA, Hübner S, Bonk C, Bohne F, Micke-Camuz M. Development of a Combined Process of Organic Sheet forming and GMT Compression Molding. *Procedia Eng.*, vol. 207, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.745>.
- Behrens2020 Behrens BA, Bohne F, Lorenz R, Arndt H, Hübner S, Micke-Camuz M. Numerical and experimental investigation of GMT compression molding and fiber displacement of UD-tape inserts. *Procedia Manuf.*, vol. 47, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.109>.
- Belingardi2013 Belingardi G, Beyene AT, Koricho EG. Geometrical optimization of bumper beam profile made of pultruded composite by numerical simulation. *Compos Struct* 2013;102:217–25. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2013.02.013>.
- Bendsøe2004 Bendsøe MP, Sigmund O. *Topology optimization-theory, methods and applications*. Springer, Berlin. 2004.
- Blank2013 Blank S. Why the Lean Start-Up Changes Everything. *Harvard Business Review* 2013;91:63-72.
- Blok2017 Blok LG, Kratz J, Lukaszewicz D, Hesse S, Ward C, Kassapoglou C. Improvement of the in-plane crushing response of CFRP sandwich panels by through-thickness reinforcements. *Compos Struct* 2017;161:15–22. <https://doi.org/10.1016/J.COMPSTRUCT.2016.11.034>.
- Blok2018 Blok LG, Longana ML, Yu H, Woods BKS. An investigation into 3D printing of fibre reinforced thermoplastic composites. *Addit Manuf* 2018;22:176–86. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.04.039>.
- Bondy2017 Bondy M, Pinter P, Altenhof W. Experimental characterization and modelling of the elastic properties of direct compounded compression molded carbon fibre/polyamide 6 long fibre thermoplastic, *Materials & Design* 122 (2017) 184–196.
- Bouwman2016 Bouwman MB, Donderwinkel T, Krämer, E, Wijskamp, S, Costa F. Overmolding - An integrated design approach for dimensional accuracy and strength of structural parts, in *CAMX 2016 - Composites and Advanced Materials Expo (Anaheim, CA)*, (2016) 26–29.
- Burnett2018 Burnett C. A., Kazancı Z., Falzon B. G. Comparative computational study of composite sandwich panels with varying auxetic core topologies and orientations subjected to air blast loading. *ECCM18 - 18th European Conference on Composite Materials*. 2018.7
- Caminero2018a Caminero MA, Chacón JM, García-Moreno I, Rodríguez GP. Impact damage resistance of 3D printed continuous fibre reinforced thermoplastic composites using fused deposition modelling. *Compos Part B Eng* 2018;148:93–103. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.04.054>.
- Caminero2018b Caminero MA, Chacón JM, García-Moreno I, Reverte JM. Interlaminar bonding performance of 3D printed continuous fibre reinforced thermoplastic composites using fused deposition modelling. *Polym Test* 2018;68:415–23. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2018.04.038>.
- Castanie2020 Castanie B, Bouvet C, Ginot M. Review of composite sandwich structure in aeronautic applications. *Compos Part C Open Access* 2020;1. <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2020.100004>.
- Cerdas2017 Cerdas F, Juraschek M, Thiede S, Herrmann C. Life Cycle Assessment of 3D Printed Products in a Distributed Manufacturing System. *J Ind Ecol* 2017;21. <https://doi.org/10.1111/jiec.12618>.

- Chabaud2019 Chabaud G, Castro M, Denoual C, Le Duigou A. Hygromechanical properties of 3D printed continuous carbon and glass fibre reinforced polyamide composite for outdoor structural applications. *Addit Manuf* 2019. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.01.005>.
- Chacon2019 Chacón JM, Caminero JM, Núñez PJ, García-Plaza E, García-Moreno I, Reverte JM. Additive manufacturing of continuous fibre reinforced thermoplastic composites using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties. *Composites Science and Technology* 181, 2019. 10.1016/j.compscitech.2019.107688
- ChangL2018 Chang L, Shen X. Design of cellular based structures in sandwiched morphing skin via topology optimization. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2018.
- ChenY2020 Chen Y, He Q. 3D-printed short carbon fibre reinforced perforated structures with negative Poisson's ratios: Mechanisms and design. *Compos Struct* 2020;236. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.111859>.
- Clausen2015 Clausen A, Wang F, Jensen JS, Sigmund O, Lewis JA. Topology Optimized Architectures with Programmable Poisson's Ratio over Large Deformations. *Adv Mater* 2015;27.
- Compton2014 Compton BG, Lewis JA. 3D-printing of lightweight cellular composites. *Adv Mater* 2014;26. <https://doi.org/10.1002/adma.201401804>.
- Conner2014 Conner BP, Manogharan GP, Martof AN, Rodomsky LM, Rodomsky CM, Jordan DC, et al. Making sense of 3-D printing: Creating a map of additive manufacturing products and services. *Addit Manuf* 2014;1. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2014.08.005>.
