



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

Departamento: Ingeniería Civil, de Materiales y Fabricación

Áreas de Conocimiento: Ingeniería de los procesos de fabricación

Mecánica de medios continuos y teoría de estructuras

TRABAJO FIN DE GRADO

Propuestas de núcleos de bolas de golf obtenidos mediante fabricación aditiva por extrusión de material. Caracterización experimental.

Grado en

Ingeniería Mecánica

Autor: Javier Ros Calafat

Tutor: Sergio Martín Béjar

Tutor: Felipe García Sánchez

MÁLAGA, Junio de 2.023

Agradecimientos

En primer lugar, quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mis dos tutores, D. Sergio Martín Béjar y D. Felipe Sánchez García, por su excelente labor de supervisión, apoyo, orientación y confianza durante todo el proceso de elaboración de este trabajo. Sin su ayuda y sus valiosos consejos, este proyecto no habría sido posible.

Asimismo, quiero dar las gracias a mi familia, por su paciencia, comprensión y ánimo en los momentos más difíciles. Ellos han sido mi fuente de inspiración y motivación para superar este reto académico.

También quiero agradecer a mis compañeros de carrera, por acompañarme en esta aventura y compartir conmigo tantas experiencias y conocimientos.

Finalmente, quiero dedicar este trabajo a todas las personas que, de una forma u otra, han contribuido a mi formación y a mi crecimiento personal y profesional. A todos ellos, mi más profundo reconocimiento y gratitud.

Resumen

El presente trabajo pretende estudiar la posibilidad de obtener nuevos modelos de núcleos de bolas de golf con un porcentaje de relleno inferior al 100%, mediante fabricación aditiva, gracias a las posibilidades que esta nueva tecnología permite. Para ello, se han diseñado tres posibles modelos que han sido fabricados mediante tres materiales diferentes (PLA, HIPS y Filaflex), seleccionados por sus buenas cualidades para ser utilizados en dicho proceso de fabricación y por poseer características próximas a las de los materiales empleados para los núcleos actuales.

Tras el diseño, se ha realizado la fabricación de los modelos y se han realizado ensayos estáticos de compresión limitando la deformación y en segundo caso, hasta alcanzar la rotura. Además, se han realizado ensayos de compresión dinámicos, bajo carga de impacto, a baja velocidad. Finalmente, tras el análisis de los resultados y valores de interés, se obtiene que, pese a existir diferencias entre las orientaciones de las capas, el material más adecuado para la fabricación de los modelos, entre los ensayados, es el Filaflex debido a su menor valor de rigidez y por lo tanto mayor capacidad de deformación elástica y a ser el material que menos energía absorbe en los ensayos de impacto. Por otro lado, el mejor modelo es el de varillas al lograr aligerar el modelo original y al ser el modelo que presenta menor valor de rigidez.

ÍNDICE GENERAL

Índice:

Glosario de términos	15
1. Introducción	17
1.1. Contexto.....	19
2. Objetivos	21
3. Antecedentes	25
3.1. Golf.....	27
3.1.1. Historia.....	27
3.1.2. Bola convencional.....	28
3.1.3. Normativa actual	30
3.2. Fabricación aditiva	31
3.3. Estado del arte	34
4. Metodología	37
4.1. Diseño de los modelos	39
4.2. Fabricación de los modelos	39
4.3. Ensayos estáticos de compresión	41
4.4. Ensayo de compresión bajo carga de impacto a baja velocidad	42
5. Resultados	45
5.1. Diseño de los modelos	47
5.2. Fabricación de los modelos	50
5.3. Ensayos estáticos de compresión	52
5.4. Ensayos de compresión dinámica bajo carga de impacto a baja velocidad....	59
5.5. Ensayos de estáticos compresión hasta rotura	69
6. Conclusiones.....	71
7. Líneas futuras de investigación	75
Anexos	79
Anexo I: Ensayos estáticos de compresión.....	81
Anexo II: Ensayos de compresión dinámica bajo carga de impacto a baja velocidad	90
Gráficas fuerza frente al tiempo	90
Gráficas energía frente al tiempo	100
Anexo III: Ensayos estáticos de compresión hasta rotura.....	109
8. Referencias.....	113

Índice de figuras:

Figura 1 - Número de federados por países en Europa.....	28
Figura 2 – Bola de golf de 2 capas. [17].....	29
Figura 3- Bola de golf de 3 capas. [17]	29
Figura 4 - Bola de golf multicapa. [17].....	30
Figura 5 – Impresora 3D de la firma RAISE3D modelo Pro2.....	39
Figura 6 - Modelo sin material de soporte.	40
Figura 7 – Máquina universal de ensayo de la firma SERVOSIS modelo ME405/10.....	41
Figura 8 – Sistema de impacto vertical CEAS 9350 (Instron®)	42
Figura 9 – Posición de la probeta en los ensayos de compresión dinámica bajo carga de impacto.....	43
Figura 10 - Modelo de varillas generado mediante SolidWorks.	47
Figura 11 - Sección del modelo de varillas con capas generado mediante SolidWorks.	48
Figura 12 - Modelo de agujeros generado mediante SolidWorks.....	48
Figura 13 - Sección del modelo de agujeros sin núcleo generado mediante SolidWorks.	49
Figura 14 - Sección del modelo de agujeros con núcleo generado mediante SolidWorks.	49
Figura 15 - (a) Modelo con núcleo con soporte. (b) Modelo de varillas con soporte. (c) Modelo sin núcleo con soporte.....	50
Figura 16 - (a) Modelo sin núcleo fabricado mediante PLA. (b) Modelo de varillas fabricado mediante HIPS. (c) Modelo con núcleo fabricado mediante Filaflex.....	51
Figura 17 - Proceso de fabricación del modelo de varillas fabricado con PLA.....	51
Figura 18 – Valores F-D ensayo estático de compresión de la probeta HIPS CN en dirección perpendicular.....	53
Figura 19 – Valores F-D ensayo estático de compresión de la probeta HIPS CN en dirección perpendicular modificado.	54
Figura 20 - Diagrama de barras de los valores de ajuste de los ensayos estáticos de compresión.....	57

Figura 21 - Fuerzas máximas aplicadas en los ensayos estáticos de compresión adimensionalizadas con respecto a la probeta PLA CN ensayada en la dirección perpendicular.	59
Figura 22 – Partes de las gráficas F-t de los ensayos dinámicos de compresión mediante carga de impacto.	60
Figura 23 - Valores de fuerza máxima adimensionalizados con respecto al modelo HIPS CN en dirección paralela.....	62
Figura 24 - Partes de las gráficas E-t de los ensayos dinámicos de compresión mediante carga de impacto.	63
Figura 25 - Valores de energía absorbida adimensionalizados con la probeta PLA CN en dirección paralela.	65
Figura 26 – Variables de los ensayos de compresión dinámica de las probetas de PLA adimensionalizadas con el mayor valor de cada parámetro.....	66
Figura 27 - Variables de los ensayos de compresión dinámica de las probetas de HIPS adimensionalizadas con el mayor valor de cada parámetro.....	67
Figura 28 - Variables de los ensayos de compresión dinámica de las probetas de Filaflex adimensionalizadas con el mayor valor de cada parámetro.....	68
Figura 29 - Resultado ensayo rotura probetas sin núcleo (a) PLA, (b) HIPS, (c) Filaflex.	69
Figura 30 – Valores de fuerza máxima adimensionalizados con respecto a la probeta de PLA CN.	70
Figura 31 – Línea de tendencia F-D ensayo estático de compresión de la probeta PLA CN en dirección perpendicular.	81
Figura 32 – Línea de tendencia F-D ensayo estático de compresión de la probeta PLA CN en dirección paralela.....	81
Figura 33 – Línea de tendencia F-D ensayo estático de compresión de la probeta PLA SN en dirección perpendicular.	82
Figura 34 – Línea de tendencia F-D ensayo estático de compresión de la probeta PLA SN en dirección paralela.	82
Figura 35 – Línea de tendencia F-D ensayo estático de compresión de la probeta PLA VAR en dirección perpendicular.	83
Figura 36 – Línea de tendencia F-D ensayo estático de compresión de la probeta PLA VAR en dirección paralela.....	83

Figura 37 – Línea de tendencia F-D ensayo estático de compresión de la probeta HIPS CN en dirección perpendicular.	84
Figura 38 – Línea de tendencia F-D ensayo estático de compresión de la probeta HIPS CN en dirección paralela.....	84
Figura 39 – Línea de tendencia F-D ensayo estático de compresión de la probeta HIPS SN en dirección perpendicular.	85
Figura 40 – Línea de tendencia F-D ensayo estático de compresión de la probeta HIPS SN en dirección paralela.....	85
Figura 41 – Línea de tendencia F-D ensayo estático de compresión de la probeta HIPS VAR en dirección perpendicular.....	86
Figura 42 – Línea de tendencia F-D ensayo estático de compresión de la probeta HIPS VAR en dirección paralela.....	86
Figura 43 – Línea de tendencia F-D ensayo estático de compresión de la probeta Filaflex CN en dirección perpendicular.....	87
Figura 44 – Línea de tendencia F-D ensayo estático de compresión de la probeta Filaflex CN en dirección paralela.	87
Figura 45 – Línea de tendencia F-D ensayo estático de compresión de la probeta Filaflex SN en dirección perpendicular.....	88
Figura 46 – Línea de tendencia F-D ensayo estático de compresión de la probeta Filaflex SN en dirección paralela.....	88
Figura 47 – Línea de tendencia F-D ensayo estático de compresión de la probeta Filaflex VAR en dirección perpendicular.....	89
Figura 48 – Línea de tendencia F-D ensayo estático de compresión de la probeta Filaflex VAR en dirección paralela.	89
Figura 49 – Curvas F-t ensayo de compresión dinámica de la probeta PLA CN en dirección perpendicular.....	90
Figura 50 – Curvas F-t ensayos de compresión dinámica de la probeta PLA CN en dirección paralela.	91
Figura 51 - Curvas F-t ensayos de compresión dinámica de la probeta PLA SN dirección perpendicular.	91
Figura 52 – Curvas F-t ensayos de compresión dinámica de la probeta PLA SN en dirección paralela.	92

Figura 53 – Curva F-t ensayos de compresión dinámica de la probeta PLA VAR en dirección perpendicular.....	92
Figura 54 – Curvas F-t ensayos de compresión dinámica de la probeta PLA VAR en dirección paralela.	93
Figura 55 – Curvas F-t ensayos de compresión dinámica de la probeta HIPS CN en dirección perpendicular.....	93
Figura 56 – Curvas F-t ensayos de compresión dinámica de la probeta HIPS CN en dirección paralela.	94
Figura 57 – Curvas F-t ensayos de compresión dinámica de la probeta HIPS SN en dirección perpendicular.....	95
Figura 58 – Curvas F-t ensayos de compresión dinámica de la probeta HIPS SN en dirección paralela.	95
Figura 59 – Curvas F-t ensayos de compresión dinámica de la probeta HIPS VAR en dirección perpendicular.....	96
Figura 60 – Curvas F-t ensayos de compresión dinámica de la probeta HIPS VAR en dirección paralela.	96
Figura 61 – Curvas F-t ensayos de compresión dinámica de la probeta Filaflex CN en dirección perpendicular.....	97
Figura 62 – Curvas F-t ensayos de compresión dinámica de la probeta Filaflex CN en dirección paralela.	97
Figura 63 – Curvas F-t ensayos de compresión dinámica de la probeta Filaflex SN en dirección perpendicular.....	98
Figura 64 – Curvas F-t ensayos de compresión dinámica de la probeta Filaflex SN en dirección paralela.	98
Figura 65 – Curvas F-t ensayos de compresión dinámica de la probeta Filaflex VAR en dirección perpendicular.....	99
Figura 66 – Curvas F-t ensayos de compresión dinámica de la probeta Filaflex VAR en dirección paralela.	99
Figura 67 - Curvas E-t ensayos de compresión dinámica de la probeta PLA CN en dirección perpendicular.....	100
Figura 68 - Curvas E-t ensayos de compresión dinámica de la probeta PLA CN en dirección paralela.	100

Figura 69 - Curvas E-t ensayos de compresión dinámica de la probeta PLA SN en dirección perpendicular.....	101
Figura 70 - Curvas E-t ensayos de compresión dinámica de la probeta PLA SN en dirección paralela.	101
Figura 71 - Curvas E-t ensayos de compresión dinámica de la probeta PLA VAR en dirección perpendicular.....	102
Figura 72 - Curvas E-t ensayos de compresión dinámica de la probeta PLA VAR en dirección paralela.	102
Figura 73 - Curvas E-t ensayos de compresión dinámica de la probeta HIPS CN en dirección perpendicular.....	103
Figura 74 - Curvas E-t ensayos de compresión dinámica de la probeta HIPS CN en dirección paralela.	103
Figura 75 - Curvas E-t ensayos de compresión dinámica de la probeta HIPS SN en dirección perpendicular.....	104
Figura 76 - Curvas E-t ensayos de compresión dinámica de la probeta HIPS SN en dirección paralela.	104
Figura 77 - Curvas E-t ensayos de compresión dinámica de la probeta HIPS VAR en dirección perpendicular.....	105
Figura 78 - Curvas E-t ensayos de compresión dinámica de la probeta HIPS VAR en dirección paralela.	105
Figura 79 - Curvas E-t ensayos de compresión dinámica de la probeta Filaflex CN en dirección perpendicular.....	106
Figura 80 - Curvas E-t ensayos de compresión dinámica de la probeta Filaflex CN en dirección paralela.	106
Figura 81 - Curvas E-t ensayos de compresión dinámica de la probeta Filaflex SN en dirección Perpendicular.....	107
Figura 82 - Curvas E-t ensayos de compresión dinámica de la probeta Filaflex SN en dirección paralela.	107
Figura 83 - Curvas E-t ensayos de compresión dinámica de la probeta Filaflex VAR en dirección perpendicular.....	108
Figura 84 - Curvas E-t ensayos de compresión dinámica de la probeta Filaflex VAR en dirección paralela.	108

Figura 85 - Curvas F-D ensayos estáticos de compresión hasta rotura PLA.....	109
Figura 86- Curvas F-D ensayos estáticos de compresión hasta rotura HIPS.	110
Figura 87 - Curvas F-D ensayos estáticos de compresión hasta rotura Filaflex.	110

Índice de tablas:

Tabla 1 - Parámetros de impresión para los materiales empleados en este trabajo. ...	40
Tabla 2 - Condiciones de impresión establecidas para la impresión de los modelos en este trabajo.....	40
Tabla 3 – Configuración de la plataforma y los soportes establecidos para la impresión de los modelos.....	41
Tabla 4 – Volúmenes y relaciones de relleno de una esfera maciza y de los modelos estudiados en este trabajo.	50
Tabla 5 - Masa de los diferentes modelos fabricados según su diseño y material.....	51
Tabla 6 - Diámetros de los modelos en las direcciones paralela, perpendicular, medía y desviación.	52
Tabla 7 – Recopilación valores de rigidez y R^2 obtenidos en los ensayos estáticos de compresión.	54
Tabla 8 - Fuerzas máximas aplicadas en los ensayos estáticos de compresión estática.	57
Tabla 9 - Valores de fuerza máxima obtenidos en los ensayos dinámicos de compresión.	61
Tabla 10 - Valores de energía absorbida ensayos de compresión dinámica.	64
Tabla 11 - Valores de los desplazamientos máximos obtenidos en los ensayos de compresión dinámica.	65
Tabla 12 – Valores máximos de fuerza y desplazamiento máximos de los ensayos estáticos de compresión a rotura.....	70

Glosario de términos

- **PLA:** Ácido poliláctico.
- **HIPS:** Poliestireno de alto impacto.
- **FF:** Filaflex
- **CN:** Modelo con núcleo.
- **SN:** Modelo sin núcleo.
- **VAR:** Modelo de varillas.
- **PERP/+:** Perpendicular a la deposición las capas.
- **PAR/=:** Paralelo a la deposición las capas.
- *****: Valor adimensionalizado.
- **E:** Energía.
- **F:** Fuerza.
- **D:** Desplazamiento.
- **E_{max}:** Energía máxima.
- **E_{abs}:** Energía absorbida.
- **R&A:** Royal and Ancient.
- **USGA:** United States Golf Association.
- **FDM:** Fused Deposition Modeling.
- **FFF:** Fused Filament Fabrication.
- **SLA:** Estereolitografía.
- **SLS:** Selective Laser Sintering.
- **DLP:** Digital Light Processing.

1. Introducción

1.1. Contexto

En la actualidad, los procesos de fabricación aditiva se han convertido en una oportunidad para mejorar las características de productos que ya se encontraban en el mercado y se obtenían por procesos de fabricación de tipo convencional. Aunque sea una tecnología joven y los tiempos de fabricación en esta nueva tipología de procesos es generalmente mayor que en los convencionales, permite la fabricación de piezas con geometrías más complejas que difícilmente se podrían obtener por otro tipo de proceso de fabricación.

Estos procesos pueden ser clasificados mediante diferentes criterios. En el presente trabajo, el proceso de fabricación se ha llevado a cabo mediante el uso de un material de partida sólido que será posteriormente tratado para conformar la pieza. Este material se encuentra inicialmente en forma de hilo enrollado sobre una bobina, dicho material será tratado aportando calor con el fin de cambiarlo a un estado plástico y formar así las capas de la pieza. Por lo tanto, el modelo final se obtendrá a partir del proceso de fabricación aditiva mediante extrusión de material.

En la actividad deportiva continuamente se está estudiando el comportamiento de los elementos que forman parte de la misma, como puede ser el comportamiento de una bola, el elemento de golpeo, etc. En el caso de la práctica de golf, el proceso de fabricación de las bolas es muy tradicional y apenas se han desarrollado cambios en los últimos años. La bola de golf es uno de los elementos más importantes dentro del mismo deporte, es por eso por lo que es imprescindible conocer y controlar varios factores como puedan ser su comportamiento frente al golpeo, la rotación sobre sí misma, el comportamiento en el aire e incluso en el momento de impactar contra el suelo, entre otros, con el fin de obtener un modelo óptimo y competitivo.

La generación de modelos digitales, su fabricación y posterior ensayo, gracias al actual avance tecnológico disponible, se ha convertido en una oportunidad para evaluar el comportamiento de elementos sólidos frente a un conjunto de acciones externas al elemento desde la concepción del mismo, permitiendo un estudio completo partiendo de su fabricación y su posterior comportamiento mecánico.

En este contexto se encuentra este trabajo de fin de grado, que se centra en estudiar la posibilidad de fabricar bolas de golf, que tengan huecos en el núcleo con el fin de aligerarlas y evaluar si estos nuevos diseños presentan un buen comportamiento para el jugador.

2. Objetivos

El objeto principal del presente trabajo de fin de grado es la generación de varios diseños para la fabricación del núcleo una bola de golf con un índice de relleno inferior al 100%. Se pretende que estos modelos sean obtenidos mediante procesos de fabricación aditiva dada la ventaja que este tipo de proceso de fabricación permite a la hora de obtener geometrías complejas que, en este caso concreto, facilitará la generación de un diseño con un relleno que no sea completamente sólido y que cumpla con las características geométricas necesarias. Una vez obtenidos dichos diseños, se pretende comprobar las características y comportamientos de estos núcleos experimentalmente mediante ensayos tanto estáticos como dinámicos.

Para ello y para la consecución dicho objetivo, se establecen los siguientes objetivos secundarios:

- Diseñar diferentes modelos de núcleos de bolas de golf, que puedan resultar válidos, mediante el software de SolidWorks.
- Fabricar, empleando diferentes materiales poliméricos (PLA, HIPS y Filaflex), los modelos previamente diseñados, comprobando la viabilidad del proceso de fabricación.
- Ensayar los diferentes modelos y materiales que se han fabricado mediante ensayos de compresión estática.
- Ensayar los diferentes modelos y materiales que se han fabricado mediante ensayos de compresión dinámica mediante carga de impacto a baja velocidad.
- Analizar y comparar los resultados obtenidos de los ensayos mecánicos de cada uno de los modelos.

3. Antecedentes

3.1. Golf

3.1.1. Historia

El golf es un deporte generalmente de modalidad individual que consiste en introducir una bola dura y de tamaño pequeño en cada uno de los 18 hoyos que tiene un campo, utilizando diferentes palos, en el menor número de golpes posibles. [1, 2]

El origen del golf es desconocido [3, 4]. Existe una teoría que remonta este deporte al imperio romano que, aunque no se tienen muchos datos, se conoce que existía un deporte que se practicaba con un palo curvo y una bola fabricada a base de plumas. Existen a su vez documentos que sitúan al golf en los Países Bajos, siendo conocido como “Colf” o en Francia como “Chole” [5].

Se considera que el origen del golf moderno tuvo lugar en el siglo XV, en el norte de Escocia, cuya topografía hacía que el terreno fuese ideal para practicar este deporte, por lo que es allí donde se encuentran, actualmente, los campos más antiguos.

En 1744 se crea la primera asociación de golf en Edimburgo y en el año 1754 nace la asociación “St. Andrews Society of Golfers”, máxima autoridad del golf mundial, que más adelante será conocida como “Royal & Ancient Golf Club of St. Andrews” que es como se conoce en la actualidad.