- CW2020 <https://www.compositesworld.com/articles/3d-printing-with-continuous-fiber-a-landscape>. (visitada 03/XII/2020)
- Daynes2017 Daynes S, Feih S, Lu WF, Wei J. Optimisation of functionally graded lattice structures using isostatic lines. *Mater Des* 2017;127. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.04.082>.
- Despeisse2017 Despeisse M, Baumers M, Brown P, Charnley F, Ford SJ, Garmulewicz A, et al. Unlocking value for a circular economy through 3D printing: A research agenda. *Technol Forecast Soc Change* 2017;115. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2016.09.021>.
- Diagnostico2018 <http://www.ihobe.eus/publicaciones/economia-circular-en-industria-pais-vasco-diagnostico>. (visitada 03/II/2021)
- Dickson2017 Dickson AN, Barry JN, McDonnell KA, Dowling DP. Fabrication of continuous carbon, glass and Kevlar fibre reinforced polymer composites using additive manufacturing. *Addit Manuf* 2017. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.06.004>.
- Dickson2018 Dickson AN, Ross KA, Dowling DP. Additive manufacturing of woven carbon fibre polymer composites. *Compos Struct* 2018. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.08.091>.
- Dong2020 Dong K, Liu L, Huang X, Xiao X. 3D printing of continuous fiber reinforced diamond cellular structural composites and tensile properties. *Compos Struct* 2020;250:112610. <https://doi.org/10.1016/J.COMPSTRUCT.2020.112610>.

- Dong2021 Dong K, Ke H, Panahi-Sarmad M, Yang T, Huang X, Xiao X. Mechanical properties and shape memory effect of 4D printed cellular structure composite with a novel continuous fiber-reinforced printing path. *Mater Des* 2021;198:109303. <https://doi.org/10.1016/J.MATDES.2020.109303>.
- Ekoi2021 Ekoi EJ, Dickson AN, Dowling DP. Investigating the fatigue and mechanical behaviour of 3D printed woven and nonwoven continuous carbon fibre reinforced polymer (CFRP) composites. *Compos Part B Eng* 2021;212. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.108704>.
- Ellen2018 https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/publications/Executive_summary_SP.pdf. (visitada 03/II/2019)
- Ellen2019 <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/our-work/activities/new-plastics-economy>. (visitada 19/XI/2020).
- ES2399383T Cubierta de eje de rueda
- ES2647961B1 Railing vehicle bearing shaft protector
- Esnaola2015 Esnaola A, Ulacia I, Aretxabaleta L, Aurrekoetxea J, Gallego I. Quasi-static crush energy absorption capability of E-glass/polyester and hybrid E-glass-basalt/polyester composite structures. *Mater Des* 2015. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.03.044>.
- Esnaola2016a Esnaola A, Ulacia I, Elguezabal B, Del Pozo De Dios E, Alba JJ, Gallego I. Design, manufacturing and evaluation of glass/polyester composite crash structures for lightweight vehicles. *Int J Automot Technol* 2016;17. <https://doi.org/10.1007/s12239-016-0099-5>.
- Esnaola2016b Esnaola A, Tena I, Aurrekoetxea J, Gallego I, Ulacia I. Effect of fibre volume fraction on energy absorption capabilities of E-glass/polyester automotive crash structures. *Compos Part B Eng* 2016;85:1–7. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.09.007>.
- Esnaola2018 Esnaola A, Tena I, Saenz-Dominguez I, Aurrekoetxea J, Gallego I, Ulacia I. Effect of the manufacturing process on the energy absorption capability of GFRP crush structures. *Compos Struct* 2018;187:316–324. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.12.079>.
- EstrategiaEC2020 <http://www.ihobe.eus/publicaciones/estrategia-economia-circular-euskadi-2030-2>, (visitada 19/II/2021).
- Evans2010 Evans AG, He MY, Deshpande VS, Hutchinson JW, Jacobsen AJ, Carter WB. Concepts for enhanced energy absorption using hollow micro-lattices. *Int J Impact Eng* 2010;37. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2010.03.007>.
- Farley 1989 Farley GL, Jones RM. Energy-Absorption Capability of Composites Tubes and Beams. NASA Tech Memo 1989.
- Farley 1991 Farley GL. The Effects of Crushing Speed on the Energy-Absorption Capability of Composite Tubes. *J Compos Mater* 1991;25. <https://doi.org/10.1177/002199839102501004>.
- Farley 1992 Farley GL, Jones RM. Crushing Characteristics of Continuous Fiber-Reinforced Composite Tubes. *J Compos Mater* 1992;26:37–50. <https://doi.org/10.1177/002199839202600103>.
- Ford2016 Ford S, Despeisse M. Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges. *J Clean Prod* 2016;137. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.150>.

- Frketic2017 Frketic J, Dickens T, Ramakrishnan S. Automated manufacturing and processing of fiber-reinforced polymer (FRP) composites: An additive review of contemporary and modern techniques for advanced materials manufacturing. *Addit Manuf* 2017;14:69–86. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.01.003>
- Gao2015 Gao W, Zhang Y, Ramanujan D, Ramani K, Chen Y, Williams CB, et al. The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. *CAD Comput Aided Des* 2015;69. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2015.04.001>.
- Gardiner2019 Skeleton design enables more competitive composite autostructures. *Composite World* (2019).
- Garmulewicz2018 Garmulewicz A, Holweg M, Veldhuis H, Yang A. Disruptive Technology as an Enabler of the Circular Economy: What Potential Does 3D Printing Hold? *Calif Manage Rev* 2018;60. <https://doi.org/10.1177/0008125617752695>.
- GE-aviation https://www.pressreleasefinder.com/prdocs/2019/GE_Additive_Overview_May2019.pdf. (visitada 03/XII/2019)
- Gebler2014 Gebler M, Schoot Uiterkamp AJM, Visser C. A global sustainability perspective on 3D printing technologies. *Energy Policy* 2014;74. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.08.033>.
- Goh2018 Goh GD, Dikshit V, Nagalingam AP, Goh GL, Agarwala S, Sing SL, et al. Characterization of mechanical properties and fracture mode of additively manufactured carbon fiber and glass fiber reinforced thermoplastics. *Mater Des* 2018;137:79–89. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.10.021>.
- Goh2019 Goh GD, Yap YL, Agarwala S, Yeong WY. Recent Progress in Additive Manufacturing of Fiber Reinforced Polymer Composite. *Adv Mater Technol* 2019. <https://doi.org/10.1002/admt.201800271>.
- Gonzalez 2017 González C, Vilatela JJ, Molina-Aldareguía JM, Lopes CS, LLorca J. Structural composites for multifunctional applications: Current challenges and future trends. *Prog Mater Sci* 2017;89:194–251. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.04.005>.
- Gu2018 Gu X, Koren Y. Manufacturing system architecture for cost-effective mass-individualization. *Manuf Lett* 2018;16. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2018.04.002>.
- Gupta2000 Gupta NK, Abbas H. Lateral collapse of composite cylindrical tubes between flat platens. *International Journal of Impact Engineering* 24, 329–346, 2000.
- Gwamuri2016 Gwamuri J, Franco D, Khan KY, Gauchia L, Pearce JM. High-efficiency solar-powered 3-D printers for sustainable development. *Machines* 2016;4. <https://doi.org/10.3390/machines4010003>.
- Hamada1992 Hamada H, Coppola JC, Hull D, Maekawa Z, Sato H. Comparison of energy absorption of carbon/epoxy and carbon/PEEK composite tubes. *Composites* 1992;23:245–52. [https://doi.org/10.1016/0010-4361\(92\)90184-V](https://doi.org/10.1016/0010-4361(92)90184-V).
- Harding1983 Harding J, Welsh LM. A tensile testing technique for fibre-reinforced composites at impact rates of strain. *J Mater Sci* 1983;18:1810–26. <https://doi.org/10.1007/BF00542078>.
- Harkati2017 Harkati E, Daoudi N, Bezazi A, Haddad A, Scarpa F. In-plane elasticity of a multi re-entrant auxetic honeycomb. *Compos Struct* 2017. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.08.014>.

- Henning2019 Henning F, Kärger L, Dörr D, Schirmaier FJ, Seuffert J, Bernath A. Fast processing and continuous simulation of automotive structural composite components. *Compos Sci Technol* 2019;171. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2018.12.007>.
- HouS2018 Hou S, Li T, Jia Z, Wang L. Mechanical properties of sandwich composites with 3d-printed auxetic and non-auxetic lattice cores under low velocity impact. *Mater Des* 2018;160:1305–21. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.11.002>.
- HouZ2018 Hou Z, Tian X, Zhang J, Li D. 3D printed continuous fibre reinforced composite corrugated structure. *Compos Struct* 2018;184:1005–10. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.10.080>.
- Huang2017 Huang J, Zhang Q, Scarpa F, Liu Y, Leng J. In-plane elasticity of a novel auxetic honeycomb design. *Compos Part B Eng* 2017;110. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.11.011>.
- Hull1991 Hull D. A unified approach to progressive crushing of fibre-reinforced composite tubes. *Compos Sci Technol* 1991;40. [https://doi.org/10.1016/0266-3538\(91\)90031-J](https://doi.org/10.1016/0266-3538(91)90031-J).
- Hürkamp2020 Hürkamp A, Gellrich S, Ossowski T, Beuscher J, Thiede S, Herrmann C, et al. Combining simulation and machine learning as digital twin for the manufacturing of overmolded thermoplastic composites. *J Manuf Mater Process* 2020;4. <https://doi.org/10.3390/JMMP4030092>.