Las primeras reglas de golf escritas fueron establecidas por los golfistas del Club de Leith en las cuales el resto de los clubes basaban las suyas hasta que, en el año 1879, el “Royal & Ancient Golf Club of St. Andrews” estableció unas nuevas reglas comunes para todos los clubes.

El golf es uno de los 32 deportes olímpicos desde los juegos de Río de Janeiro en 2016. Según un informe realizado por el “Royal & Ancient Golf Club of St. Andrews” a finales de 2014 existían treinta y cuatro mil instalaciones de golf de las cuales el 45% de ellas se encuentran en Estados Unidos y un 22% en Europa [6].

El golf es un deporte muy extendido en el mundo, especialmente, en Europa y en Estados Unidos. Inglaterra, al ser el país de origen, es el país de Europa que posee mayor número de aficionados a este deporte. España no destaca por tener una gran cantidad de aficionados al golf, pero si por disponer una gran cantidad de campos donde poder jugar, con un total de 437 campos de golf [7], además de disponer de condiciones climatológicas muy favorables para la práctica del mismo. Todos estos puntos lo convierten en un país de destino muy atractivo para los amantes del golf, resaltando Andalucía con un total de 93 campos. Dentro de la comunidad autónoma toma gran relevancia la Costa del Sol, lugar conocido por su enorme cantidad de campos de golf, muchos de ellos conocidos dentro del deporte, como puede ser Valderrama que acogió la Ryder Cup del 1997. Sus buenas condiciones climatológicas fomentan la presencia de golfistas extranjeros a sus instalaciones. En la Figura 1 se encuentran los datos de los países con mayor número de federados en Europa en 2018 [8].

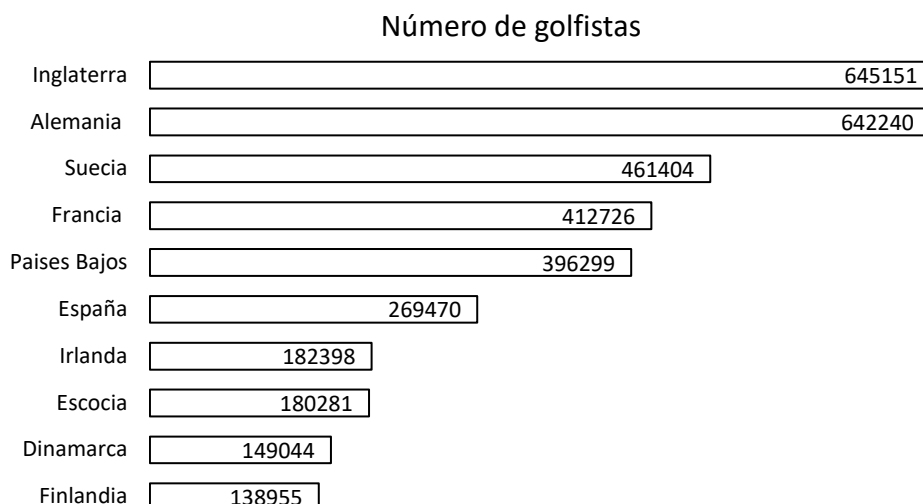


Figura 1 - Número de federados por países en Europa.

3.1.2. Bola convencional

En la actualidad, existen varios modelos de bolas de golf. Estos se pueden clasificar según su dureza o según el número de piezas de las que ésta esté compuesta. Ambas clasificaciones están relacionadas entre ellas [9, 10].

Según su dureza se pueden clasificar en bolas duras, blandas o de dureza media. Las bolas duras consiguen mayor distancia en el vuelo y especialmente de ruedo, son bolas empleadas por jugadores principiantes, especialmente por ser económicas. Las bolas blandas permiten al golfista un mayor control de los efectos tanto en el aire como en tierra, estas bolas las emplean jugadores de alto nivel. Las bolas de dureza media son bolas que combinan distancia y control, son bolas que utilizan jugadores de nivel medio [11–13].

Según el número de capas, se pueden encontrar bolas de una, dos, tres o multicapa. Actualmente, las bolas que constan de una única capa se utilizan solamente para campos de prácticas, ya que son más económicas y resistentes. Pese a tener un comportamiento considerablemente peor que el resto, cumple con las características básicas que se buscan en una bola en ese tipo de entrenamientos. El resto de los modelos poseen un núcleo, una capa externa y, en algunos casos, capas intermedias. Son los modelos empleados en competición y su elección depende de diferentes factores como el precio, las características del jugador y su nivel, entre otros.

El núcleo es el encargado de mantener toda la energía que recibe por parte del jugador mediante el palo. Esta energía debe mantenerse el mayor tiempo posible en la bola, con el fin de alcanzar la mayor distancia posible. Pese a desconocer el material exacto utilizado por las diferentes empresas fabricantes de bolas de golf, se conoce que es una mezcla de diferentes materiales, cuyo componente principal es el polibutadieno [14, 15].

La capa externa o cubierta es la parte visible de la bola, suele tener un espesor de 2 mm y suele estar hecha de surlyn, una resina de alta resistencia que aumenta la vida de la bola. En esta parte de la bola se encuentran los hoyuelos, cuya función es mejorar la aerodinámica de la bola produciendo un flujo turbulento tras la misma que reduce la fricción de la presión en la esfera, por ello, una bola común posee entre 300 y 500 hoyuelos.

A continuación, se va a hacer una breve descripción de los modelos anteriormente nombrados [16]:

Bolas de 2 capas

Pese a que la tecnología actual haya logrado diseños más blandos, este tipo de bolas es utilizado por jugadores que priman la distancia frente al control de la bola. (Figura 2)

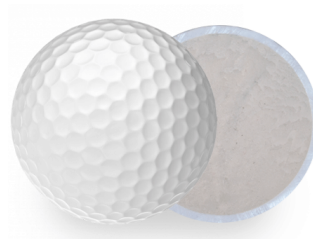


Figura 2 – Bola de golf de 2 capas. [17]

Bolas de 3 capas

A diferencia del caso anterior, este tipo de bolas ofrecen mayor control de la bola a costa de la pérdida de cierta distancia. Suele ser utilizada por jugadores de mayor nivel. (Figura 3)



Figura 3- Bola de golf de 3 capas. [17]

Bolas multicapa

Además del núcleo y la capa externa, este tipo de bolas tienen la característica de poseer una combinación de capas cuya función es optimizar las propiedades de distancia y control necesarias según el tipo de golpe deseado. (Figura 4)



Figura 4 - Bola de golf multicapa. [17]

En este trabajo, se va a estudiar únicamente la parte del núcleo, dejando a un lado la combinación de este con una capa exterior o posibles capas intermedias, considerando el resto de los modelos como posibles líneas de futura investigación.

3.1.3. Normativa actual

La normativa del deporte define una serie de condiciones que deben de cumplir las bolas de golf, entre otras cosas, para la práctica del deporte. Estas condiciones son comunes en todos los países ya que han sido establecidas por las dos máximas autoridades de este deporte. "The R&A" (*Royal and Ancient*) es la máxima autoridad del golf en todos los países exceptuando en Estados Unidos y México, en los cuales la máxima autoridad es la *United States Golf Association (USGA)*. Ambas establecieron unas condiciones generales, de peso, medida, simetría esférica, velocidad inicial y distancia total estándar, que toda bola de golf debe de cumplir con el fin de ser considerada de uso legal en competiciones. A continuación, se van exponen dichas condiciones y cómo pueden afectar a los posibles diseños que se estudiarán [18]:

- **General:** *La bola de golf no debe ser sustancialmente diferente a la forma tradicional.* Se pretende realizar un modelo que no modifique la capa externa de la bola, por lo que no se modificaría la tradicional. Existen excepciones en cuanto a este punto se refiere como, por ejemplo, las bolas que poseen un fluido como núcleo.
- **Peso:** *El peso total de una bola no debe superar los 45.93 g.* Este punto no limita las posibles geometrías ya que se van a proponer geometrías de núcleos de un porcentaje de relleno menor de un 100% a diferencia de los modelos actuales, por lo que su peso será menor al de los núcleos actuales.
- **Tamaño:** *El diámetro de una bola de golf no debe ser inferior a 42.67 mm.* Se pretende realizar los modelos con las mismas dimensiones que los actuales.
- **Simetría esférica:** *La bola de golf no puede ser diseñada, fabricada o intencionadamente modificada para tener propiedades que difieran de aquellas que tiene una bola simétrica esféricamente.* Este punto es el más restrictivo a la hora de la realización de modelos, se deberá estudiar el comportamiento de la bola en sus diferentes direcciones.

- **Velocidad inicial:** *La velocidad inicial de la bola no puede exceder el límite especificado bajo las condiciones establecidas por "The R&A" y USGA. Esta condición debería de ser comprobada por dichas autoridades con tal de confirmar la legalidad de los posibles modelos.*
- **Distancia total estándar:** *La combinación de la distancia de vuelo y la distancia de ruedo de una bola, cuando es testada en aparatos aprobados por "The R&A" y USGA, no debe exceder la distancia especificada bajo las condiciones establecidas por "The R&A" y USGA. Esta condición debería de ser comprobada, igualmente, por dichas autoridades, con tal de confirmar la legalidad de los posibles modelos.*

Por lo tanto, estos apartados se han tenido en cuenta a la hora de realizar los posibles modelos para los núcleos de golos de golf diseñados.

3.2. Fabricación aditiva

La fabricación aditiva es una nueva técnica de fabricación empleada en la industria a finales del siglo XX. Este tipo de fabricación se basa, como su nombre indica, en la generación de componentes mediante la adición de material a partir de un modelo creado mediante un software de diseño gráfico. Según la norma UNE-EN ISO/ASTM 52900:2017, [19] la fabricación aditiva es un *"Proceso de unión de materiales para fabricar piezas u objetos a partir de datos de modelos 3D, generalmente capa a capa, en oposición a métodos de fabricación mediante eliminación de material y conformado"* [20, 21].

La implementación de este nuevo proceso de fabricación ha supuesto la modificación de la clasificación de los tipos de procesos de fabricación tradicional, basada en la manera en la que el proceso se realiza. Actualmente se pueden clasificar los procesos de fabricación de la siguiente manera:

- **Procesos de fabricación sustractivos:** Este tipo de fabricación se basa en la eliminación (sustracción) de material sobrante de una geometría mayor para obtener la forma final. Las operaciones de mecanizado como el fresado o torneado pertenecen a este tipo de fabricación.
- **Procesos de fabricación conformativos:** En este tipo de fabricación se hace uso de moldes o modelos para obtener el producto final. Los procesos de deformación plástica y de fundición se encuentran en esta tipología.
- **Procesos de fabricación aditivos:** En este tipo de proceso se diseña el modelo mediante un software y la geometría final se obtiene mediante adición de material.

A continuación, se van a citar una serie de ventajas e inconvenientes de los procesos de fabricación aditiva que permiten seleccionarlos o descartarlos de los procesos convencionales [22–24].

Ventajas:

- **Flexibilidad en el diseño del producto:** al modelar el diseño mediante un software y al no tener limitación de acceso de herramientas, este tipo de fabricación permite realizar generalmente cualquier tipo de geometría.
- **Ahorro de material:** Al emplear prácticamente la totalidad del material en la geometría final, no se generan desperdicios. A esto se le añade la eliminación de los moldes necesarios en la fabricación conformativa.
- **Fácil manejo y accesibilidad:** Permite que cualquier usuario que disponga de los equipos necesarios, a su vez accesible también, pueda emplearla con gran facilidad y con un conocimiento mínimo.
- **Fabricación automática:** Una vez diseñado y lanzado el modelo no requiere ningún tipo de intervención humana en la fabricación, por lo que se eliminan los errores cometidos por los factores humanos.
- **Fabricación a distancia:** Permiten que el fabricante se encuentre en un lugar diferente al que se está fabricando la pieza. Esta ventaja permite también que los modelos CAD se puedan descargar mediante internet permitiendo que un usuario que no tenga conocimientos de diseño por software pueda emplear este tipo de proceso.

Inconvenientes:

- **Tiempo de fabricación:** este es uno de los mayores inconvenientes de la fabricación aditiva, es por ello por lo que generalmente es descartada para la fabricación de piezas en serie.
- **Bajo acabado superficial:** este tipo de fabricación presenta en la pieza peores acabados superficiales que los procesos sustractivos o conformativos.
- **Tamaño limitado de las piezas:** el tamaño de las piezas está limitado por el equipo empleado para su fabricación.
- **Propiedades irregulares de los materiales:** Debido a la discontinuidad del proceso (generación capa a capa), las propiedades de la pieza pueden verse afectadas en función de la dirección de las capas por las que se ha fabricado dicha pieza.
- **Limitaciones tecnológicas:** Al tratarse de un proceso relativamente joven, se encuentra en una fase de estudio y desarrollo, con ciertas limitaciones como pueden ser los materiales que se pueden emplear.

Según la norma UNE EN-ISO/ASTM 17296-2 [25] existen 7 categorías básicas en las que se clasifican los procesos de fabricación aditiva en función de la forma en la que éstos se llevan a cabo:

- **Fotopolimerización en tanque o cuba:** Se dispone de un tanque o cuba de polímero fotocurable que se encuentra en estado líquido, dicho polímero

endurece bajo la incidencia de la luz ultravioleta que actúa de forma localizada generando de esta manera las capas del modelo.

- **Proyección del material:** El material de impresión se inyecta por un cabezal sobre una bandeja en la que se genera la capa. Este modelo es similar al de una impresora de inyección de tinta.
- **Proyección del aglutinante:** Se inyecta a chorro el aglutinante en estado líquido de forma selectiva en un lecho de polvo formando y adhiriendo las capas.
- **Fusión de lecho de polvo:** Se aplica calor a través de una fuente térmica (láser o haz de electrones) que funde el polvo de forma selectiva.
- **Extrusión de material:** Se extruye el material a través de un cabezal y se deposita en una plataforma de fabricación.
- **Deposición de energía focalizada:** A partir de una fuente térmica, se funde el material a la vez que se deposita sobre una bandeja generando cada una de las capas de la pieza.
- **Laminado de hojas:** se unifican diferentes láminas de material con la finalidad de formar el objeto.

Existen dos tecnologías principales para la aplicación del proceso de fabricación aditiva, éstos son el modelo de deposición fundida (FDM) y la fabricación de filamento fundido (FFF) [26, 27]. La tecnología FDM fue desarrollada y patentada en el año 1989 por S. Scott Crump comercializándose en 1990. Al ser una marca registrada, en 2005 Adrian Bowyer desarrolló una nueva tecnología en la universidad de Bath, muy similar, denominada FFF, con el fin de fabricar sin ningún tipo de limitación legal. Estas tecnologías son las que actualmente se conocen convencionalmente como impresión 3D.

Su funcionamiento se caracteriza por la extrusión y deposición selectiva de un material en capas con el fin de generar un objeto tridimensional. Actualmente esta tecnología se emplea para la fabricación de prototipos, para moldes de termoformado, fabricación de herramientas, etc.

Los materiales empleados en este proceso de fabricación son todavía limitados al tratarse actualmente, como se ha mencionado anteriormente, de una tecnología en desarrollo. Inicialmente se empleaban materiales poliméricos debido a su baja temperatura de fusión. Actualmente se están desarrollando tecnologías que permiten la utilización de otro tipo de materiales como pueden ser los metálicos, cerámicos, compuestos, resinas o arena.

En el desarrollo de este trabajo se han empleado materiales poliméricos, concretamente el ácido poliláctico (PLA), el poliestireno de alto impacto (HIPS) y un polímero de alto límite elástico, denominado Filaflex. [28]

- **Ácido poliláctico (PLA):** Se trata de un polímero obtenido a partir del almidón de maíz, la remolacha y del trigo por lo que se trata de un material biodegradable y económico. Es uno de los materiales más empleados especialmente a nivel de usuario no solo por ser económico sino por la posibilidad de ser de diferentes

colores. Requiere una temperatura aproximada de 210 °C para su empleo. Entre sus características principales destaca la posibilidad de conducir la electricidad [29].

- **Poliestireno de alto impacto (HIPS):** Se trata de un material cuyas características principales son su rigidez y la resistencia a tracción y a impactos. Además, presenta baja conductividad por lo que es comúnmente utilizado como aislante eléctrico. La temperatura de impresión óptima es de 230 °C [30].
- **Filaflex:** también conocido como caucho termoplástico, es un filamento termoplástico elastómero resultante de una mezcla de polímeros, una base de plástico y caucho como aglutinante. Se caracteriza por su gran elasticidad, puede alcanzar un estiramiento de un 650% hasta la rotura. Tiene como inconveniente su dificultad a la hora de imprimir por lo que es necesaria una configuración adecuada para obtener buenos resultados. Su temperatura de impresión es de aproximadamente 245 °C y es comúnmente utilizado en construcción para aislamiento de ventanas o juntas de expansión y en la industria automovilística para manguitos o piezas anti-vibratorias [31].

3.3. Estado del arte

En este apartado se van a exponer los diferentes estudios y artículos previos a este trabajo empleados para dar inicio a la investigación. En primer lugar, se ha realizado un estudio de las bolas de golf convencionales actuales.

En su proyecto de fin de carrera titulado "*Modelización dinámica de las pelotas de golf*" en la Universidad Politécnica de Cataluña, Arnaud Lassagne [16], realizó el análisis del comportamiento del núcleo por medio de ensayos de compresión dinámica mediante carga de impacto, golpeando un impactor plano con dicho núcleo. A su vez, caracterizó las bolas de golf a través de ensayos de impacto observando la influencia de su capa externa de Surlyn. Para ello realizó una simulación del comportamiento del material frente a compresión dinámica mediante carga de impacto. También adaptó la máquina universal de ensayo de compresión dinámica bajo carga de impacto y de compresión estática para el ensayo de probetas esféricas y realizó ensayos de impacto por caída de dardo modificando la altura de caída y, por lo tanto, las velocidades de impacto obteniendo las gráficas fuerza-tiempo. Posteriormente realizó una comparación de los resultados simulados y los experimentales. Adicionalmente, efectuó ensayos de compresión y de fatiga con el fin de calcular el módulo de Young de los diferentes materiales y conocer a posteriori el número de ciclos que las bolas podrían aguantar.

De sus resultados se considera que después de 50 golpes el núcleo de la bola se fractura. También se concluye que en ningún momento se ha roto la capa externa de la bola fabricada mediante Surlyn, material conocido por su gran resistencia a arañazos. A su vez se determina que los valores del coeficiente de restitución obtenidos son diferentes para los modelos con capa exterior de los obtenidos en los ensayos realizados exclusivamente a núcleos. Esta conclusión es de gran importancia para el presente

proyecto debido a que solamente se van a ensayar los núcleos por lo que los resultados no serán directamente aplicables a bolas de golf con la capa externa.

Por otro lado, Zhasong Xu [32] realizó un proyecto para el Worcester Polytechnic Institute titulado “A Study of Impact between Golf Ball and Face of Golf Club Head” en el que estudió la rotación de la bola sobre si misma (spin) una vez impactada. Para ello fabricó una superficie similar a la de la cara de un palo de golf real y ensayó diferentes impactos modificando el ángulo de impacto de dicha cara. Una vez realizados los diferentes ensayos, analizó entre otras cosas las gráficas fuerza-tiempo.

En dicho proyecto concluye que el coeficiente de rozamiento entre la bola y la cara del palo no varía ante la presencia o ausencia de estrías en la cara del palo, aunque sí que se ve altamente afectado por el ángulo de la misma. Determina también que la repetibilidad de los ensayos realizados es muy alta. Por otro lado, establece que, en los ensayos, el tiempo entre impacto y fuerza máxima es mayor que el tiempo entre la fuerza máxima y el punto de fuerza nula. El autor atribuye este hecho a la pérdida de energía durante el impacto.

A su vez, se han estudiado las condiciones de trabajo de las piezas generadas por impresión en tres dimensiones.

Pedro Jesús Caravaca Peñalver [33], en su trabajo de fin de grado para la Universidad Politécnica de Cartagena titulado “Influencia de las condiciones de trabajo en piezas generadas por 3D”, estudió los distintos procesos de funcionamiento de las impresoras 3D en función de la tecnología utilizada y los materiales más populares en este proceso de fabricación. A su vez estableció criterios de trabajo para la impresión de piezas de alta precisión mediante la tecnología FDM y evaluó el impacto de los diferentes criterios anteriormente mencionados en la calidad y propiedades de dichas piezas.

En su trabajo analiza diferentes tecnologías, como SLA, SLS o DLP, entre otros, haciendo hincapié en la tecnología FDM, siendo esta la tecnología que se utilizará en el presente proyecto. Por otro lado, analiza el comportamiento de algunos de los materiales más empleados en la impresión 3D. Entre los materiales estudiados se encuentran el PLA y el HIPS, dos de los tres materiales que se han empleado para la fabricación de los modelos ensayados en este trabajo.

En dicha investigación, el autor llega a varias conclusiones de interés para el presente trabajo. En primer lugar, determina que la tecnología FDM es la que ofrece mejores propiedades mecánicas en las piezas de PLA obtenidas. Concluye también que el grado de relleno de las piezas obtenidas tienen un impacto directo en las propiedades mecánicas de las mismas mejorándolas a mayor grado de relleno.

Finalmente considera que cuanto mayor es la continuidad de los modelos, mayor son las propiedades mecánicas de los mismos.