- Ichichara2020 Ichihara N, Ueda M, Urushiyama Y, Todoroki A, Matsuzaki R, Hirano H. Progressive damage simulation for a 3D-printed curvilinear continuous carbon fiber-reinforced thermoplastic based on continuum damage mechanics. *Adv Compos Mater* 2020;29:459–74. <https://doi.org/10.1080/09243046.2020.1724430>.
- Imbalzano2016 Imbalzano G, Tran P, Ngo TD, Lee PVS. A numerical study of auxetic composite panels under blast loadings. *Compos Struct* 2016;135. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.09.038>.
- Ingorle2017 Ingorle A, Hao A, Liang R. Design and modeling of auxetic and hybrid honeycomb structures for in-plane property enhancement. *Mater Des* 2017;117. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.12.067>.
- Iragi2019 Iragi M, Pascual-González C, Esnaola A, Lopes CS, Aretxabaleta L. Ply and interlaminar behaviours of 3D printed continuous carbon fibre-reinforced thermoplastic laminates; effects of processing conditions and microstructure. *Addit Manuf* 2019;30. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100884>.
- Jiang2017 Jiang R, Kleer R, Piller FT. Predicting the future of additive manufacturing: A Delphi study on economic and societal implications of 3D printing for 2030. *Technol Forecast Soc Change* 2017;117. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2017.01.006>.
- Joo2020 Joo SJ, Yu MH, Seock Kim W, Lee JW, Kim HS. Design and manufacture of automotive composite front bumper assemble component considering interfacial bond characteristics between over-molded chopped glass fiber polypropylene and continuous glass fiber polypropylene composite. *Compos Struct* 2020;236:111849. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111849>.
- Ju2009 Ju, J, Summers, JD, Ziegert, J, & Fadel, G. "Design of Honeycomb Meta-Materials for High Shear Flexure." *Proceedings of the ASME 2009 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*. Volume 5: 35th Design Automation Conference, Parts A and B. San Diego, California, USA. August 30–September 2, 2009. pp. 805-813. ASME. <https://doi.org/10.1115/DETC2009-87730>

- Ju2011 Ju J, Summers JD. Hyperelastic constitutive modeling of hexagonal honeycombs subjected to in-plane shear loading. *Journal of Engineering Materials and Technology* 133. 2011.
- Justo2018 Justo J, Távora L, García-Guzmán L, París F. Characterization of 3D printed long fibre reinforced composites. *Compos Struct* 2018;185:537–48. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.11.052>.
- Kabir2020 Kabir SMF, Mathur K, Seyam AFM. A critical review on 3D printed continuous fiber-reinforced composites: History, mechanism, materials and properties. *Compos Struct* 2020;232. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111476>.
- Kaluza2017 Kaluza A, Kleemann S, Fröhlich T, Herrmann C, Vietor T. Concurrent Design & Life Cycle Engineering in Automotive Lightweight Component Development. *Procedia CIRP*, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.03.293>.
- Klosterman1998 Klosterman D, Chartoff R, Graves G, Osborne N, Priore B. Interfacial characteristics of composites fabricated by laminated object manufacturing. *Composites Part A*, 29A: 1165–1174, 1998
- Korner2015 Körner C, Liebold-Ribeiro Y. A systematic approach to identify cellular auxetic materials. *Smart Materials and Structures*, 24(2): 025013. 2015
- Kreiger2014 Kreiger MA, Mulder ML, Glover AG, Pearce JM. Life cycle analysis of distributed recycling of post-consumer high density polyethylene for 3-D printing filament. *J Clean Prod* 2014;70. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.02.009>.
- Lakes1987 Lakes R. Foam structures with a negative poisson's ratio. *Science* (80)1987;235:1038–40. <https://doi.org/10.1126/science.235.4792.1038>.
- Leary2019 Leary M. Design for additive manufacturing. 2019. <https://doi.org/10.1016/C2017-0-04238-6>.
- LiN2016 Li N, Li Y, Liu S. Rapid prototyping of continuous carbon fiber reinforced polylactic acid composites by 3D printing. *J Mater Process Technol* 2016;238. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.07.025>.
- LiN2020 Li N, Link G, Wang T, Ramopoulos V, Neumaier D, Hofele J, et al. Path-designed 3D printing for topological optimized continuous carbon fibre reinforced composite structures. *Compos Part B Eng* 2020;182. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107612>.
- Lira2010 Lira C, Scarpa F. Transverse shear stiffness of thickness gradient honeycombs. *Compos Sci Technol* 2010;70:930–6. <https://doi.org/10.1016/J.COMPSCITECH.2010.02.007>.
- LiS2020 Li S, Guo X, Li Q, Ruan D, Sun G. On lateral compression of circular aluminum, CFRP and GFRP tubes. *Compos Struct* 2020;232. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111534>.
- LiT2017 Li T, Wang L. Bending behavior of sandwich composite structures with tunable 3D-printed core materials. *Compos Struct* 2017;175:46–57. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.05.001>.
- LiT2018 Li T, Chen Y, Hu X, Li Y, Wang L. Exploiting negative Poisson's ratio to design 3D-printed composites with enhanced mechanical properties. *Materials & Design*, 142: 247–258, 2018.
- Liu2018 Liu T, Tian X, Zhang M, Abliz D, Li D, Ziegmann G. Interfacial performance and fracture patterns of 3D printed continuous carbon fiber with sizing reinforced PA6 composites. *Compos Part A Appl Sci Manuf* 2018;114:368–76. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2018.09.001>.

- Liu2020 Liu T, Tian X, Zhang Y, Cao Y, Li D. High-pressure interfacial impregnation by micro-screw in-situ extrusion for 3D printed continuous carbon fiber reinforced nylon composites. *Compos Part A Appl Sci Manuf* 2020;130:105770. <https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESA.2020.105770>.
- LiuS2018 Liu S, Li Y, Li N. A novel free-hanging 3D printing method for continuous carbon fiber reinforced thermoplastic lattice truss core structures. *Mater Des* 2018;137:235–44. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.10.007>.
- Llamas2018 Llamas Fernández J, Fernández Rodríguez JC. Lean Startup methodology: development and application to develop entrepreneurship. *Revista EAN* 2018:79–95.
- Madhi2012 Mahdi E, Hamouda AMS. Energy absorption capability of composite hexagonal ring systems. *Mater Des* 2012;34. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.07.070>.
- Madhi2014 Mahdi E, Sebaey TA. Crushing behavior of hybrid hexagonal/octagonal cellular composite system: Aramid/carbon hybrid composite. *Mater Des* 2014;63. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.06.001>.
- Mamalis1997 Mamalis AG, Robinson M, Manolakos DE, Demosthenous GA, Ioannidis MB, Carruthers J. Crashworthy capability of composite material structures. *Compos Struct* 1997;37. [https://doi.org/10.1016/S0263-8223\(97\)80005-0](https://doi.org/10.1016/S0263-8223(97)80005-0).
- Mamalis1998 Mamalis AG, Manolakos DE, Demosthenous GA, Ioannidis MB. Crash worthiness of composite thin-walled structural components. 1998. <https://doi.org/10.1201/9781315140452>.
- Mark2015 Three dimensional printer with composite filament fabrication. U.S. Patent No 9,156,205
- Matsuzaki2016 Matsuzaki R, Ueda M, Namiki M, Jeong TK, Asahara H, Horiguchi K, et al. Three-dimensional printing of continuous-fiber composites by in-nozzle impregnation. *Sci Rep* 2016;6. <https://doi.org/10.1038/srep23058>
- Matsuzaki2018 Matsuzaki R, Nakamura T, Sugiyama K, Ueda M, Todoroki A, Hirano Y, et al. Effects of Set Curvature and Fiber Bundle Size on the Printed Radius of Curvature by a Continuous Carbon Fiber Composite 3D Printer. *Addit Manuf* 2018;24:93–102. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.09.019>.
- Melenka2016 Melenka GW, Cheung BKO, Schofield JS, Dawson MR, Carey JP. Evaluation and prediction of the tensile properties of continuous fiber-reinforced 3D printed structures. *Compos Struct* 2016;153. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.07.018>.
- Meng2018 Meng Z, Wudy K, Drummer D, Crystallization Kinetics of Polyamide 12 during Selective Laser Sintering, *Polymers* 10 (2018) 168–181.
- Ngo2018 Ngo TD, Kashani A, Imbalzano G, Nguyen KTQ, Hui D. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Compos Part B Eng* 2018. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012>.
- Niaki2019 Niaki MK, Torabi SA, Nonino F. Why manufacturers adopt additive manufacturing technologies: The role of sustainability. *J Clean Prod* 2019;222. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.019>.
- Nishikawa2018 Nishikawa M, Fukuzo A, Matsuda N, Hojo M. Evaluation of elastic-plastic response of discontinuous carbon fiber-reinforced thermoplastics: experiments and considerations based on load-transfer-based micromechanical simulation. *Composites Science and Technology* 155 (2018) 117–125.

- Nomura2015 Nomura T, Dede EM, Lee J, Yamasaki S, Matsumori T, Kawamoto A, et al. General topology optimization method with continuous and discrete orientation design using isoparametric projection. *Int J Numer Methods Eng* 2015;101. <https://doi.org/10.1002/nme.4799>.
- Osterwalder2010 Osterwalder A, Pigneur Y. *Business model generation: a handbook for visionaries, game changers, and challengers*. Ney Jersey: John Wiley & Sons; 2010.