4. Metodología

El principal objeto de este trabajo de fin de grado es estudiar la posibilidad de la obtención de nuevas geometrías para los núcleos de bolas de golf que mejoren el comportamiento de los núcleos esféricos actuales. Para ello, es necesario planificar y analizar las diferentes fases que el presente trabajo debe de tener con tal de conseguir los objetivos propuestos.

Es fundamental diseñar el método a seguir que permita satisfacer esta necesidad partiendo del material y el equipo del que se dispone. Inicialmente se procederá al modelado de los diferentes posibles diseños, posteriormente se fabricarán los modelos seleccionados dentro de los posibles diseños y, una vez fabricados, se realizarán una serie de ensayos estáticos.

A continuación, se explica con mayor detalle la metodología experimental que se ha llevado a cabo.

4.1. Diseño de los modelos

En esta fase se procede a la realización de diferentes modelos que resulten ser de interés y que tengan características que puedan mostrar alguna ventaja frente a los modelos actuales. Para el diseño de los diferentes modelos se han tenido en cuenta dos aspectos importantes, como son la normativa que toda bola debe cumplir, teniendo en cuenta como condición más significativa la simetría esférica, y el objetivo principal de aligerarla. Por lo tanto, todos los modelos que se van a diseñar son esféricos con un diámetro de 38 mm.

Para el modelado de los núcleos se ha utilizado el programa SolidWorks.

4.2. Fabricación de los modelos

Para la fabricación de los modelos se ha optado por la fabricación por adición dada la ventaja que ofrece a la hora de realizar geometrías complejas. La máquina empleada ha sido la “Raise3D Pro2” del laboratorio del Área de Ingeniería de los Procesos de Fabricación de la Universidad de Málaga.

El software utilizado para el laminado y la obtención del código para la fabricación es el “IdeaMaker” proporcionado por la marca de la máquina de impresión. (Figura 5)



Figura 5 – Impresora 3D de la firma RAISE3D modelo Pro2

A su vez, tras investigar los materiales empleados por las empresas fabricantes de bolas, se han empleado tres materiales diferentes. Estos materiales son el ácido poliláctico (PLA), HIPS (High Impact Polystyrene) y Filaflex.

En la Tabla 1 se recogen algunos de los valores más importantes a tener en cuenta a la hora de fabricar con estos materiales.

Tabla 1 - Parámetros de impresión para los materiales empleados en este trabajo.

Parámetro de impresión	PLA	HIPS	Filaflex
Temperatura	205-235 °C	230-240 °C	215-250 °C
Velocidad recomendada	25 mm/s	25 mm/s	20-25 mm/s
Cama caliente	No	Opcional a 90-110 °C	No

Una vez generados los modelos y disponiendo de la máquina y los materiales, es necesario establecer las condiciones de impresión. Para todos los modelos se establecieron las condiciones de impresión que se adjuntan en la Tabla 2.

Tabla 2 - Condiciones de impresión establecidas para la impresión de los modelos en este trabajo.

Condiciones de impresión	
Densidad de relleno	100 %
Flujo de relleno	100 %
Patrón de relleno	Tipo cuadrícula
Temperatura de extrusión	235 °C
Velocidad de extrusión	25 mm/s
Cama caliente	No

Dado que se trata de una esfera, el modelo no tiene una base a partir de la cual se pueda fabricar y la que proporciona el programa por defecto resulta ser inestable (Figura 6).

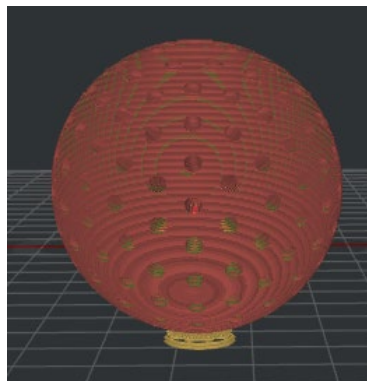


Figura 6 - Modelo sin material de soporte.

Es por ello por lo que es necesario establecer una plataforma, así como material de soporte, para que el modelo no vuelque. Ambos han sido realizados mediante patrones lineales. Los parámetros de la plataforma y material de soporte establecidos son los predeterminados exceptuando los adjuntos en la Tabla 3.

Tabla 3 – Configuración de la plataforma y los soportes establecidos para la impresión de los modelos.

Configuración avanzada			
Plataforma		Soportes	
Desplazamiento	13.00 mm	Tipo	Pilar
Hueco plataforma	0.15 mm	Ratio relleno	50 %
Capas primeras	2	Ángulo máximo voladizo	45°
Velocidad	8.0 mm/s	Offset horizontal	0.70 mm
Porcentaje de ancho	200 %	Flujo soporte	100 %
Altura	0.50 mm		
Ratio de relleno	33 %		

4.3. Ensayos estáticos de compresión

Este es un ensayo estático, en el cual se somete a la probeta a compresión para obtener valores de deformación y de carga soportada. La máquina empleada para estos ensayos ha sido de la marca SERVOSIS modelo ME405/10 (Figura 7).



Figura 7 – Máquina universal de ensayo de la firma SERVOSIS modelo ME405/10.

Los ensayos estáticos han consistido en ensayos cíclicos definidos por desplazamiento, con un límite, en todos los casos, de 1 mm de desplazamiento total y una velocidad de desplazamiento de 0.5 mm/min. En cada ensayo se han realizado tres ciclos.

Se han ensayado cada uno de los diferentes especímenes según modelo y material. A su vez se han realizado los ensayos diferenciando en cada probeta dos orientaciones diferentes, éstas son aplicando la carga de manera perpendicular y paralela a las capas en las que la bola ha sido fabricada, por lo que cada probeta ha sido ensayada dos veces, una en cada dirección de interés.

Esta diferenciación de orientación parece ser de interés puesto que a priori, este tipo de fabricación no permite una simetría completa y es uno de los objetivos del presente trabajo, estudiar el grado de importancia que supone.

A partir de estos ensayos, se obtendrá la rigidez de cada una de las probetas y materiales estudiados en este trabajo.

Una vez completados los ensayos anteriores, se han realizado ensayos estáticos de compresión hasta rotura, a cada una de las probetas obtenidos. Este ensayo se ha realizado con el fin de obtener la carga máxima que éstos pueden soportar hasta colapsar.

Para este ensayo, se ha empleado el mismo equipo, modificando los parámetros fijados anteriormente. Para ello, se ha establecido una velocidad de desplazamiento de 0.5 mm/min limitando el desplazamiento máximo a 25 mm. La dirección en la que se han ensayado las probetas es la paralela a las capas, ya que la carga máxima en esta dirección a priori se supone inferior que, en la dirección perpendicular a las capas, por lo que se estudia el caso más desfavorable.

4.4. Ensayo de compresión bajo carga de impacto a baja velocidad

Consiste en dejar caer, desde cierta altura, un dardo sensorizado con el fin de golpear a la probeta y obtener resultados de dicho impacto. Para este ensayo se ha empleado un sistema de impacto vertical CEAS 9350 (Instron®) del laboratorio de Mecánica de los Medios Continuos de la Universidad de Málaga (Figura 8).



Figura 8 – Sistema de impacto vertical CEAS 9350 (Instron®)

Teniendo en cuenta que la masa del dardo sensorizado es de 1.11 kg y del carro porta pesas de 1.3 kg, para los ensayos de compresión bajo carga de impacto a baja velocidad se deja caer sobre los especímenes una masa total de 2.41 kg. La altura de caída establecida con respecto al origen es de 85 mm por lo que la velocidad nominal que alcanza el dardo en el momento del impacto es de 1.29 m/s. La frecuencia de muestreo establecida para los ensayos es de 100 kHz para las probetas de PLA y HIPS y de 50 kHz

para las probetas de Filaflex. La cantidad de ensayos de impacto que se han realizado es de tres por cada una de las probetas y direcciones de interés correspondientes.

A su vez se ha empleado una cámara de alta velocidad para captar los impactos gráficamente. La Figura 9 muestra la posición de la probeta en la cámara de test.

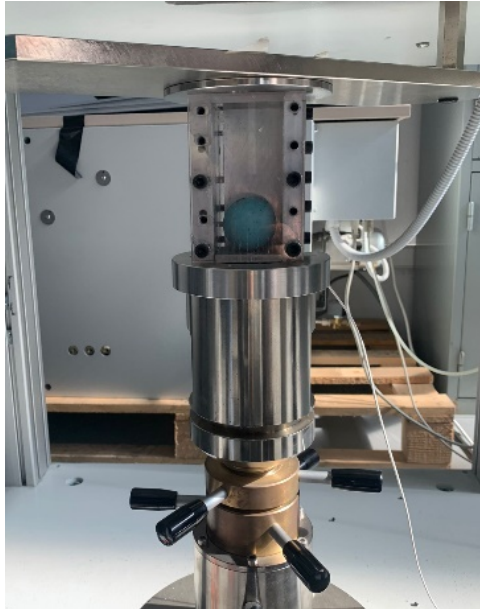


Figura 9 – Posición de la probeta en los ensayos de compresión dinámica bajo carga de impacto.

El objetivo principal de este ensayo es obtener los valores de energías máxima y absorbida, además de la fuerza y desplazamiento máximos, con el fin de estimar el comportamiento de los diferentes diseños.

5. Resultados

5.1. Diseño de los modelos

Como se ha mencionado anteriormente, los objetivos principales a la hora de generar los modelos es aligerar la bola y mantener una simetría esférica ya que es necesario que la bola se comporte por igual a la hora del impacto, independientemente del punto de golpeo. Además, es necesario tener en cuenta que se debe de tener cierta rigidez, por lo que el espacio hueco no debe de ser excesivo para poder aguantar la fuerza del impacto. Teniendo en cuenta los factores anteriores, se llegó a tres modelos diferentes a partir de los cuales se podría conseguir realizar unos modelos con una simetría cercana a la esférica para la evaluación posterior de sus rigideces. Estos tres modelos se constituyen a base de varillas y agujeros.

Definidos los tipos de modelos, se diseñaron mediante el programa SolidWorks para hacer una primera evaluación visual y, si se aceptaban, fabricarlos en la impresora 3D.

Teniendo en cuenta que únicamente se está diseñando el núcleo, el diámetro de cada uno de los modelos es de 38 mm, a la cual le faltaría la capa exterior de 2 mm de espesor para completar la bola. A continuación, se procede a explicar los diferentes modelos que han sido diseñados.

Varillas

Este modelo es un concepto inicial que más adelante se modifica. Consiste en un núcleo central esférico de 5 mm de diámetro desde el cual parten unos cilindros cuya base tiene un diámetro de 1 mm y una altura de 19 mm (Figura 10).

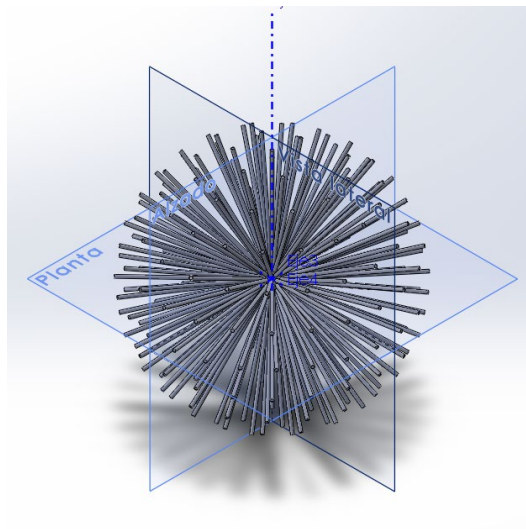


Figura 10 - Modelo de varillas generado mediante SolidWorks.

Con el objetivo de incrementar su rigidez y la facilidad para adaptarle una capa exterior se decide modificar el modelo añadiéndole 4 capas de 6 mm de espesor con una distancia de 4 mm entre ellas cubriendo la última de ellas por completo el núcleo. Con esto se consigue aumentar la resistencia frente a impactos de la pieza. La sección del diseño se representa en la Figura 11.

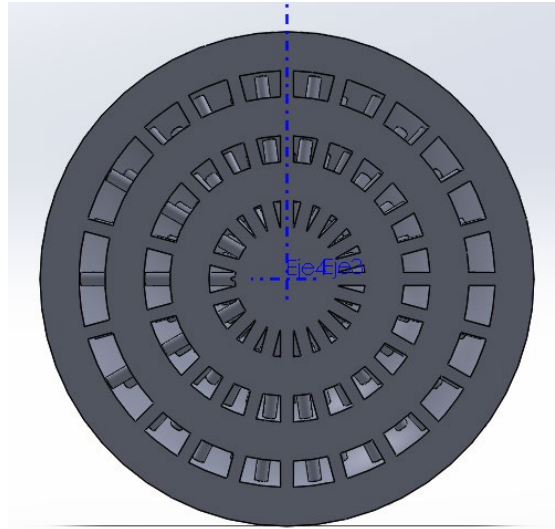


Figura 11 - Sección del modelo de varillas con capas generado mediante SolidWorks.

Agujeros

Este modelo consiste en una esfera perforada desde la superficie de la misma hasta el centro por unos agujeros circulares de 2 mm de diámetro (Figura 12).

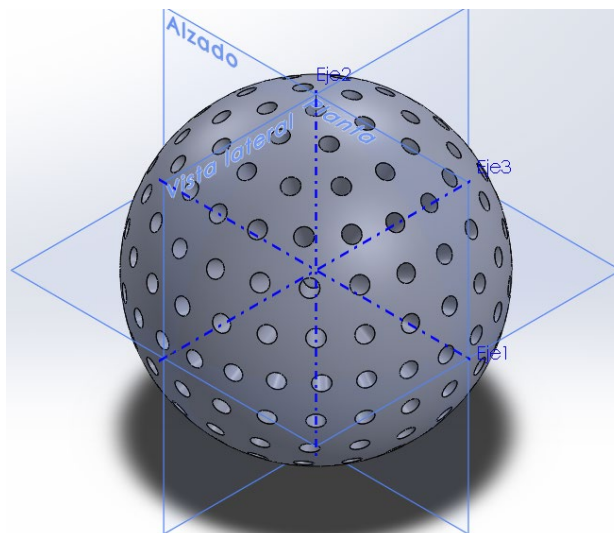


Figura 12 - Modelo de agujeros generado mediante SolidWorks.

Agujeros sin núcleo

Seccionando la esfera anterior se puede ver que dispone de simetría, pero a su vez, se observa que el centro del núcleo es hueco aligerando el peso del núcleo (Figura 13).

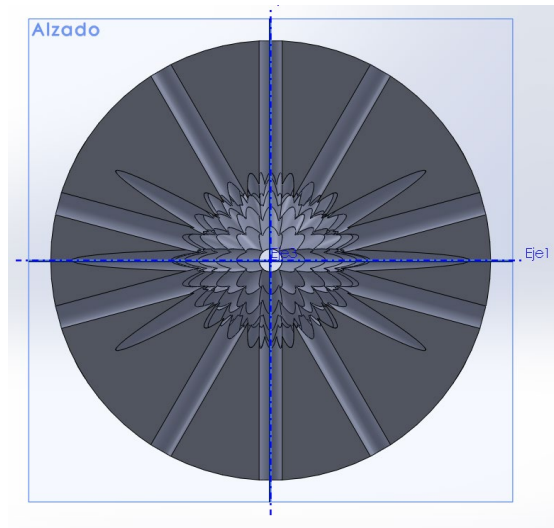


Figura 13 - Sección del modelo de agujeros sin núcleo generado mediante SolidWorks.

Agujeros con núcleo

Teniendo en cuenta que el diseño anterior puede no cumplir con la resistencia necesaria para recibir impactos, se realiza otro diseño basado en el anterior en el que en el interior se encuentra un núcleo macizo de 8 mm de radio (Figura 14).

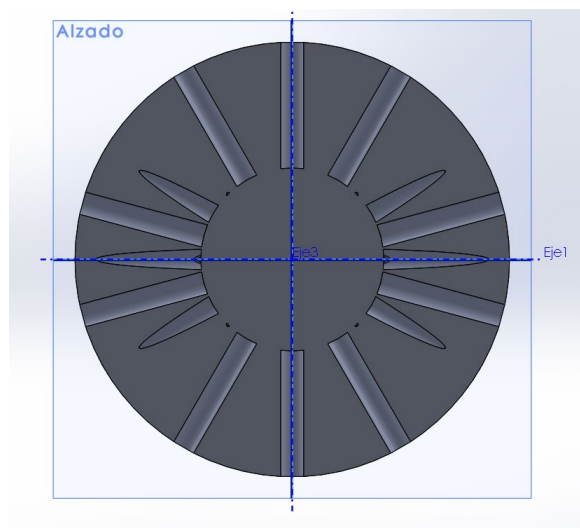


Figura 14 - Sección del modelo de agujeros con núcleo generado mediante SolidWorks.

Los modelos que se van a estudiar en el presente proyecto son el modelo por varillas con capas y los modelos por agujeros con y sin núcleo.

En la Tabla 4 se exponen los valores de volumen y de porcentaje de una esfera maciza y de los modelos que se han diseñado por motivos de comparación. El diseño de agujeros sin núcleo es el que presenta un menor relleno (70.02%), mientras que el diseño con el núcleo macizo es el que tiene mayor cantidad de material (77.00%).

Tabla 4 – Volúmenes y relaciones de relleno de una esfera maciza y de los modelos estudiados en este trabajo.

Modelo	Volumen [mm ³]	Relleno [%]
Maciza	28730.91	100
Varillas	20810.20	72.43
Agujeros con núcleo	22121.84	77.00
Agujeros sin núcleo	20119.16	70.02

5.2. Fabricación de los modelos

Una vez diseñados los modelos anteriores, se han obtenido los tres modelos mediante fabricación aditiva por extrusión de material.

Como se ha mencionado anteriormente, a la hora de fabricarlos, el modelo, por sí solo, no cumple con la estabilidad necesaria, es por ello por lo que se ha decidido añadir material de soporte. En la Figura 15, se muestran los tres modelos con soporte obtenidos por el software CAM IdeaMaker.

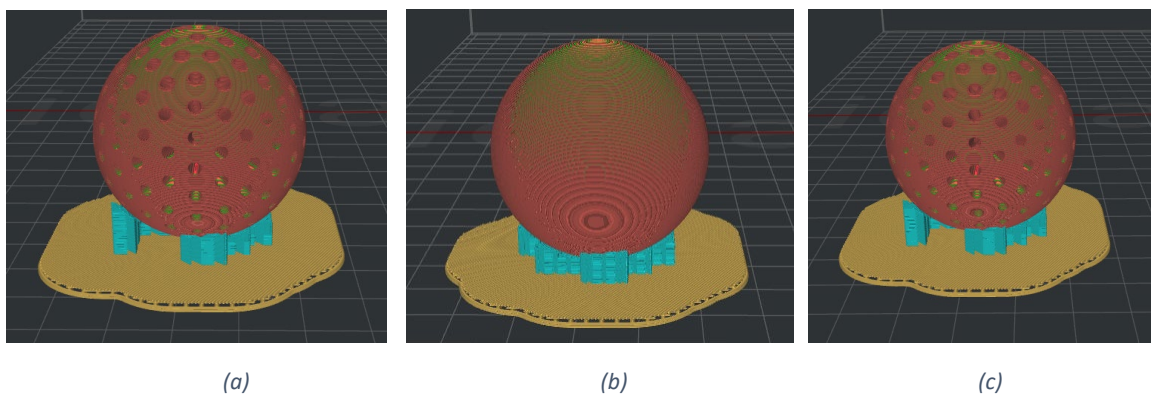


Figura 15 - (a) Modelo con núcleo con soporte. (b) Modelo de varillas con soporte. (c) Modelo sin núcleo con soporte.

Se han fabricado un total de 9 modelos de bolas de golf teniendo en consideración los tres diseños desarrollados y los tres materiales mencionados anteriormente (Figura 15).

En la Figura 16, se adjunta una imagen de cada uno de los modelos fabricados y cada uno de los materiales empleados.

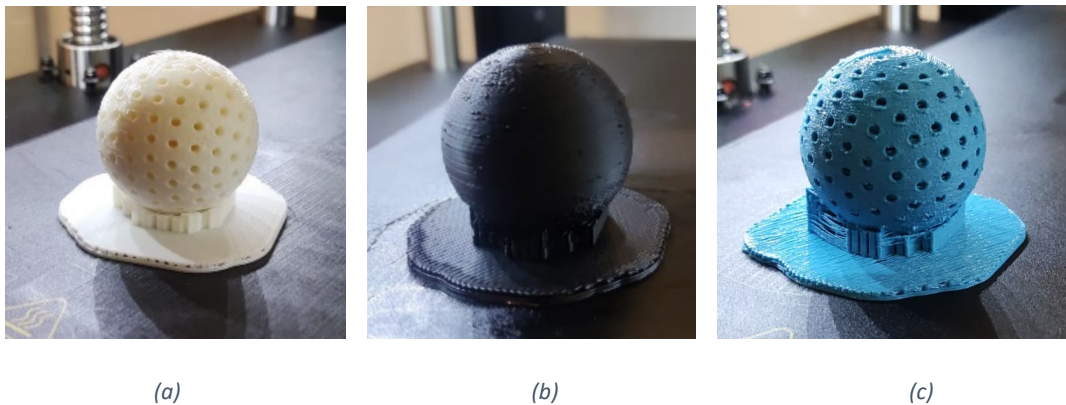


Figura 16 - (a) Modelo sin núcleo fabricado mediante PLA. (b) Modelo de varillas fabricado mediante HIPS. (c) Modelo con núcleo fabricado mediante Filaflex.