- Oztan2019 Oztan C, Karkkainen R, Fittipaldi M, Nygren G, Roberson L, Lane M, et al. Microstructure and mechanical properties of three dimensional-printed continuous fiber composites. *J Compos Mater* 2018;53:271–80. <https://doi.org/10.1177/0021998318781938>.
- Palanivelu2010 Palanivelu S, Paepegem W Van, Degrieck J, Vantomme J, Kakogiannis D, Ackeren J Van, et al. Comparison of the crushing performance of hollow and foam-filled small-scale composite tubes with different geometrical shapes for use in sacrificial cladding structures. *Compos Part B Eng* 2010;41:434–45. <https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESB.2010.05.009>.
- Palanivelu2011 Palanivelu S, Paepegem W Van, Degrieck J, Vantomme J, Kakogiannis D, Ackeren J Van, et al. Crushing and energy absorption performance of different geometrical shapes of small-scale glass/polyester composite tubes under quasi-static loading conditions. *Compos Struct* 2011;93:992–1007. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2010.06.021>.
- Palanivelu2014 Van Paepegem W, Palanivelu S, Degrieck J, Vantomme J, Reymen B, Kakogiannis D, et al. Blast performance of a sacrificial cladding with composite tubes for protection of civil engineering structures. *Compos Part B Eng* 2014;65. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.02.004>.
- Parandoush2017a Parandoush P, Tucker L, Zhou C, Lin D. Laser assisted additive manufacturing of continuous fiber reinforced thermoplastic composites. *Mater Des* 2017. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.06.013>.
- Parandoush2017b Parandoush P, Lin D. A review on additive manufacturing of polymer-fiber composites. *Compos Struct* 2017;182:36–53. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.08.088>.
- ParkCK2012 Park, C-K., Kan, C-D., Hollowell, W., & Hill, S.I. (2012, December). Investigation of opportunities for lightweight vehicles using advanced plastics and composites. (Report No. DOT HS 811 692). Washington, DC: National Highway Traffic Safety Administration
- ParkCH2012 Park CH, Lee W II. Compression molding in polymer matrix composites. *Manuf. Tech. Polym. Matrix Compos. A Vol. Woodhead Publ. Ser. Compos. Sci. Eng.*, 2012. <https://doi.org/10.1016/B978-0-85709-067-6.50003-1>.
- Pascual-Gonzalez2020 Pascual-González C, Iragi M, Fernández A, Fernández-Blázquez JP, Aretxabaleta L, Lopes CS. An approach to analyse the factors behind the micromechanical response of 3D-printed composites. *Compos Part B Eng* 2020;186. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.107820>.
- Peng2020 Peng Y, Wu Y, Li S, Wang K, Yao S, Liu Z, et al. Tailorable rigidity and energy-absorption capability of 3D printed continuous carbon fiber reinforced polyamide composites. *Compos Sci Technol* 2020;199. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2020.108337>.
- Penumakala2020 Penumakala PK, Santo J, Thomas A. A critical review on the fused deposition modeling of thermoplastic polymer composites. *Compos Part B Eng* 2020;201. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108336>.

- PlasticsEurope2018 https://www.plasticseurope.org/application/files/6315/4510/9658/Plastics_the_facts_2018_AF_web.pdf, visitada 20/XI/2019
- Pollard2016 Pollard D, Ward C, Herrmann G, Etches J. The manufacture of honeycomb cores using Fused Deposition Modeling. *Adv Manuf Polym Compos Sci* 2017;3:21–31. <https://doi.org/10.1080/20550340.2017.1306337>.
- ProyectoEC2018 <https://www.euskadi.eus/eusko-jaurlaritza/-/liburua/36-proyectos-demostracion-economia-circular-pais-vasco-resultados-iniciativas-empresariales/>, (visitada 19/XI/2020).
- Rancic2012 Rancic Moogk D. Minimum Viable Product and the Importance of Experimentation in Technology Startups. *Technology Innovation Management Review* 2012;2:23–6.
- Rauch2018 Rauch E, Unterhofer M, Dallasega P. Industry sector analysis for the application of additive manufacturing in smart and distributed manufacturing systems. *Manuf Lett* 2018;15. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2017.12.011>.
- Ren2018 Ren X, Das R, Tran P, Ngo TD, Xie YM. Auxetic metamaterials and structures: A review. *Smart Mater Struct* 2018;27. <https://doi.org/10.1088/1361-665X/aaa61c>.
- Rodriguez2011 Rodriguez JF, Thomas JP, Renaud JE. Characterization of the mesostructure of fused-deposition acrylonitrile-butadiene-styrene materials. *Rapid Prototyp J* 2000;6:175–86. <https://doi.org/10.1108/13552540010337056>.
- Roselli1997 Rosselli F, Santare MH, Güçeri SI. Effects of processing on laser assisted thermoplastic tape consolidation, *Compos. A: Appl. Sci. Manuf.* 28 (12), 1023–1033. 1997.
- Rouzegar2015 Rouzegar J, Assae H, Niknejad A, Elahi SA. Geometrical discontinuities effects on lateral crushing and energy absorption of tubular structures. *Mater Des* 2015;65:343–59. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.09.041>
- Saenz-Dominguez2019 Saenz-Dominguez I, Tena I, Esnaola A, Sarrionandia M, Torre J, Aurrekoetxea J. Design and characterisation of cellular composite structures for automotive crash-boxes manufactured by out of die ultraviolet cured pultrusion. *Compos Part B Eng* 2019;160:217–24. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.10.046>.
- Sarvestani2018 Yazdani Sarvestani H, Akbarzadeh AH, Mirbolghasemi A, Hermenean K. 3D printed meta-sandwich structures: Failure mechanism, energy absorption and multi-hit capability. *Mater Des* 2018;160:179–93. <https://doi.org/10.1016/J.MATDES.2018.08.061>.
- Sauer2016 Sauer BB, Kampert WG, Wakeman MD, Yuan S. Screening method for the onset of bonding of molten polyamide resin layers to continuous fiber reinforced laminate sheets. *Compos Sci Technol* 2016;129. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2016.04.030>.
- Sauerwein2019 Sauerwein M, Doubrovski E, Balkenende R, Bakker C. Exploring the potential of additive manufacturing for product design in a circular economy. *J Clean Prod* 2019;226. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.108>.
- Saxena2016 Saxena KK., Das R. and Calius EP. Three Decades of Auxetics Research-Materials with Negative Poisson's Ratio: A Review. *Engineering* 2016;2. <https://doi.org/10.1002/adem.201600053>

- Schaedler2013 Schaedler TA, Ro C, Sorensen AE, Eckel Z, Yang SS, Carter WB, Jacobsen AB. Designing Metallic Microlattices for Energy Absorber Applications. *Advanced Engineering Materials*, 16: 276–283. 2013.
- Shah2019 Shah SZH, Karuppanan S, Megat-Yusoff PSM, Sajid Z. Impact resistance and damage tolerance of fiber reinforced composites: A review. *Compos Struct* 2019;217. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.03.021>.
- Shiratori2020 Shiratori H, Todoroki A, Ueda M, Matsuzaki R, Hirano Y. Mechanism of folding a fiber bundle in the curved section of 3D printed carbon fiber reinforced plastics. *Adv Compos Mater* 2020. <https://doi.org/10.1080/09243046.2019.1682794>.
- Sigmund2000 Sigmund O. A new class of extremal composites. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 48: 397–428. 2000
- Singh2017 Singh S, Ramakrishna S, Gupta MK. Towards zero waste manufacturing: A multidisciplinary review. *J Clean Prod* 2017;168. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.108>.
- Siviour2016 Siviour CR, Jordan JL. High Strain Rate Mechanics of Polymers: A Review. *J Dyn Behav Mater* 2016. <https://doi.org/10.1007/s40870-016-0052-8>.
- Sood2010 Sood AK, Ohdar RK, Mahapatra SS. Parametric appraisal of mechanical property of fused deposition modelling processed parts. *Mater Des* 2010;31. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.06.016>.
- Striwe2018 Striwe J, Reuter C, Sauerland KH, Tröster T. Manufacturing and crashworthiness of fabric-reinforced thermoplastic composites. *Thin-Walled Struct* 2018;123. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2017.11.011>.
- Sugiyama2018 Sugiyama K, Matsuzaki R, Ueda M, Todoroki A, Hirano Y. 3D printing of composite sandwich structures using continuous carbon fiber and fiber tension. *Compos Part A Appl Sci Manuf* 2018;113:114–21. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2018.07.029>.
- SunY2017 Sun Y, Li Y. Prediction and experiment on the compressive property of the sandwich structure with a chevron carbon-fibre-reinforced composite folded core. *Compos Sci Technol* 2017;150:95–101. <https://doi.org/10.1016/J.COMPSCITECH.2017.06.029>.
- Thomas2016 Thomas D. Costs, benefits, and adoption of additive manufacturing: a supply chain perspective. *Int J Adv Manuf Technol* 2016;85. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7973-6>.
- TianX2016 Tian X, Liu T, Yang C, Wang Q, Li D. Interface and performance of 3D printed continuous carbon fiber reinforced PLA composites. *Compos Part A Appl Sci Manuf* 2016. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2016.05.032>.
- Tofail2018 Tofail SAM, Koumoulos EP, Bandyopadhyay A, Bose S, O'Donoghue L, Charitidis C. Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities. *Mater Today* 2018;21. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2017.07.001>.