En la Figura 17 se puede apreciar el interior del modelo de varillas fabricado con PLA durante su fabricación.

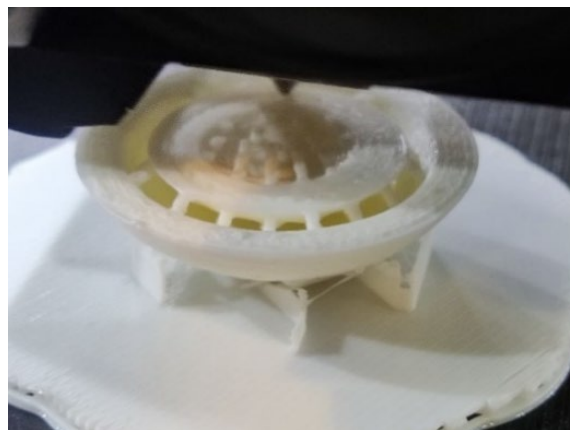


Figura 17 - Proceso de fabricación del modelo de varillas fabricado con PLA.

Se fabrican los diferentes modelos comprobando que se cumplen los requisitos de fabricabilidad teniendo unas tolerancias aceptables.

La Tabla 5 recoge los valores de masa en gramos de cada uno de los modelos y materiales.

Tabla 5 - Masa de los diferentes modelos fabricados según su diseño y material.

Material	Sin núcleo [g]	Con núcleo [g]	Varillas [g]
PLA	21.87	23.19	22.90
HIPS	21.09	22.98	21.85
Filaflex	23.50	25.40	24.49

El núcleo de una bola convencional de dos capas tiene un peso de 39.00 gramos. En la Tabla 5 se aprecia que el modelo con menor masa es el modelo sin núcleo para todos los materiales y por lo contrario el modelo con núcleo es el que tiene mayor masa. Esto es así debido a la densidad de los materiales, así como al porcentaje de relleno de cada uno de los modelos cuyos valores se recogen en la Tabla 4. En cuanto a los materiales, los modelos generados a partir de Filaflex son los que presentan mayores masas y en cambio, los que han sido obtenidos mediante HIPS, los que menores masas poseen.

La Tabla 6 muestra los valores promedios de los diámetros de cada uno de los modelos en milímetros. Los diámetros se han medido en la dirección de deposición de las capas a la hora de su fabricación (perpendicular) y en la dirección de las mismas (paralelo).

Tabla 6 - Diámetros de los modelos en las direcciones paralela, perpendicular, media y desviación.

	Mod. sin núcleo (D[mm])			Mod. con núcleo (D[mm])			Mod. de varillas (D[mm])		
	Perp.	Paral.	Media y desviación	Perp.	Paral.	Media y desviación	Perp.	Paral.	Media y desviación
PLA	38.02	38.07	38.05 ±0.07%	37.75	37.87	37.81 ±0.16%	38.01	37.83	37.92 ±0.24%
HIPS	38.87	38.45	38.66 ±0.54%	38.43	37.95	38.19 ±0.63%	38.80	37.92	38.36 ±1.15%
Filaflex	38.18	37.25	37.72 ±1.23%	38.44	37.31	37.88 ±1.49%	38.12	37.35	37.74 ±1.02%

En la Tabla 6 se puede apreciar cómo, pese a ser los diseños completamente esféricos, existen variaciones apreciables. Destacar que estas variaciones en ningún caso son superiores al 1.5%. La deposición de material en dirección perpendicular tiende a generar desviaciones de la geometría por encima del valor de diseño y la dirección paralela tiene desviaciones por debajo de los valores de diseño. Los modelos obtenidos mediante PLA son los que menores variaciones sufren entre direcciones y los obtenidos mediante Filaflex los que presentan mayores variaciones. Con esto se puede concluir que existen variaciones tanto por fabricación como por el material empleado para ello, los cuales hay que tener en cuenta para su fabricación.

5.3. Ensayos estáticos de compresión

Como se ha mencionado en la metodología, este ensayo estático se ha llevado a cabo realizando 3 ciclos de compresión a cada una de las nueve probetas en las dos orientaciones de interés, con el fin de obtener la rigidez de cada uno de ellos.

A continuación, en la Figura 18 se presenta la gráfica fuerza frente al desplazamiento de espécimen “HIPS con núcleo” en la dirección perpendicular a las capas.

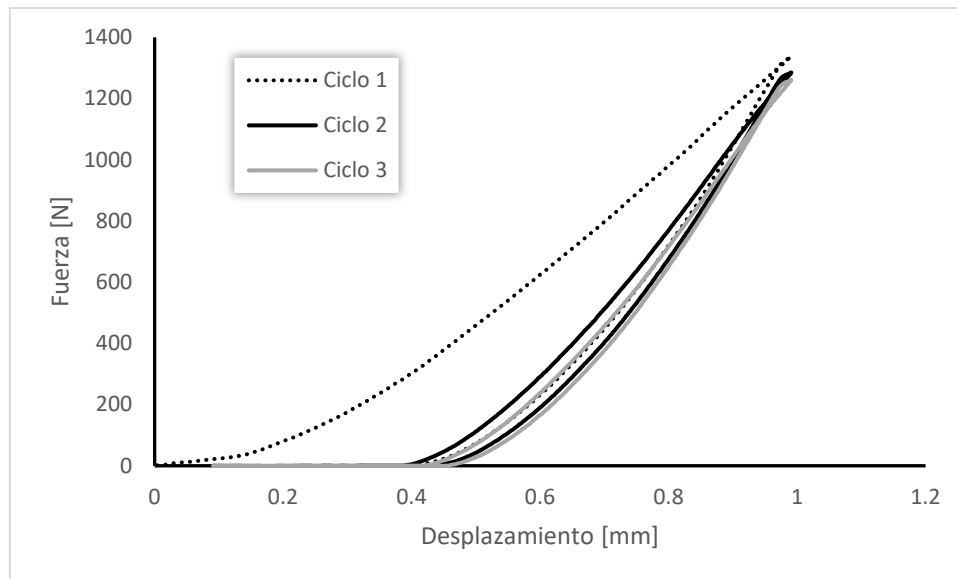


Figura 18 – Valores F-D ensayo estático de compresión de la probeta HIPS CN en dirección perpendicular.

En la Figura 18 se puede apreciar dos puntos significativos. El primer punto es la diferencia que existe entre el primer ciclo y el resto de ellos. Esta diferencia ha existido en cada uno de los especímenes, materiales y orientaciones que se han ensayado. Ésta parece ser causada por el acabado superficial de la bola. Este acabado presenta elevada rugosidad superficial y, durante el primer ciclo del ensayo, estas irregularidades superficiales son deformadas plásticamente, afectando, por tanto, al segundo y tercer ciclo de compresión del ensayo.

El segundo punto significativo son los movimientos en vacío (de fuerza nula) de la máquina debido a esta la deformación plástica de la superficie anteriormente mencionada. Se puede apreciar que en el segundo y tercer ciclo la fuerza se empieza a aplicar aproximadamente a partir del punto de desplazamiento de 0.4 mm. Es por ello por lo que se decide prescindir del primer ciclo y estudiar el resto que sí parecen cumplir cierta repetibilidad y no contar con los movimientos en vacío.

Teniendo estos aspectos en consideración, en la Figura 19 se muestran los resultados obtenidos del ensayo estático de compresión para la bola con núcleo de HIPS y con la carga en dirección perpendicular a la orientación de las capas.

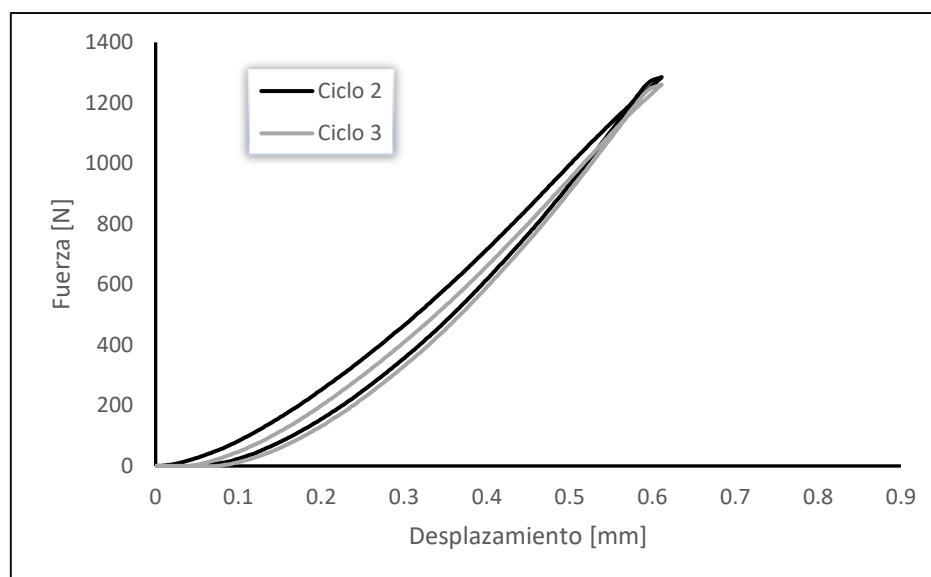


Figura 19 – Valores F-D ensayo estático de compresión de la probeta HIPS CN en dirección perpendicular modificado.

Una vez modificada la gráfica y disponiendo de los valores de interés para el ensayo, se toman cada uno de los ensayos como una nube de puntos sin dividirlos en ciclos y se descartan los datos cuya fuerza es inferior a 20 N con el fin de estudiar la zona más lineal del registro.

Además, para cada uno de los casos que se han ensayado, se pretende evaluar el comportamiento elástico a través de su relación fuerza-desplazamiento. Por lo tanto, y con el fin de obtener la rigidez de cada espécimen, se busca una relación lineal entre la carga y el desplazamiento y que, consecuentemente, la constante de proporcionalidad será denominada rigidez (K).

Una vez obtenida la línea de tendencia, se determinan los valores de rigidez K (pendiente de la línea de tendencia) y su ajuste (R^2). En el anexo I de este proyecto, se encuentran las gráficas de los ensayos realizados a los diferentes especímenes generados, destacando la línea de tendencia y los valores de K y de R^2 (Figura 31 a Figura 48).

La Tabla 7 adjuntada a continuación recoge los valores de rigidez y R^2 de cada uno de los ensayos llevados a cabo.

Tabla 7 – Recopilación valores de rigidez y R^2 obtenidos en los ensayos estáticos de compresión.

		K [N/mm]			R ²		
		PLA	HIPS	Filaflex	PLA	HIPS	Filaflex
Sin núcleo	Paralelo (=)	2269.80	2365.10	33.10	0.9345	0.9795	0.9862
	Perpendicular (+)	2680.50	2028.10	51.01	0.9876	0.9437	0.9886
Con núcleo	Paralelo (=)	3332.20	2958.20	49.72	0.9749	0.9772	0.9840
	Perpendicular (+)	3387.00	2710.50	43.19	0.9882	0.9745	0.9765
Varillas	Paralelo (=)	1062.20	1372.40	27.83	0.9047	0.9619	0.9883
	Perpendicular (+)	1679.90	1203.50	36.56	0.9575	0.9646	0.9859

Tras el análisis de las probetas obtenidas mediante PLA (Figura 31 a Figura 36 del anexo I), se puede concluir lo siguiente:

- Tanto los valores de rigidez como del R^2 son mayores para los especímenes con núcleo y presentan valores más bajos en el espécimen de varillas.
- Los ensayos realizados en la dirección perpendicular a las capas también presentan unos valores superiores a los obtenidos en los ensayos realizados en la dirección paralela a las mismas.
- Destaca también la diferencia de los valores de rigidez existente entre especímenes siendo la probeta de varillas el que menor coeficiente presenta.

A continuación, se analizan las gráficas de cada uno de los ensayos estáticos de compresión realizados para las diferentes probetas fabricadas con HIPS (Figura 37 a Figura 42 del anexo I). Los valores de los ejes se han modificado con el fin de conseguir una mejor visualización de los resultados. Tras su análisis, se puede concluir lo siguiente:

- Los valores de rigidez en los ensayos realizados a la probeta con núcleo presentan los mayores valores dentro de este material y el espécimen de varillas presenta los menores valores.
- Los ensayos realizados en la dirección paralela presentan mayores valores que los obtenidos en los ensayos realizados en la dirección perpendicular a las capas.
- Los valores de la R^2 obtenidos son muy similares entre los diferentes diseños y direcciones de ensayo.

Seguidamente, se adjunta el estudio de los ensayos realizados a los diferentes especímenes generados con Filaflex (Figura 43 a Figura 48 del anexo I). Es importante destacar que para que estas gráficas sean más intuitivas, se han modificado los valores de los ejes dada la diferencia de los resultados obtenidos debida al material. Para el análisis de los resultados de los ensayos con los especímenes generados con Filaflex, se han descartados los valores inferiores a 5 N en lugar de los inferiores a 20 N como se ha hecho para las probetas generados con los otros materiales con el fin de estudiar la parte lineal del ensayo. Esto es debido a que el rango de fuerzas aplicadas para los especímenes con este material es menor. A continuación, se recogen las conclusiones obtenidas de los ensayos realizados a las probetas de este material:

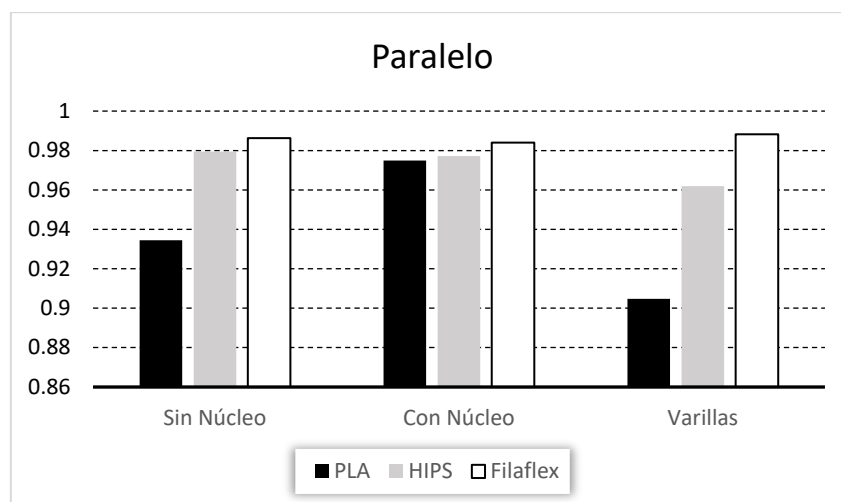
- Es el material del que se han obtenido datos experimentales menos lineales, esto se puede apreciar en la pequeña curvatura que se muestra en los resultados obtenidos, pequeñas perturbaciones que presentan dichos datos.
- Debido a su alta flexibilidad, este material es el que ha presentado menores fuerzas para su deformación.
- Es el material del que se han obtenido mayores valores de R^2 . Dichos valores son bastante similares entre probetas (cerca de 0.985).
- Los valores de rigidez son mayores para el diseño con núcleo pese a que el mayor valor se ha obtenido para el diseño sin núcleo ensayado en la dirección perpendicular a las capas. Por lo tanto, el menor valor de dicho coeficiente se obtiene en el diseño de varillas.

- Los ensayos realizados en la dirección perpendicular a las capas presentan valores de rigidez mayores que en los realizados en la dirección paralela a las mismas.

Tras los ensayos realizados de los diferentes especímenes y observando la Tabla 7, se puede concluir que:

- Para todos los materiales y exceptuando el modelo obtenido mediante Filaflex en la dirección perpendicular, el diseño que presenta mayor valor de rigidez es el espécimen con núcleo y el que presenta menores valores del mismo es el espécimen de varillas.
- Los valores de dicho coeficiente obtenido de los ensayos realizados en la dirección perpendicular a las capas son mayores que los obtenidos en los ensayos realizados en la dirección paralela a las mismas. Esto es debido a que la cohesión de las capas es mayor en la dirección perpendicular ya que la adhesión de las mismas no es perfecta. Esta característica de la fabricación por adición mediante extrusión es uno de los inconvenientes principales.
- Los valores de rigidez para las probetas obtenidas mediante Filaflex son considerablemente menores que los obtenidos mediante otros materiales.

La Figura 20 muestra dichos valores de los ajustes en un diagrama de barras con el fin de poder realizar una comparación más visual.



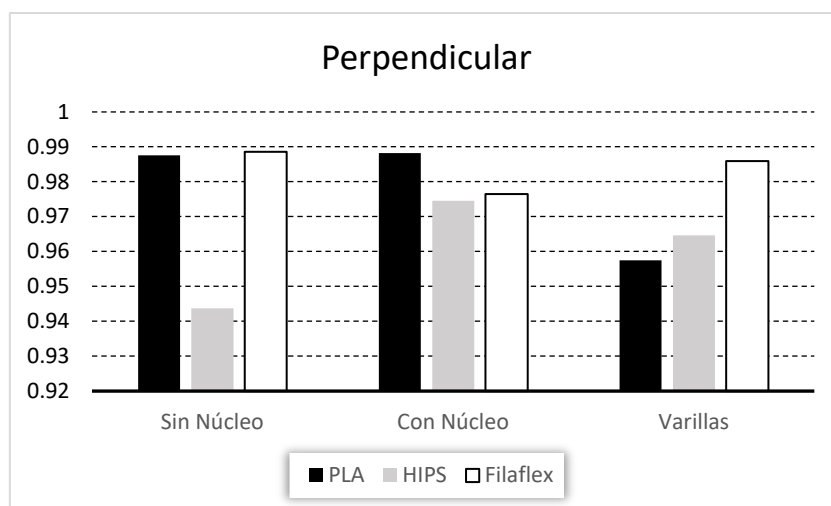


Figura 20 - Diagrama de barras de los valores de ajuste de los ensayos estáticos de compresión.

De la Figura 20 y la Tabla 7 se pueden sacar las siguientes conclusiones:

- Todos y cada uno de los valores de R^2 presentan un valor superior a 0.90, por lo que se puede considerar una buena aproximación a los diseños planteados.
- En cuanto al material, el PLA es el que peor ajuste tiene y el Filaflex el que presenta mejores valores. Esto coincide con la capacidad de deformación elástica de los materiales. A mayor elasticidad, menor es la pendiente y mejor es el ajuste.
- Con respecto a los diseños, el diseño con núcleo parece tener menor dispersión de los valores de ajuste que los demás. Esto parece ser debido al porcentaje de relleno de este diseño. A mayor porcentaje de relleno, mayor continuidad existe en la pieza y mayores son los valores de los ajustes.
- Con relación a las direcciones de las capas, en la mayoría de los ensayos no existen grandes diferencias entre direcciones, aunque en los ensayos en los que esta diferencia es mayor, los ensayos realizados en la dirección perpendicular presentan mejores valores de ajustes.

Otro de los puntos que se han estudiado en este ensayo es la fuerza máxima soportada por cada uno de los diseños, materiales y direcciones. La Tabla 8 recopila los valores de fuerzas máximas aplicadas en los ensayos de compresión estática.

Tabla 8 - Fuerzas máximas aplicadas en los ensayos estáticos de compresión estática.

		F_{max} [N]		
		PLA	HIPS	Filaflex
Sin núcleo	Paralelo (=)	1102.26	1150.67	21.44
	Perpendicular (+)	1508.46	939.64	40.37
Con núcleo	Paralelo (=)	1494.29	1222.30	38.69
	Perpendicular (+)	1624.09	1285.33	30.17
Varillas	Paralelo (=)	645.33	773.92	23.58
	Perpendicular (+)	975.48	884.73	24.30

En la Figura 21 se recogen los valores de la tabla anterior adimensionalizados, con respecto al valor obtenido para la probeta fabricada mediante PLA de diseño con núcleo ensayada en la dirección perpendicular a las capas, con el fin de realizar una comparativa más visual de los resultados anteriores.

De los resultados expuestos en la Figura 21 se puede concluir lo siguiente:

- El diseño con núcleo es el que mayor fuerza presenta al deformarse y, por el contrario, el diseño de varillas es el que menor fuerza máxima presenta ante la deformación. Esto coincide con el porcentaje de relleno de cada uno de los diseños y cumple con los resultados esperados.
- Se pueden apreciar diferencias entre las direcciones en las que se han realizado los ensayos. Aquellos ensayos realizados en la dirección perpendicular presentan mayor oposición ante la deformación. Esto es debido a la falta de continuidad que tiene el material en la adición de capas. Este punto es de gran importancia debido a que los diseños deben tener un comportamiento lo más uniforme posible, si dichos diseños se llevaran a la práctica.
- El Filaflex, al ser el material más flexible, se le aplica una fuerza menor en los ensayos estáticos de compresión, sin llegar en ninguno de los casos al 5% de la mayor fuerza soportada para el espécimen con núcleo de PLA ensayado en la dirección perpendicular a las capas.
- El PLA, en cambio, es el que mayor oposición presenta ante deformaciones, también debido a su rigidez, en la mayoría de los casos. Un aspecto a destacar es que se observa una tendencia general de obtener un mayor valor de fuerza máxima para el PLA que para el HIPS.
- En cuanto a la variación de fuerza máxima según la orientación de la fuerza de compresión aplicada respecto de la orientación de la capa, se observa que en el caso del PLA la variación normalizada es mayor que en el caso del HIPS, por lo que se puede considerar que la adherencia entre capas del PLA es menor que la adherencia obtenida en las probetas fabricadas con HIPS.