- Trudel2018 Trudel-Boucher D, Champagne MF. Stamping of high performance thermoplastic composite intrusion beams. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 418, 2018. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/418/1/012127>.
- Tsouknidas2016 Tsouknidas A, Pantazopoulos M, Katsoulis I, Fasnakis D, Maropoulos S, Michailidis N. Impact absorption capacity of 3D-printed components fabricated by fused deposition modelling. *Mater Des* 2016;102:41–4. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.03.154>.

- Ueda2020 Ueda M, Kishimoto S, Yamawaki M, Matsuzaki R, Todoroki A, Hirano Y, et al. 3D compaction printing of a continuous carbon fiber reinforced thermoplastic. *Compos Part A Appl Sci Manuf* 2020;137:105985. <https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESA.2020.105985>.
- Valverde2020 Valverde MA, Kupfer R, Wollmann T, Kawashita LF, Gude M, Hallett SR. Influence of component design on features and properties in thermoplastic overmoulded composites. *Compos Part A Appl Sci Manuf* 2020;132. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2020.105823>.
- Klift2016 Der Klift F Van, Koga Y, Todoroki A, Ueda M, Hirano Y, Matsuzaki R. 3D Printing of Continuous Carbon Fibre Reinforced Thermo-Plastic (CFRTP) Tensile Test Specimens. *Open J Compos Mater* 2016;06. <https://doi.org/10.4236/ojcm.2016.61003>.
- Vieille2013 Vieille B, Casado VM, Bouvet C. About the impact behavior of woven-ply carbon fiber-reinforced thermoplastic- and thermosetting-composites: A comparative study. *Compos Struct* 2013;101. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2013.01.025>.
- Wakeman2002 Wakeman MD, Hagstrand PO, Bonjour F, Bourban PE, Månson JAE. Robotic tow placement for local reinforcement of glass mat thermoplastics (GMTs). *Compos Part A Appl Sci Manuf* 2002;33. [https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(02\)00086-6](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(02)00086-6).
- WangF2014 Wang F, Sigmund o, Jensen JS. Design of materials with prescribed nonlinear properties. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 69: 156–174. 2014.
- WangH2019 Wang H, Lu Z, Yang Z, Li X. A novel re-entrant auxetic honeycomb with enhanced in-plane impact resistance. *Compos Struct* 2019;208. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.10.024>.
- WangXT2017 Wang XT, Wang B, Li XW, Ma L. Mechanical properties of 3D re-entrant auxetic cellular structures. *Int J Mech Sci* 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2017.05.048>.
- WEF http://www3.weforum.org/docs/WEF_The_New_Plastics_Economy.pdf, visitada 20/XI/2019
- Wei2019 Wei X, Li D, Xiong J. Fabrication and mechanical behaviors of an all-composite sandwich structure with a hexagon honeycomb core based on the tailor-folding approach. *Compos Sci Technol* 2019;184. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2019.107878>.
- Weller2015 Weller C, Kleer R, Piller FT. Economic implications of 3D printing: Market structure models in light of additive manufacturing revisited. *Int J Prod Econ* 2015;164:43–56. <https://doi.org/10.1016/J.IJPE.2015.02.020>.
- Werken2019 van de Werken N, Hurley J, Khanbolouki P, Sarvestani AN, Tamijani AY, Tehrani M. Design considerations and modeling of fiber reinforced 3D printed parts. *Compos Part B Eng* 2019. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.12.094>.
- Yogeshvaran2020 Yogeshvaran RN, Liu BG, Farukh F, Kandan K. Out-of-Plane Compressive Response of Additively Manufactured Cross-Ply Composites. *J Mech* 2020;36. <https://doi.org/10.1017/jmech.2019.59>
- York2018 York JM. Putting Lean Startup into Perspective: A Novel Approach for Discovering and Developing a Successful Business Model. *Arch Bus Adm Manag: ABAM-104 DOI* 2018;10.

- Zarei2007 Zarei H, Kröger M, Albertsen H. An experimental and numerical crashworthiness investigation of thermoplastic composite crash boxes. *Compos Struct* 2008;85. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2007.10.028>.
- Zeng2021 Zeng C, Liu L, Bian W, Leng J, Liu Y. Compression behavior and energy absorption of 3D printed continuous fiber reinforced composite honeycomb structures with shape memory effects. *Addit Manuf* 2021;38. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.101842>.
- Zhang2021 Zhang H, Chen J, Yang D. Fibre misalignment and breakage in 3D printing of continuous carbon fibre reinforced thermoplastic composites. *Addit Manuf* 2021;38. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101775>
- Zhao2020 Zhao Y, Chen L, Wu Z, Du B, Chen L, Li W, et al. Lateral crushing behavior of novel carbon fiber/epoxy composite bidirectional self-locked thin-walled tubular structure and system. *Thin-Walled Struct* 2020;157. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.107063>.