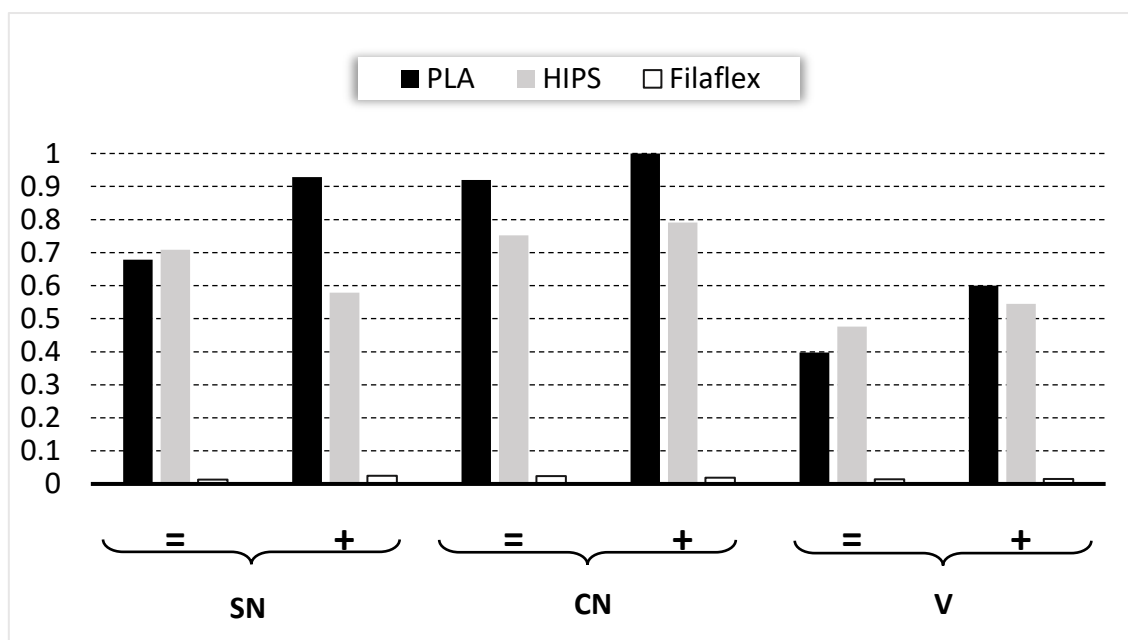


Figura 21 - Fuerzas máximas aplicadas en los ensayos estáticos de compresión adimensionalizadas con respecto a la probeta PLA CN ensayada en la dirección perpendicular.

5.4. Ensayos de compresión dinámica bajo carga de impacto a baja velocidad

Como se ha mencionado anteriormente, este ensayo consiste en impactar con un dardo cada uno de los especímenes de ensayo, y en cada una de las direcciones con tal de obtener valores de energías máxima del impacto y la energía absorbida por la deformación, además de la fuerza y desplazamiento máximos. Para la realización de estos ensayos, se ha dejado caer un dardo sensorizado con una masa total de 2.41 kg desde una altura de 85 cm estableciendo una frecuencia de muestreo de 100 kHz para las probetas de PLA y HIPS y de 50 kHz para las probetas de Filaflex.

Para obtener dichos valores, se han obtenido dos gráficas. Estas gráficas son las de fuerza frente al tiempo y la de energía frente a tiempo, para analizar los valores anteriormente mencionados. En este apartado, inicialmente se va a explicar cómo se van a tratar los resultados y con posteridad se realizará un análisis de la totalidad de los ensayos realizados.

Para las gráficas fuerza frente al tiempo, la fuerza viene dada en Newtons y el tiempo en milisegundos. A continuación, en la Figura 22, se muestra la curva de fuerza frente al tiempo del ensayo del espécimen PLA con núcleo con impacto perpendicular a las capas de fabricación, en ella se pueden apreciar tres partes significativas. La primera de ellas es el valor de la fuerza pico aplicada a la probeta, en este caso es de 2696.99 N. En cuanto a la curva se puede dividir en dos tramos, una de ellos es el tramo de aplicación de la fuerza que iría desde el inicio del ensayo hasta el valor pico y el segundo se trata de la recuperación del material, que va desde el valor pico hasta el punto en el que la fuerza vuelve a ser nula. En la Figura 22 se representan estas tres partes significativas.

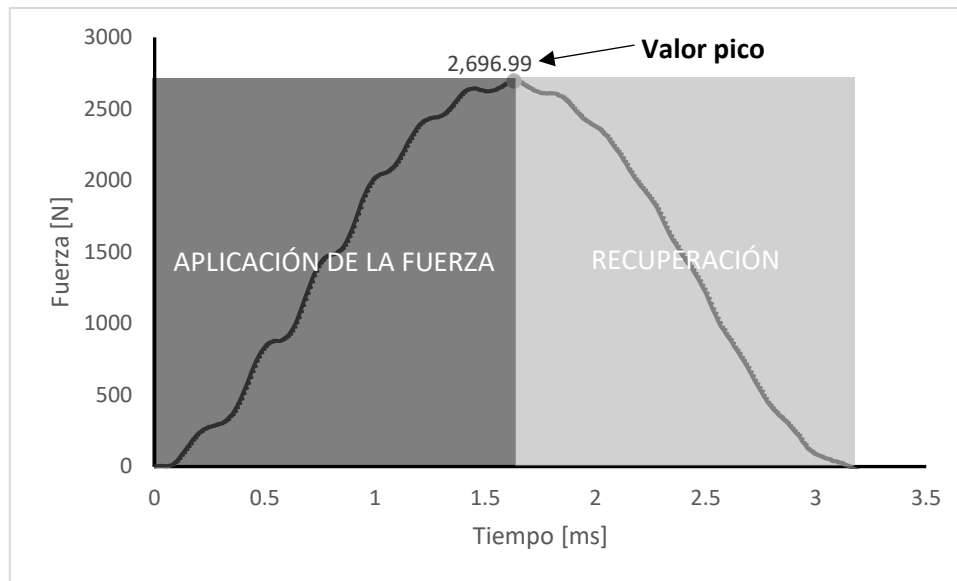


Figura 22 – Partes de las gráficas F-t de los ensayos dinámicos de compresión mediante carga de impacto.

Además, en cada una de las figuras correspondientes a cada una de las probetas realizados, se han realizado tres ensayos de impacto, representándolos en conjunto sobre una misma gráfica. Estas gráficas se encuentran en el anexo II de este trabajo (Figura 49 a Figura 66).

En los ensayos realizados a los especímenes de PLA (Figura 49 a Figura 54 del anexo II), la repetibilidad en la mayoría de los casos es buena y los valores de fuerza y duración del impacto resultan ser de aproximadamente 2500 N y de entre 3 y 3.5 ms exceptuando la probeta de varillas ensayada tanto en la dirección paralela como perpendicular en la que el valor de la fuerza máxima se ve reducido ligeramente y el valor del tiempo incrementa.

Este comportamiento del espécimen de varillas es debido a la morfología del mismo. La formación de diferentes capas unidas entre sí por las varillas supone una menor continuidad del material que en los otros dos diseños, por la separación entre capas, generando, por tanto, una menor reacción al impacto que se origina durante el ensayo.

A continuación, se analizan las gráficas obtenidas de las probetas fabricadas mediante HIPS (Figura 55 a Figura 60 del anexo II). En ellas se puede considerar que, en los diseños sin núcleo y de varillas tienen un comportamiento similar a las probetas obtenidas mediante PLA.

En el caso del espécimen con núcleo, los valores de duración del ensayo sí que son equivalentes pero los valores de fuerza máxima son superiores que los obtenidos para el mismo espécimen de PLA. Este punto no concuerda con los resultados obtenidos en los ensayos estáticos de compresión ni con los valores de energía absorbida que se comentarán más adelante. Es por ello por lo que se atribuye este hecho a una posible deformación plástica localizada en la probeta.

Seguidamente se van a analizar los ensayos realizados a los especímenes fabricados mediante Filaflex (Figura 61 a Figura 66 del anexo II). Cabe destacar que, al igual que en

las gráficas de los ensayos estáticos de compresión realizados a este mismo material, también se han modificado los ejes con respecto de los materiales analizados anteriormente. Esta modificación se debe a las diferencias que existen entre las características de los materiales ensayados que producen que se obtengan unos valores notablemente diferentes. Otro punto a tener en cuenta es la presencia de grandes oscilaciones durante la recuperación. Dichas oscilaciones son derivadas de una frecuencia de muestreo muy alta para un impacto más largo al tratarse de un material más flexible.

A modo de resumen, las probetas fabricadas mediante Filaflex, tienen una buena repetibilidad. A su vez se aprecia que los valores de fuerza pico se ven reducidos hasta una cuarta parte en relación con los de los especímenes cuyo material es PLA o HIPS y los valores de la duración de los ensayos incrementan hasta 7 veces más con relación a los mismos.

Una vez analizados los ensayos para cada uno de los diseños, materiales y direcciones, se han recogido los resultados de fuerza máxima y se han reunido en una misma gráfica. La Tabla 9 recoge los valores de fuerza máxima obtenidos en los ensayos dinámicos de compresión.

Tabla 9 - Valores de fuerza máxima obtenidos en los ensayos dinámicos de compresión.

		F_{max} [N]		
		PLA	HIPS	FF
Sin núcleo	Perpendicular (+)	2444.07	2541.32	570.87
	Paralelo (=)	2361.71	2462.16	427.26
Con núcleo	Perpendicular (+)	2662.32	2993.27	652.10
	Paralelo (=)	2508.71	3326.86	663.79
Varillas	Perpendicular (+)	1994.19	2059.21	641.55
	Paralelo (=)	2072.08	2148.93	584.25

En la Figura 23 se representan los valores de las fuerzas máximas adimensionalizados con respecto al valor obtenido para la probeta fabricada mediante HIPS del diseño con núcleo ensayada en la dirección paralela. Esta adimensionalización permitirá realizar una comparativa porcentual de este parámetro.

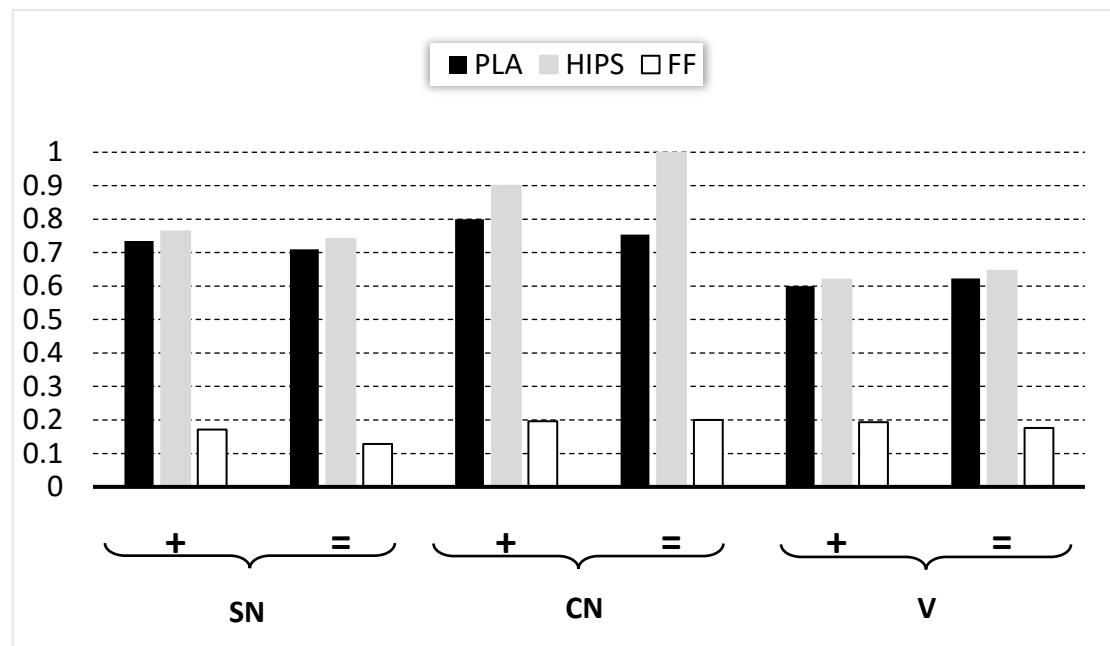


Figura 23 - Valores de fuerza máxima adimensionalizados con respecto al modelo HIPS CN en dirección paralela.

De la Figura 23 se concluye que:

- Los valores obtenidos para las probetas fabricadas mediante Filaflex son considerablemente menores que los de los demás materiales. Esto se debe a la capacidad de deformación que posee este material por lo que la fuerza necesaria para la deformación es menor.
- El material que presenta mayor reacción ante una deformación es el HIPS, esto se encuentra presente en cada uno de los ensayos, aunque en el diseño con núcleo la diferencia resulta ser más notable debido a que el porcentaje de relleno de este es mayor que el del resto de los diseños.
- La orientación de las capas, en estos ensayos, afecta menos que en los ensayos estáticos de compresión.
- El diseño con núcleo es el que presenta mayor fuerza máxima y el diseño de varillas la menor, esto coincide con el porcentaje de relleno, a mayor porcentaje de relleno, mayor es la fuerza máxima soportada. Además, también hay que tener en cuenta la continuidad del material, que es menor en el caso de las varillas al generarse las diferentes capas en el núcleo.

A continuación, se adjunta la Figura 24 que muestra la curva de energía frente al tiempo del ensayo de impacto de la probeta PLA con núcleo con impacto perpendicular a las capas de fabricación. En ella se puede apreciar la energía absorbida en cada momento del impacto, además de dos valores de interés, uno de ellos es el valor de energía máxima y el otro es el valor de energía absorbida. El tramo de cesión de energía va desde el inicio del ensayo hasta el punto de máxima energía.

En cuando al valor de energía absorbida, es el valor en el que se estabiliza la curva de energía puesto que es la energía que no se devuelve al exterior.

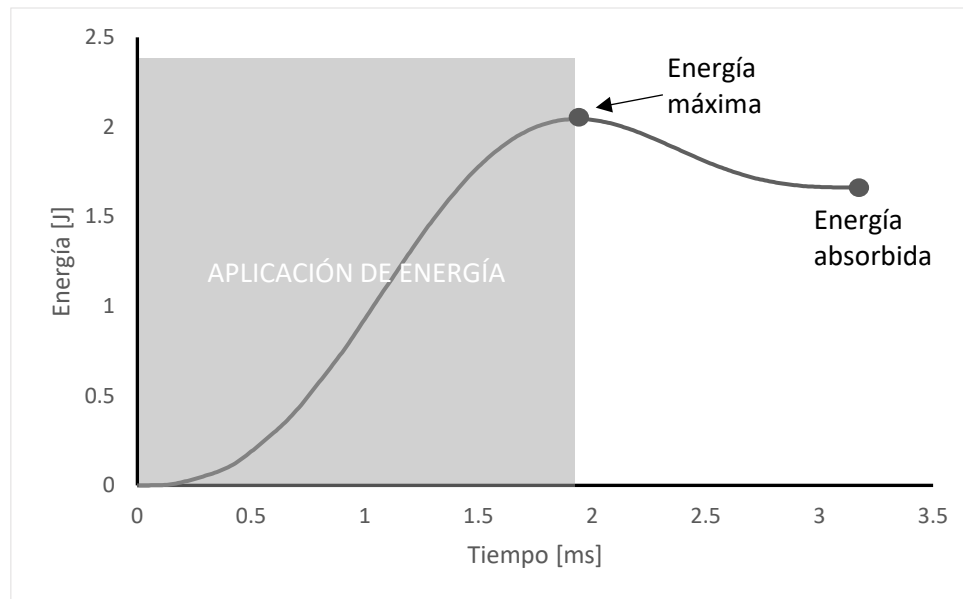


Figura 24 - Partes de las gráficas E-t de los ensayos dinámicos de compresión mediante carga de impacto.

A continuación, analizan las gráficas de energía frente al tiempo de cada uno de los ensayos realizados a los diferentes diseños, materiales y direcciones. Dichas gráficas se encuentran en el anexo II (Figura 67 a Figura 84) de este documento.

A continuación, se van a analizar las probetas fabricadas mediante PLA (Figura 67 a Figura 72 del anexo II). Se puede destacar que los valores de energía son prácticamente idénticos entre probetas, 1.5 J de energía absorbida.

Seguidamente se procede al análisis de los especímenes que han sido fabricados mediante HIPS. A modo de resumen se puede concluir que los resultados para este material son similares a los obtenidos para las probetas fabricadas mediante PLA (Figura 73 a Figura 78 del anexo II). Dichos valores son de 1.5 J de energía absorbida.

Posteriormente, se analizan las gráficas obtenidas de los ensayos realizados a los especímenes fabricados mediante Filaflex (Figura 79 a Figura 84 del anexo II). En este caso, los valores de los ejes son diferentes a los de las gráficas anteriores debido a que los resultados de los ensayos también lo son. Esta diferencia es causa de las notables características entre el Filaflex y los materiales anteriormente analizados. Por ello, y con el fin de poder apreciar de mejor manera estas gráficas, se realizan dichos cambios.

A modo de conclusión, el Filaflex tiene una duración del impacto considerablemente superior a la del resto de materiales. Esta duración implica una mayor deformación que concuerda con la capacidad de deformación elástica de dicho material. Destaca por encima del resto el espécimen sin núcleo estudiado en la dirección paralela a las capas de impresión debido a la poca diferencia que existe entre la energía máxima y la absorbida además de su buena repetibilidad.

Una vez realizados los ensayos para cada uno de los diseños, materiales y direcciones, se han recogido los resultados de energía absorbida y se han reunido en una misma tabla. La Tabla 10 recoge los valores de energía absorbida obtenidos en los ensayos dinámicos de compresión.

Tabla 10 - Valores de energía absorbida ensayos de compresión dinámica.

		E_{abs} [J]		
		PLA	HIPS	FF
Sin núcleo	Perpendicular (+)	1.54	1.49	1.17
	Paralelo (=)	1.64	1.53	0.75
Con núcleo	Perpendicular (+)	1.62	1.42	1.24
	Paralelo (=)	1.66	1.34	1.17
Varillas	Perpendicular (+)	1.53	1.27	1.27
	Paralelo (=)	1.50	1.31	1.35

En la Figura 25 se representan los valores de las energías absorbidas adimensionalizados con respecto al valor obtenido para la probeta fabricada mediante PLA del diseño con núcleo ensayada en la dirección paralela a las capas de fabricación con el fin de realizar una comparativa entre los diferentes diseños y materiales de ensayo.

De esta figura se puede llegar a varias consideraciones.

- El material que mayor energía absorbe es el PLA por lo que no resultaría ser un material interesante para fabricar estas probetas.
- El Filaflex es, en la mayoría de los casos, el material que menos energía absorbe por lo que a priori sería el material que se debería escoger para mejorar el comportamiento de estos especímenes.
- El diseño que menos energía absorbe teniendo en cuenta los tres materiales es el de varillas que, además, no resulta diferir entre los estudios realizados en la dirección paralela y perpendicular a las capas.
- El espécimen que menor energía resulta absorber es el diseño sin núcleo obtenido mediante Filaflex y estudiado en la dirección paralela a las capas que absorbe aproximadamente un 25% menos que el espécimen que le sigue. Esto puede ser una desventaja debido a la gran diferencia que existe entre una dirección y otra de la probeta ya que el comportamiento de la bola resultará ser completamente diferente impactándola desde un punto u otro.
- La probeta comentada anteriormente es la que mayor diferencia presenta, teniendo el resto una diferencia máxima de energía absorbida de aproximadamente el 5% entre la dirección paralela y perpendicular a las capas de impresión.

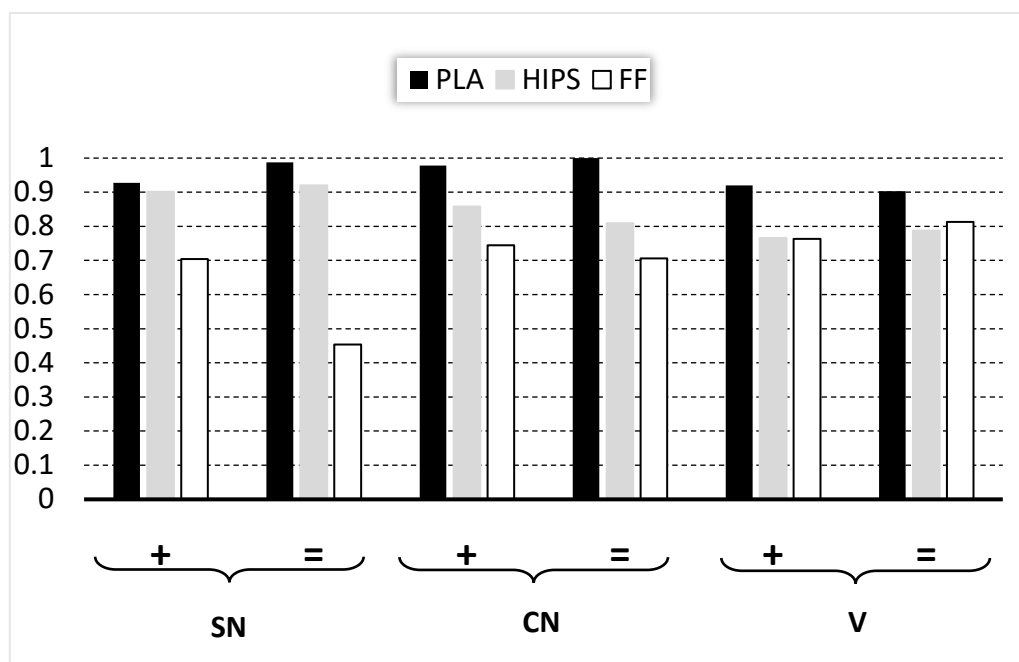


Figura 25 - Valores de energía absorbida adimensionalizados con la probeta PLA CN en dirección paralela.

Se podría concluir que los especímenes más apropiados resultarían ser los obtenidos mediante HIPS o Filaflex de varillas debido a la poca diferencia que presentan en el comportamiento entre sus direcciones, siendo la probeta fabricada mediante HIPS el que mayor homogeneidad presenta.

La Tabla 11 recoge los valores de los desplazamientos máximos obtenidos en los ensayos dinámicos de compresión.

Tabla 11 - Valores de los desplazamientos máximos obtenidos en los ensayos de compresión dinámica.

		D [mm]		
		PLA	HIPS	FF
Sin núcleo	Perpendicular (+)	1.72	1.71	7.62
	Paralelo (=)	1.73	2.04	6.48
Con núcleo	Perpendicular (+)	1.56	1.80	7.07
	Paralelo (=)	1.76	1.31	6.78
Varillas	Perpendicular (+)	1.93	2.12	8.01
	Paralelo (=)	2.29	2.10	8.78

A continuación, se adjunta la Figura 26 en la que representan los diagramas de barras de los valores de energía absorbida, además de la fuerza y desplazamiento máximos de cada uno de los diseños y direcciones divididos por materiales adimensionalizados con respecto al mayor valor obtenido en cada parámetro de estudio de todas las probetas. Mediante estas gráficas se pretende comparar los diseños según su geometría obviando la diferencia que existe entre los materiales.

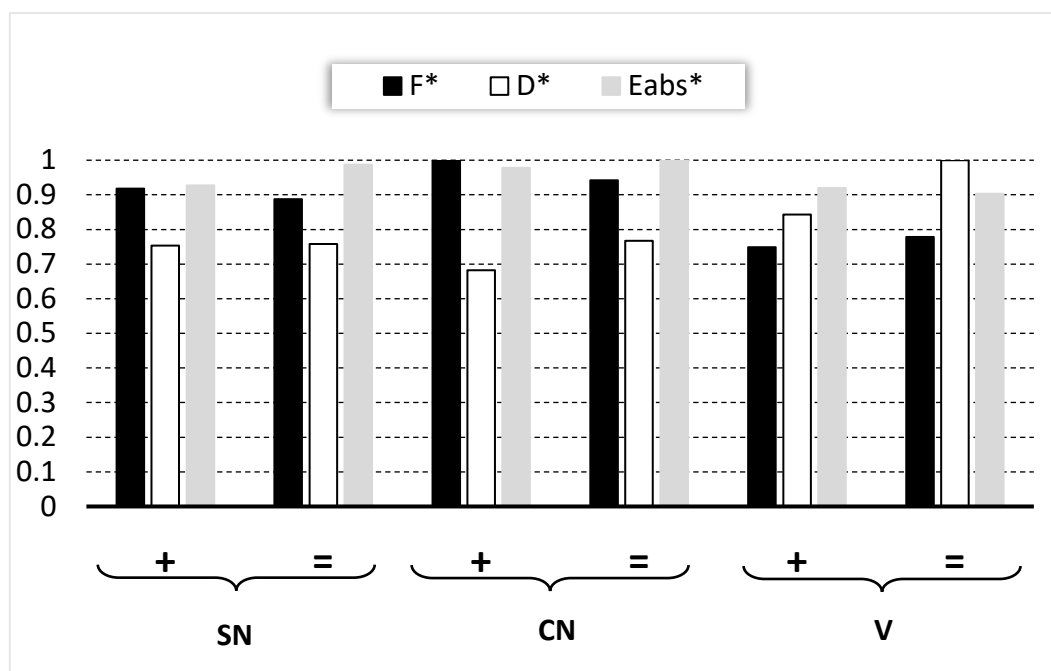


Figura 26 – Variables de los ensayos de compresión dinámica de las probetas de PLA adimensionalizadas con el mayor valor de cada parámetro.

De la Figura 26 se pueden sacar las siguientes conclusiones:

- Los valores de energía absorbida son mayores para la probeta con núcleo y tienen valores más pequeños en el espécimen de varillas.
- La fuerza aplicada, al igual que sucede con la energía absorbida, tiene los valores máximos en la probeta con núcleo, y mínimos la de varillas, siendo mayor cuanto mayor es el porcentaje de relleno del diseño.
- El mayor valor de desplazamiento máximo se obtiene para el espécimen de varillas ensayado en la dirección paralela a las capas de impresión mientras que para el resto de los ensayos se obtienen unos valores de entre un 70% y un 85% del mismo.
- En cuanto a las diferentes direcciones de estudio de las probetas, los valores de energía máxima, energía absorbida y fuerza aplicada varían menos de un 10% a diferencia de los valores de desplazamiento máximo que concretamente en el caso de la probeta de varillas, varían aproximadamente un 15%.

A modo de conclusión general, se puede afirmar que existen diferencias entre las direcciones de ensayo de los especímenes, que podrían modificar considerablemente el comportamiento de la bola al ser impactada. Además, el diseño de varillas parece ser el óptimo para la fabricación de las bolas debido a que es el que menor energía absorbe pese a sufrir un desplazamiento máximo mayor.

En la Figura 27, se adjunta la gráfica que resume y compara los resultados obtenidos de las probetas fabricadas mediante HIPS adimensionalizados con respecto al mayor valor obtenido en cada parámetro de estudio de todas las probetas.

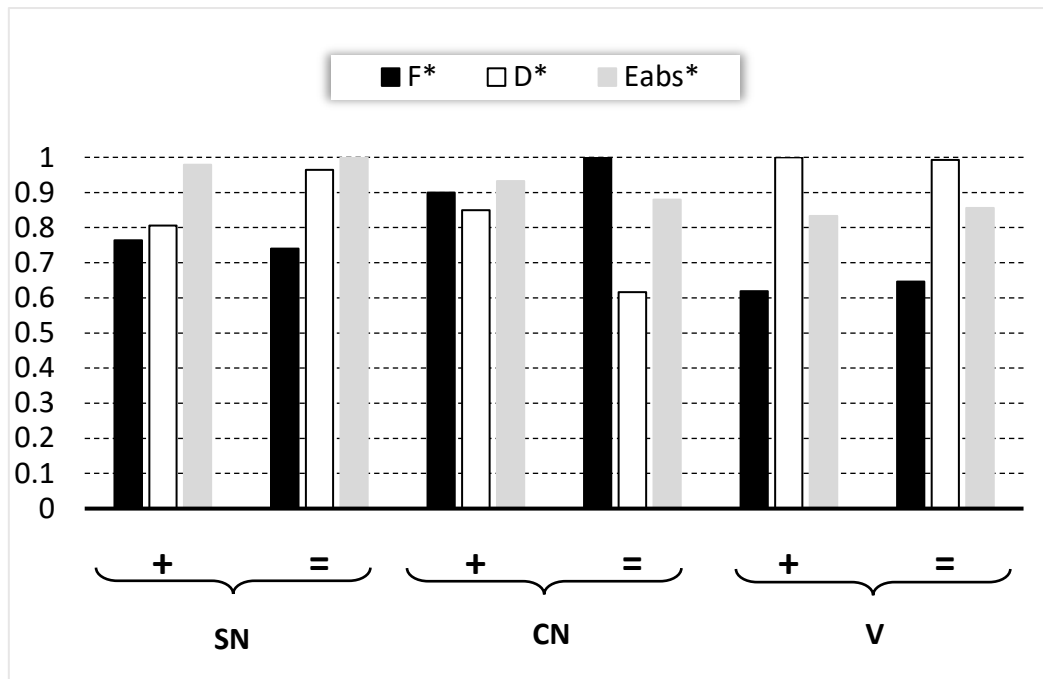


Figura 27 - Variables de los ensayos de compresión dinámica de las probetas de HIPS adimensionalizadas con el mayor valor de cada parámetro.

De la Figura 27 se concluye lo siguiente:

- La probeta que mayor energía absorbe es la probeta sin núcleo en ambas direcciones de estudio.
- El espécimen de varillas vuelve a ser aquel que menor energía absorbe siendo este alrededor de un 15% menos que la absorbida en el espécimen sin núcleo y manteniendo dicho valor en ambos sentidos de estudio.
- Para el resto de los parámetros estudiados, los menores valores de fuerza y mayores de deformación se encuentran también en la probeta de varillas siendo homogéneos entre direcciones de estudio.
- Tanto el espécimen con núcleo como el sin núcleo sufren desviaciones entre los valores obtenidos según la dirección de estudio.
- Para el espécimen con núcleo la deformación es mucho mayor en la dirección perpendicular a las capas mientras que en el caso de la probeta sin núcleo ocurre completamente a la inversa.

A modo de conclusión se podría decir que el mejor espécimen para el caso del HIPS es el de varillas debido a su menor valor de energía absorbida y su coincidencia entre los valores obtenidos en las diferentes direcciones de fabricación.

La Figura 28 representa los valores obtenidos de los ensayos realizados a las probetas impresas mediante Filaflex adimensionalizados con respecto al mayor valor obtenido en cada parámetro de estudio de todas las probetas.

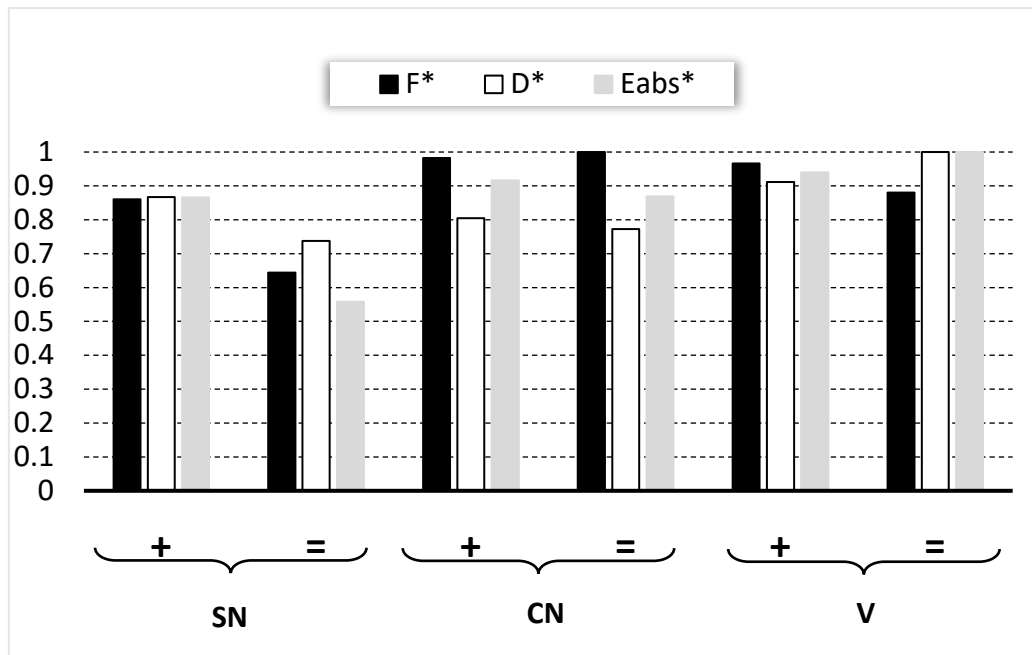


Figura 28 - Variables de los ensayos de compresión dinámica de las probetas de Filaflex adimensionalizadas con el mayor valor de cada parámetro.

Las conclusiones que se obtienen de la Figura 28 son las siguientes:

- Los resultados varían considerablemente de los obtenidos para los demás materiales.
- En el caso de la energía absorbida, el espécimen que mayor energía absorbe es el de varillas mientras que el espécimen sin núcleo es el que menor valor de energía absorbida presenta. Esto resulta ser completamente inverso a lo que ocurre en el caso del HIPS y difiere considerablemente en el caso del PLA.
- Es importante tener en cuenta que, la diferencia que existe entre los resultados obtenidos para la probeta sin núcleo en las diferentes direcciones ensayadas presenta una variación de sus valores de hasta un 30%.
- Pese a ser el caso del espécimen sin núcleo el más destacado, esta diferencia entre valores obtenidos en las diferentes direcciones se puede apreciar también en el resto de las probetas de una manera más destacada que en el resto de los materiales.

Para concluir, se puede destacar que el Filaflex es el material que mayor diferencia entre direcciones presenta, pese a ello, la probeta con núcleo es el que mantiene un comportamiento más constante entre ellas y a su vez el que menor energía absorbe en relación con la energía máxima aplicada.

5.5. Ensayos de estáticos compresión hasta rotura

En este ensayo se ha aplicado una carga de compresión a cada uno de los especímenes hasta llevarlos a rotura. Se han realizado en la dirección paralela a las capas puesto que es la dirección más desfavorable de las probetas, según los resultados obtenidos en los ensayos previos. Mediante este ensayo se pretende obtener los valores de carga máxima hasta rotura de cada una de las probetas, además del desplazamiento de la máquina en la que tiene lugar la rotura.

Las Figura 29 muestra el estado final de los especímenes sin núcleo obtenidos mediante PLA, HIPS y Filaflex respectivamente tras el ensayo estático de compresión hasta rotura o hasta aplicar un desplazamiento máximo de 17 mm ya que ese es el desplazamiento máximo que se ha programado en la máquina de compresión. Se puede comprobar a primera vista que el material que mayor flexibilidad tiene es el Filaflex, característica que se ha cumplido también en los ensayos anteriores. En el anexo III de este trabajo se encuentran las figuras que representan las curvas fuerza frente a desplazamiento de las diferentes probetas ensayadas (Figura 85, Figura 86 y Figura 87).

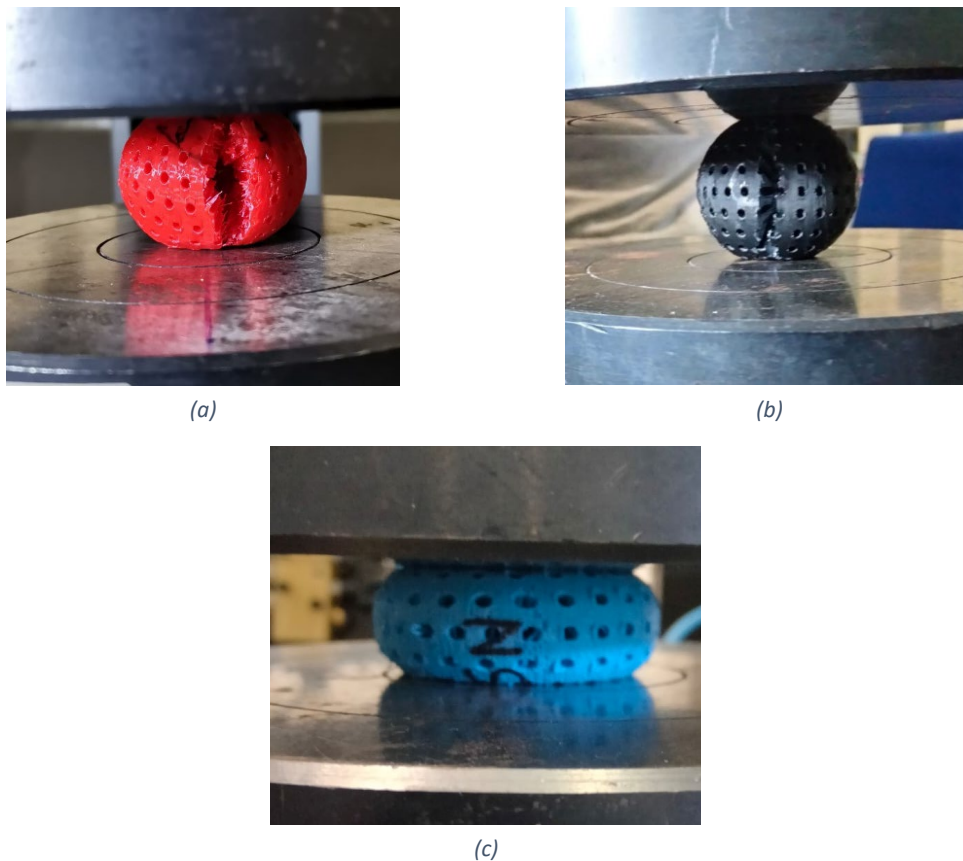


Figura 29 - Resultado ensayo rotura probetas sin núcleo (a) PLA, (b) HIPS, (c) Filaflex.

La Tabla 12 recoge los valores anteriormente mencionados.

Tabla 12 – Valores máximos de fuerza y desplazamiento máximos de los ensayos estáticos de compresión a rotura.

	Fuerza máxima [N]			Desplazamiento máximo [mm]		
	PLA	HIPS	Filaflex	PLA	HIPS	Filaflex
Sin núcleo	3331.57	3931.55	1498.77	2.05	2.39	16.62
Con núcleo	8166.63	6766.45	3032.86	5.31	3.77	16.62
Varillas	5004.47	2448.77	2147.80	4.74	2.82	16.62

Como se puede ver en la tabla anterior, los valores obtenidos del desplazamiento máximo para los ensayos realizados a las probetas de Filaflex son iguales, esto es debido a que no se llegó a completar el ensayo debido a la alta flexibilidad del material ya que se limitó el ensayo a 25 mm de desplazamiento puesto que desplazamientos mayores no tienen interés para los objetivos de este trabajo.

Con el fin de comparar los valores obtenidos de manera porcentual, se adimensionalizan los valores de fuerza máxima con respecto al valor obtenido para la probeta fabricada mediante PLA del diseño con núcleo. En la Figura 30 siguiente se recogen dichos valores adimensionalizados.

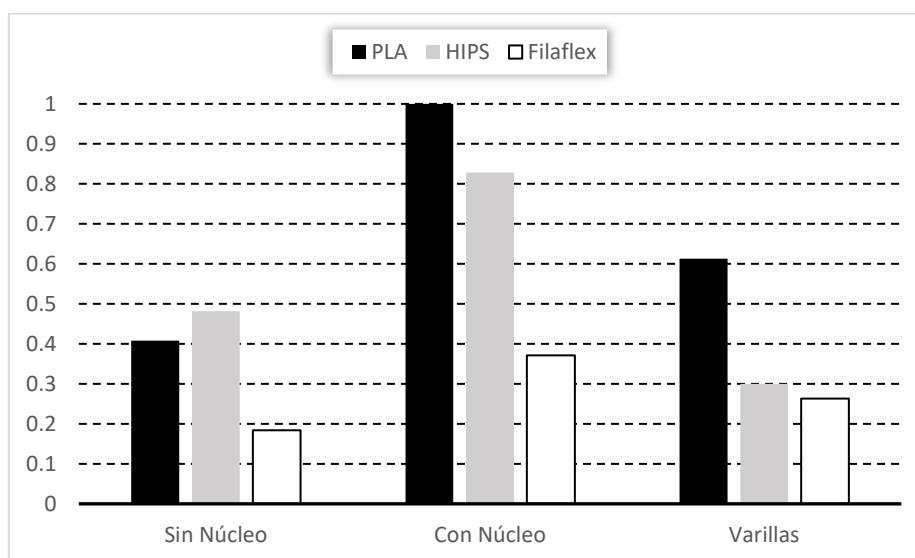


Figura 30 – Valores de fuerza máxima adimensionalizados con respecto a la probeta de PLA CN.

De estos ensayos se puede concluir que:

- Al igual que en los ensayos estáticos de compresión, el espécimen que mayor fuerza presenta antes la compresión es la probeta con núcleo.
- El material que mayor fuerza parece requerir para llegar a la rotura es el PLA.
- La probeta sin núcleo, a diferencia de las otras probetas, parece presentar mayores valores de fuerza máxima para el HIPS que para el PLA, coincidiendo con los ensayos estáticos de compresión expuestos anteriormente.

6. Conclusiones

A continuación, se procede a exponer las principales conclusiones obtenidas tras los estudios y análisis realizados en los capítulos anteriores.

1. Se han diseñado tres posibles diseños con distintas geometrías que se han fabricado y ensayado.
2. Los tres diseños han sido fabricados con tres materiales diferentes. Se ha observado que, a la hora de obtener los modelos, existen imperfecciones en el acabado superficial por lo que sería necesario modificar los parámetros de impresión disminuyendo la velocidad de impresión y el espesor de las capas. También se podría mejorar realizando operaciones de acabado superficial y a su vez realizando controles de calidad para comprobar que los modelos cumplen con errores de impresión aceptables.
3. Se han realizado ensayos estáticos de compresión y se puede concluir que la totalidad de los modelos cumplen con un comportamiento lineal con un valor de ajuste de los modelos (R^2) superior a 0.9 en todos los ensayos.
4. A su vez se concluye que el valor de rigidez varía en función del diseño y dirección de ensayo. Para el propósito que se persigue en los núcleos de bolas de golf, es de interés obtener piezas con capacidad de deformación elástica por lo que se busca un valor de rigidez pequeño. Este valor se obtiene en la probeta de varillas obtenida mediante Filaflex.
5. Se han ensayado a compresión dinámica bajo carga de impacto a baja velocidad las probetas y se determina que aquellas probetas obtenidas mediante Filaflex resultan ser las que menor energía absorben, aspecto que beneficia la distancia de lanzamiento de las mismas. Por otro lado, valorando únicamente los diseños y dejando de lado los materiales de fabricación, el espécimen de varillas es el que por norma general absorbe menor energía. Destaca el caso de la probeta con núcleo que en el caso del Filaflex es el que menos energía absorbe de todos, aunque su enorme diferencia entre direcciones implica que no sea un diseño aceptable.
6. Se han realizado ensayos estáticos de compresión hasta rotura y se ha observado que el Filaflex es el material con mayor capacidad de deformación sin llegar en ningún caso a romper, mientras que las probetas obtenidas mediante HIPS son las que soportan menores cargas y llegan antes a rotura.
7. Tras realizar todos los ensayos, se observa que los especímenes no cumplen con homogeneidad en el comportamiento. Existen diferencias en función de la dirección de ensayo debido a las capas de impresión. Sin embargo, hay modelos que presentan mayores diferencias que otros. Pese a ello, el modelo de varillas es el modelo que mayor homogeneidad presenta entre direcciones para todos los materiales utilizados en la impresión de los modelos.

A modo de conclusión general, el modelo que mejores características presenta es el modelo de varillas obtenido mediante Filaflex, pese a ello, debería estudiarse si las variaciones en el comportamiento en función de las direcciones son representativas como para descartar este tipo de fabricación para la obtención de los núcleos de bolas de golf.

7. Líneas futuras de investigación

Una vez analizados los resultados y expuestas las conclusiones, se proponen un conjunto de líneas futuras de investigación que permitirían profundizar y desarrollar en mayor medida este proyecto complementando y ampliando la presente investigación.

En primer lugar, sería de gran interés estudiar otros puntos de impacto diferentes a los ortogonales a las capas de fabricación con el fin de obtener una aproximación del comportamiento más preciso de los mismos. A su vez, la realización de ensayos dinámicos de compresión bajo carga de impacto en los que se emplee la cabeza de un palo de golf ayudaría a obtener resultados y sacar conclusiones de parámetros más cercanos a lo que correspondería con la práctica de este deporte.

Uno de los parámetros de mayor importancia en cuanto a la dinámica de una bola de golf, es la rotación que esta tiene sobre sí misma, conocida como spin, por lo que sería de interés realizar el estudio del spin de los modelos estudiados en este trabajo tras ser impactados desde diferentes puntos para obtener el comportamiento de estos, compararlo con los rangos óptimos y, a su vez, verificar que no varía en función del punto de impacto.

Por último, en este proyecto se ha estudiado únicamente el núcleo por sí solo, aislado de la capa externa que tienen las bolas de golf reales. Es por ello por lo que otra línea futura de investigación es el recubrimiento de dichos núcleos de una o varias capas para analizar el comportamiento real de los modelos, estudiar si su comportamiento varía en función de las capas que los recubren y concluir cuál de los casos presenta mejores características.

Anexos

Anexo I: Ensayos estáticos de compresión

La Figura 31 representa el ensayo de la probeta con núcleo ensayado en la dirección perpendicular a las capas. El valor de la R^2 es de 0.9882 lo que resulta un valor admisible y una rigidez de 3387 N/mm.

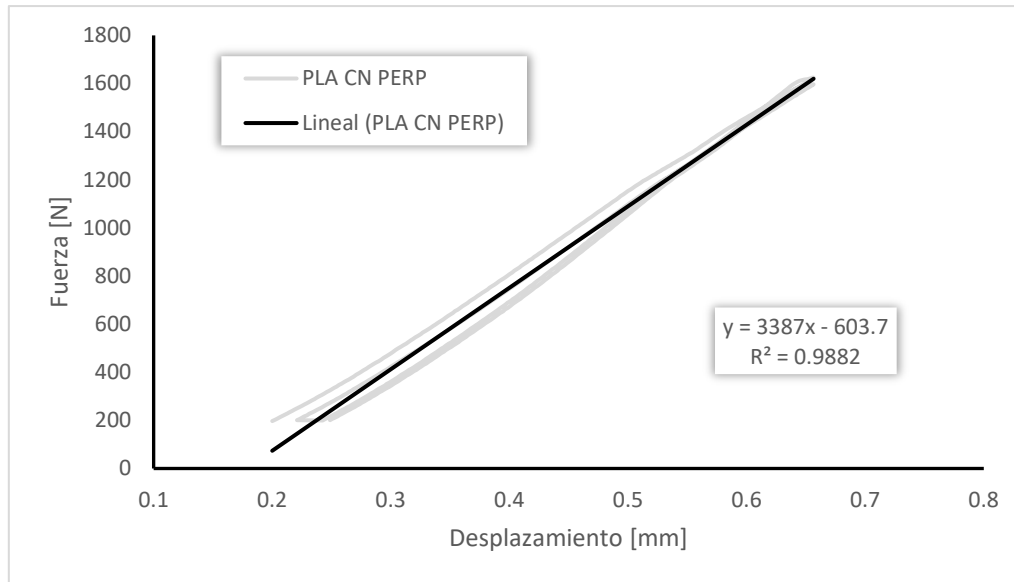


Figura 31 – Línea de tendencia F-D ensayo estático de compresión de la probeta PLA CN en dirección perpendicular.

La Figura 32 representa el ensayo del espécimen con núcleo ensayado en la dirección paralela a las capas. Se puede apreciar que el valor de la fuerza máxima es ligeramente inferior a la de la probeta anterior. El valor de la R^2 es de 0.9749 lo que resulta un valor admisible y una rigidez de 3332.2 N/mm.

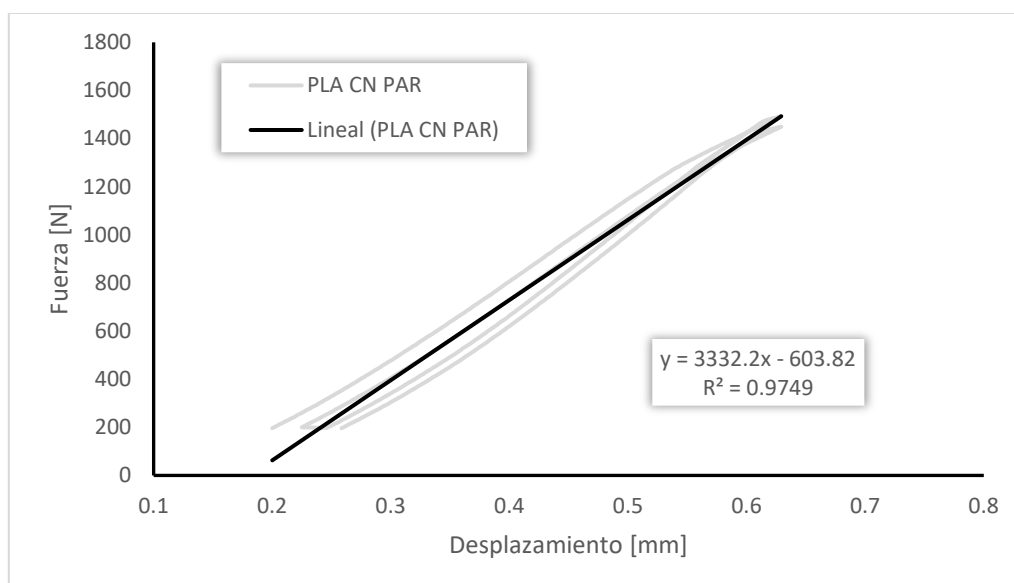


Figura 32 – Línea de tendencia F-D ensayo estático de compresión de la probeta PLA CN en dirección paralela.

La Figura 33 representa el ensayo del espécimen sin núcleo ensayado en la dirección perpendicular a las capas. El valor de la R^2 es de 0.9876 lo que resulta un valor admisible y una rigidez de 2680.5 N/mm.

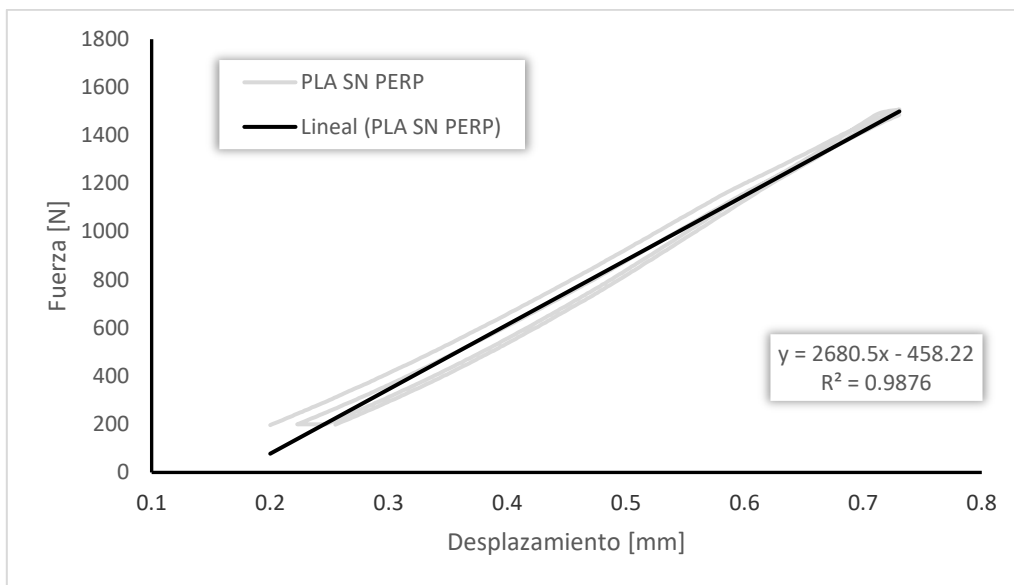


Figura 33 – Línea de tendencia F-D ensayo estático de compresión de la probeta PLA SN en dirección perpendicular.

En la Figura 34 se expone el ensayo de la probeta sin núcleo ensayada en la dirección paralela a las capas. El valor de la R^2 es de 0.9345 y una rigidez de 2269.8 N/mm. Esta disminución de la rigidez se puede apreciar en la gráfica puesto que la pendiente de la recta resulta ser considerablemente inferior a las obtenidas anteriormente. También se puede apreciar que la nube de datos experimentales tiene una dispersión considerablemente mayor que los demás ensayos, esto se ve reflejado en el valor de la R^2 que se ve reducida considerablemente. Pese a esta reducción, dicho valor puede ser considerado como admisible puesto que es superior a 0.9.

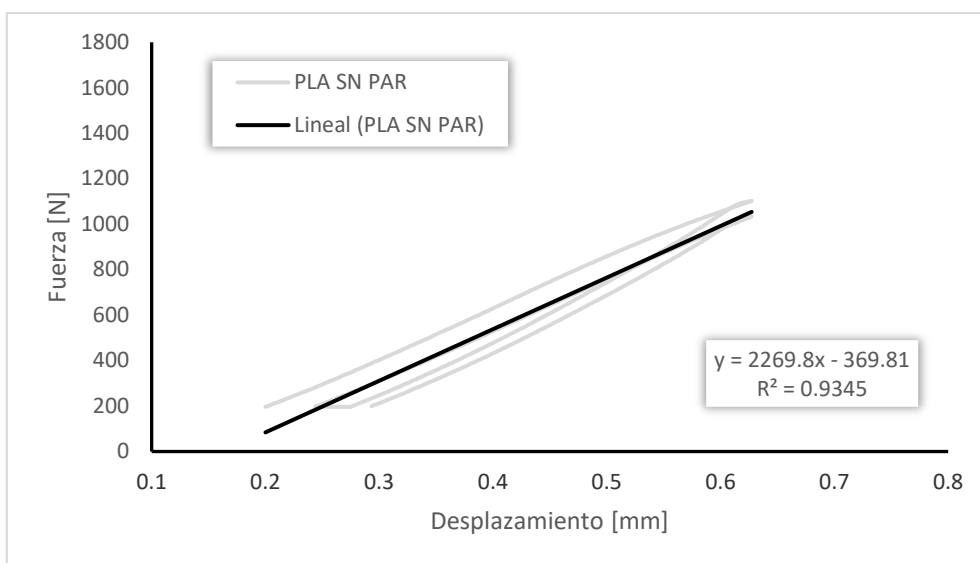


Figura 34 – Línea de tendencia F-D ensayo estático de compresión de la probeta PLA SN en dirección paralela.

La Figura 35 representa el ensayo de la probeta de varillas ensayada en la dirección perpendicular a las capas. El valor de la R^2 es de 0.9575 lo que resulta un valor admisible y una rigidez de 1679.9 N/mm. Se observa una disminución de la pendiente todavía mayor que en el ensayo anterior.

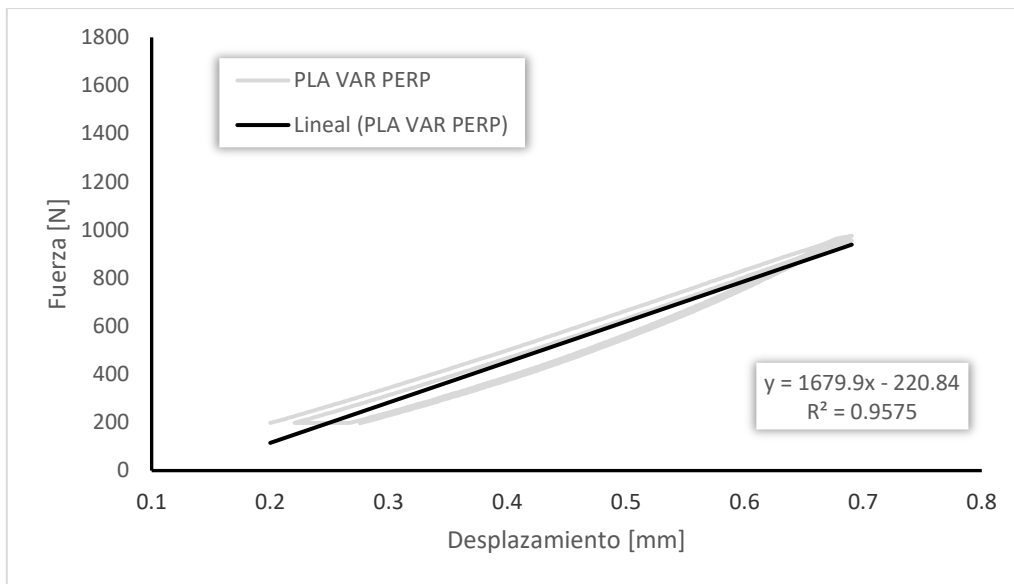


Figura 35 – Línea de tendencia F-D ensayo estático de compresión de la probeta PLA VAR en dirección perpendicular.

En la Figura 36 se muestra el ensayo de la probeta de varillas ensayada en la dirección paralela a las capas. El valor de la R^2 es de 0.9047 y una rigidez de 1062.2 N/mm. Se puede apreciar que la nube de datos experimentales tiene una dispersión considerablemente mayor que los demás ensayos, esto se ve reflejado en el valor de la R^2 que se ve reducida considerablemente. Pese a esta reducción, dicho valor puede ser considerado como admisible. También destaca a simple vista la reducción de hasta un 30% del valor de la pendiente en comparación con los demás especímenes estudiados.

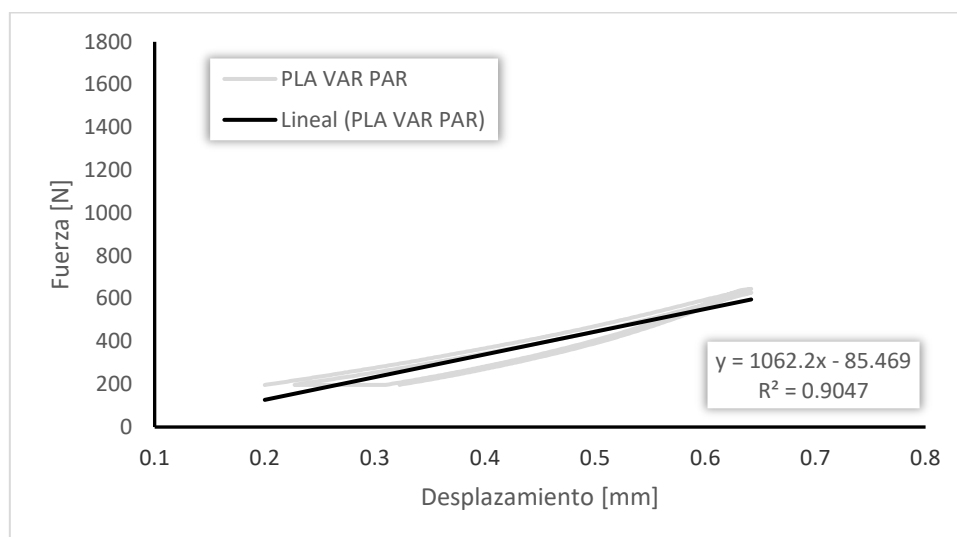


Figura 36 – Línea de tendencia F-D ensayo estático de compresión de la probeta PLA VAR en dirección paralela.

La Figura 37 representa el ensayo de la probeta con núcleo ensayada en la dirección perpendicular a las capas. El valor de la R^2 es de 0.9745 lo que resulta un valor admisible y una rigidez de 2710.5 N/mm.

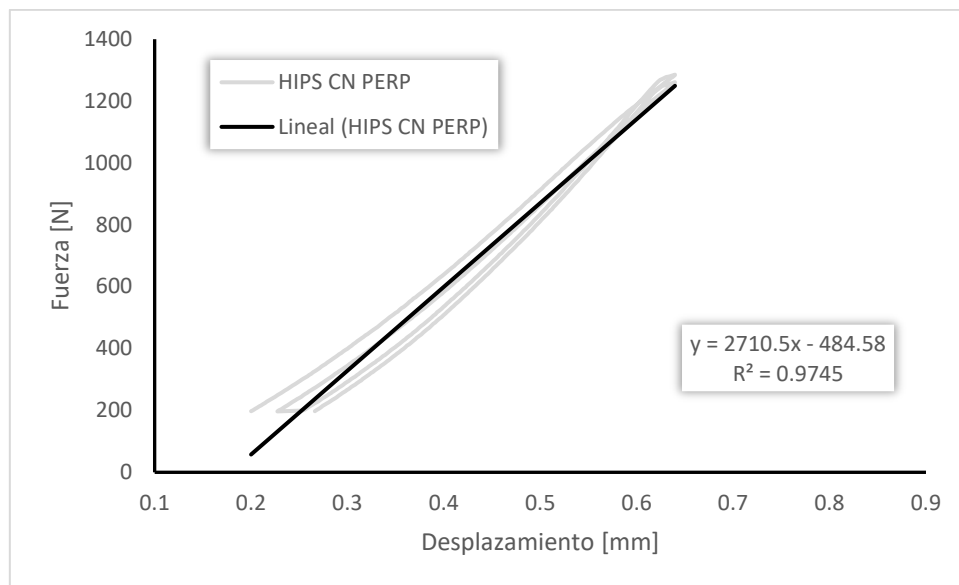


Figura 37 – Línea de tendencia F-D ensayo estático de compresión de la probeta HIPS CN en dirección perpendicular.

La Figura 38 representa el ensayo de la probeta con núcleo ensayada en la dirección paralela a las capas. El valor de la R^2 es de 0.9772 lo que resulta un valor admisible y una rigidez de 2958.2 N/mm. Se puede apreciar en la gráfica como la pendiente de la recta resulta ser ligeramente superior.

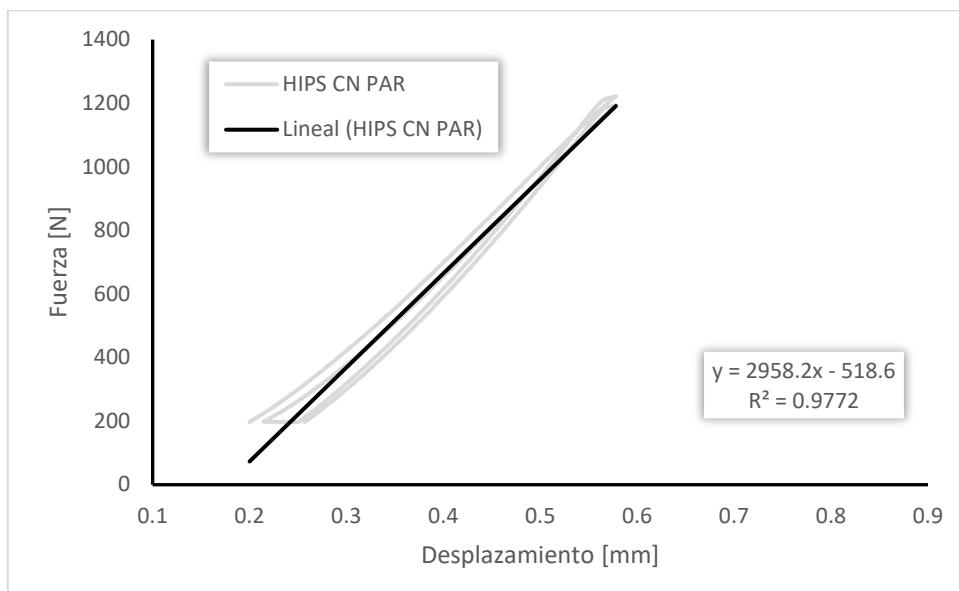


Figura 38 – Línea de tendencia F-D ensayo estático de compresión de la probeta HIPS CN en dirección paralela.

La Figura 39 representa el ensayo del espécimen sin núcleo ensayado en la dirección perpendicular a las capas. El valor de la R^2 es de 0.9437 y una rigidez de 2028.1 N/mm. Se puede apreciar que la nube de datos experimentales tiene una dispersión considerablemente mayor que los demás ensayos, esto se ve reflejado en el valor de la R^2 que se ve reducida considerablemente. Pese a esta reducción, dicho valor puede ser considerado como admisible. Destaca la reducción del valor de la pendiente y del valor máximo de la fuerza.

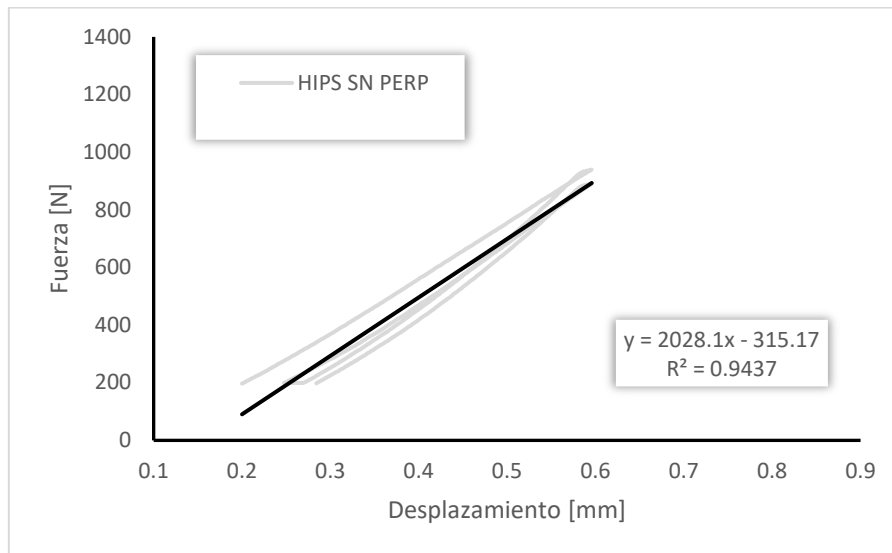


Figura 39 – Línea de tendencia F-D ensayo estático de compresión de la probeta HIPS SN en dirección perpendicular.

En la Figura 40 se expone el ensayo del espécimen sin núcleo ensayado en la dirección paralela a las capas. El valor de la R^2 es de 0.9795 lo que resulta un valor admisible y una rigidez de 2365.1 N/mm. En relación con el mismo espécimen estudiado en la dirección perpendicular, tanto el valor de la pendiente como el de la fuerza máxima resultan ser mayores.

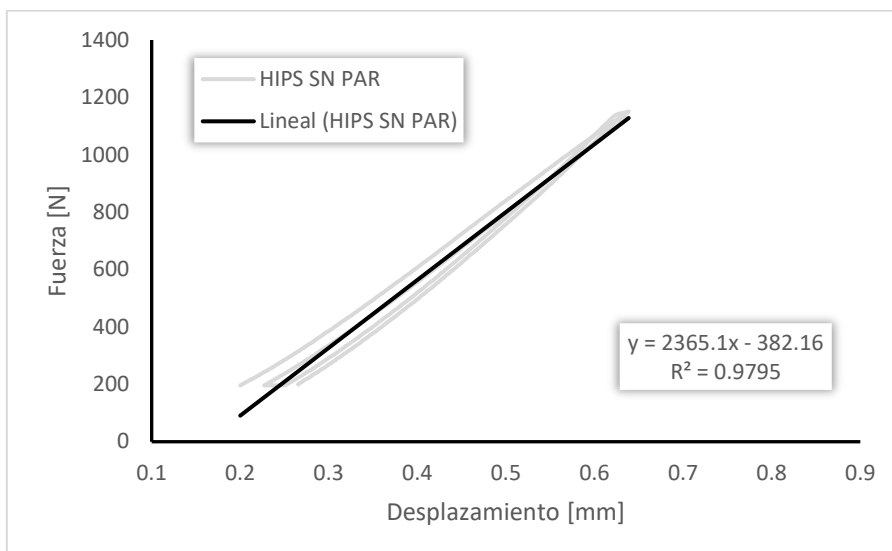


Figura 40 – Línea de tendencia F-D ensayo estático de compresión de la probeta HIPS SN en dirección paralela.

La Figura 41 representa el ensayo de la probeta de varillas ensayada en la dirección perpendicular a las capas. El valor de la R^2 es de 0.9646 lo que resulta un valor admisible y una rigidez de 1203.5 N/mm. Al igual que sucede en el PLA, este espécimen resulta tener una menor pendiente y un menor valor de fuerza máxima.

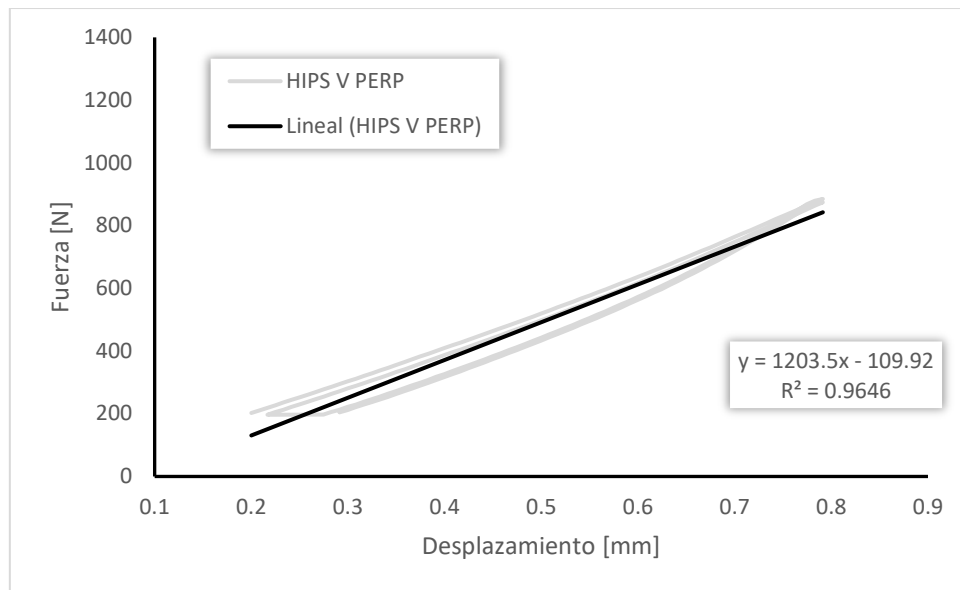


Figura 41 – Línea de tendencia F-D ensayo estático de compresión de la probeta HIPS VAR en dirección perpendicular.

En la Figura 42 se muestra el ensayo de la probeta de varillas ensayado en la dirección paralela a las capas. El valor de la R^2 es de 0.9619 lo que resulta un valor admisible y una rigidez de 1372.4 N/mm. A diferencia de lo obtenido para el PLA, los valores de la pendiente para esta probeta en las dos direcciones estudiadas parecen ser similares a diferencia de los valores de la fuerza máxima que para este caso resulta ser inferior.

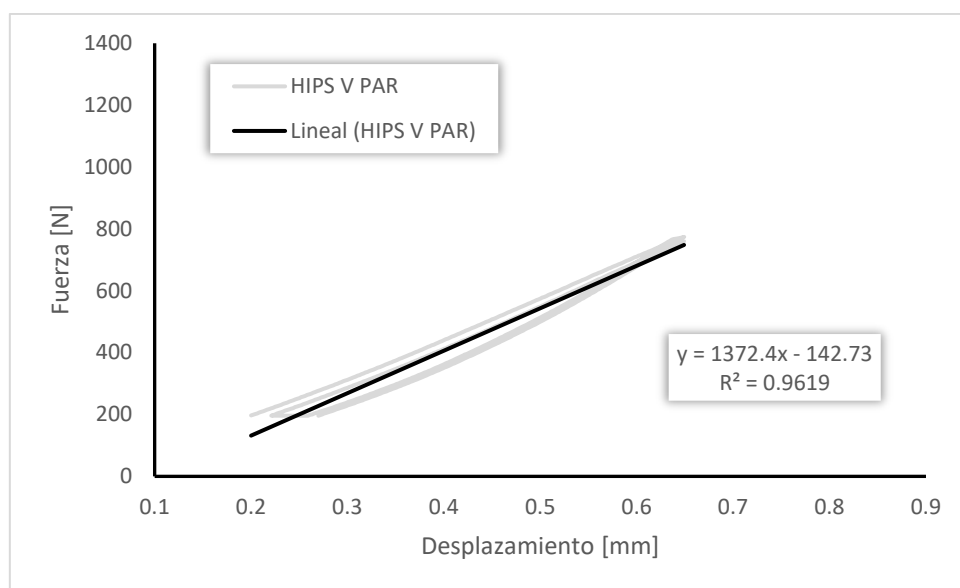


Figura 42 – Línea de tendencia F-D ensayo estático de compresión de la probeta HIPS VAR en dirección paralela.

La Figura 43 representa el ensayo de la probeta con núcleo ensayada en la dirección perpendicular a las capas. El valor de la R^2 es de 0.9765 lo que resulta un valor admisible y una rigidez de 43.1 N/mm.

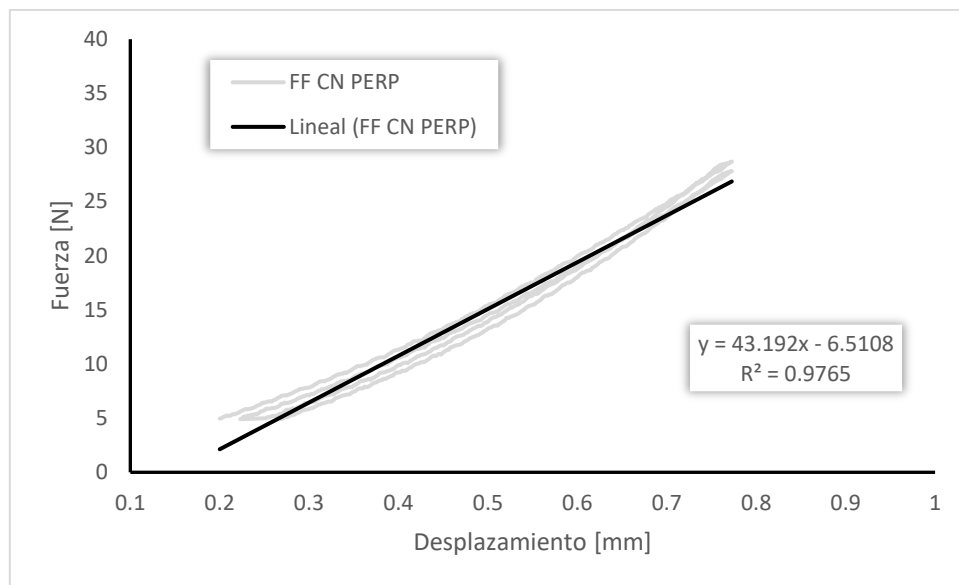


Figura 43 – Línea de tendencia F-D ensayo estático de compresión de la probeta Filaflex CN en dirección perpendicular.

La Figura 44 representa el ensayo de la probeta con núcleo ensayada en la dirección paralela a las capas. El valor de la R^2 es de 0.9840 lo que resulta un valor admisible y una rigidez de 49.7 N/mm. Destaca que el valor máximo de la fuerza es superior al obtenido para la misma probeta estudiada en la dirección perpendicular a las capas.

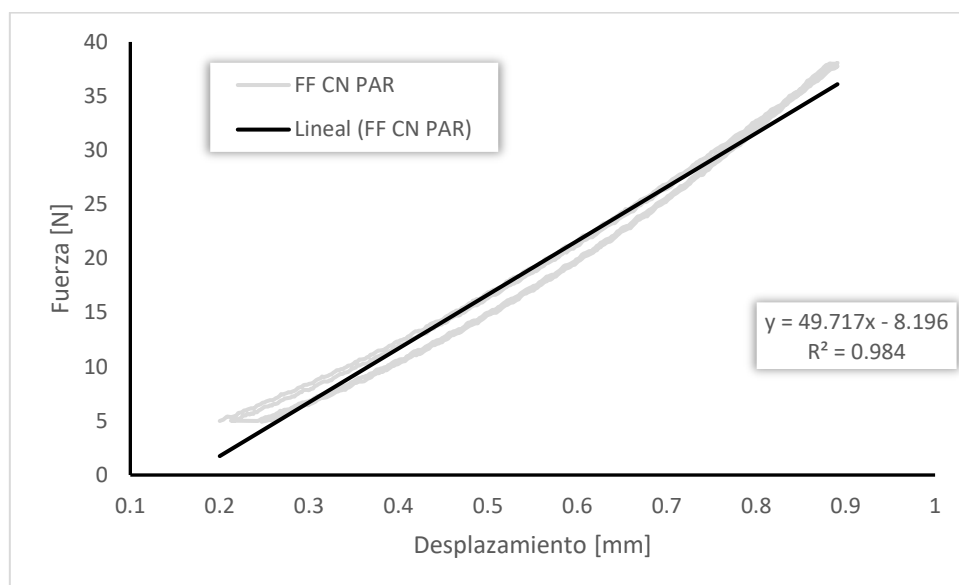


Figura 44 – Línea de tendencia F-D ensayo estático de compresión de la probeta Filaflex CN en dirección paralela.

La Figura 45 representa el ensayo del espécimen sin núcleo ensayado en la dirección perpendicular a las capas. El valor de la R^2 es de 0.9886 lo que resulta un valor admisible y una rigidez de 51 N/mm.

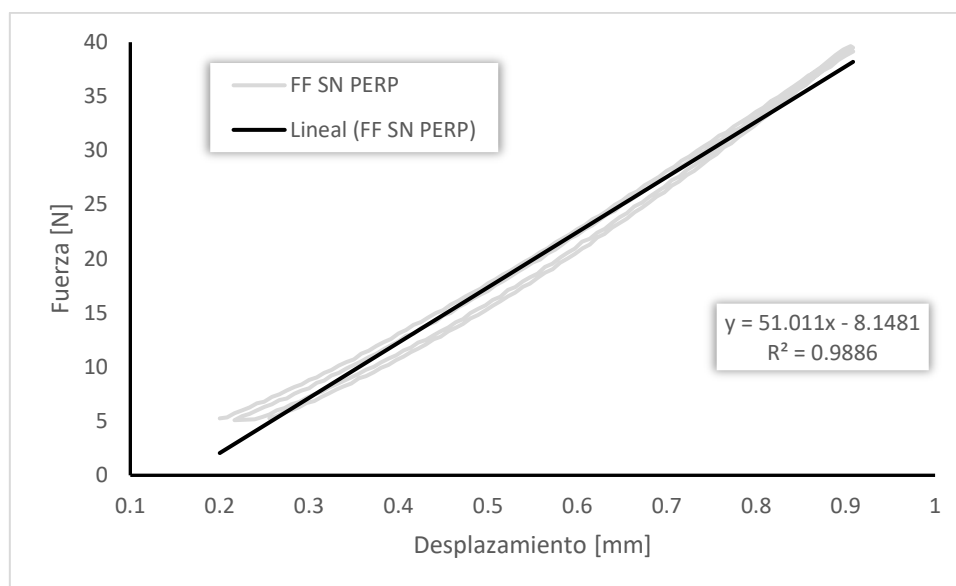


Figura 45 – Línea de tendencia F-D ensayo estático de compresión de la probeta Filaflex SN en dirección perpendicular.

En la Figura 46 se expone el ensayo de la probeta sin núcleo ensayada en la dirección paralela a las capas. El valor de la R^2 es de 0.9862 lo que resulta un valor admisible y una rigidez de 33.1 N/mm. Resalta la gran diferencia que existe entre los valores de rigidez y de fuerza máxima entre este espécimen y el estudiado en la dirección perpendicular obteniendo para este ensayo valores considerablemente inferiores.

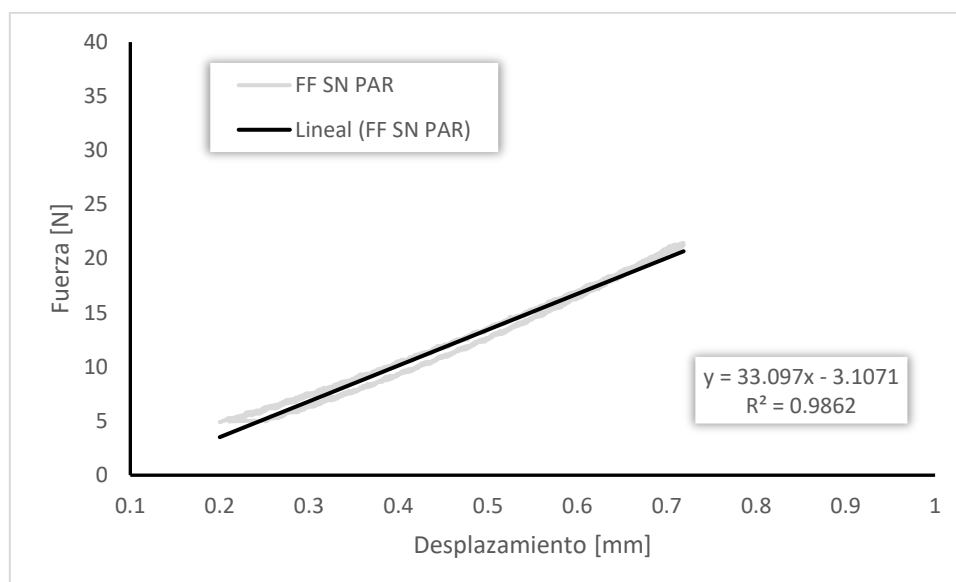


Figura 46 – Línea de tendencia F-D ensayo estático de compresión de la probeta Filaflex SN en dirección paralela.

La Figura 47 representa el ensayo de la probeta de varillas ensayada en la dirección perpendicular a las capas. El valor de la R^2 es de 0.9859 lo que resulta un valor admisible y una rigidez de 36.6 N/mm.

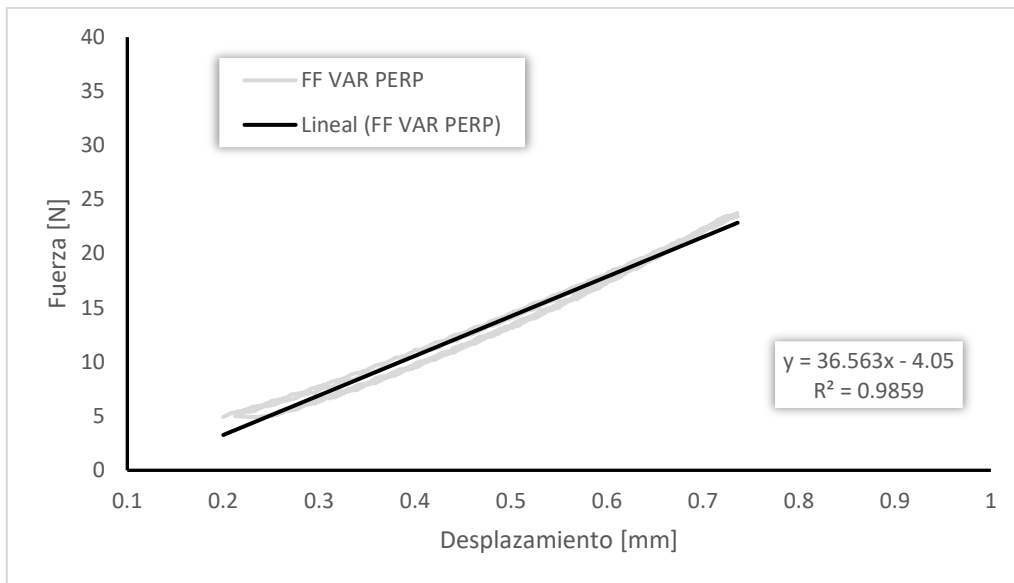


Figura 47 – Línea de tendencia F-D ensayo estático de compresión de la probeta Filaflex VAR en dirección perpendicular.

En la Figura 48 se muestra el ensayo de la probeta de varillas ensayada en la dirección paralela a las capas. El valor de la R^2 es de 0.9883 lo que resulta un valor admisible y una rigidez de 27.8 N/mm. Tal y como sucede en el resto de los materiales ensayados, este espécimen resulta tener valores muy inferiores en comparación con las probetas con núcleo y sin núcleo.

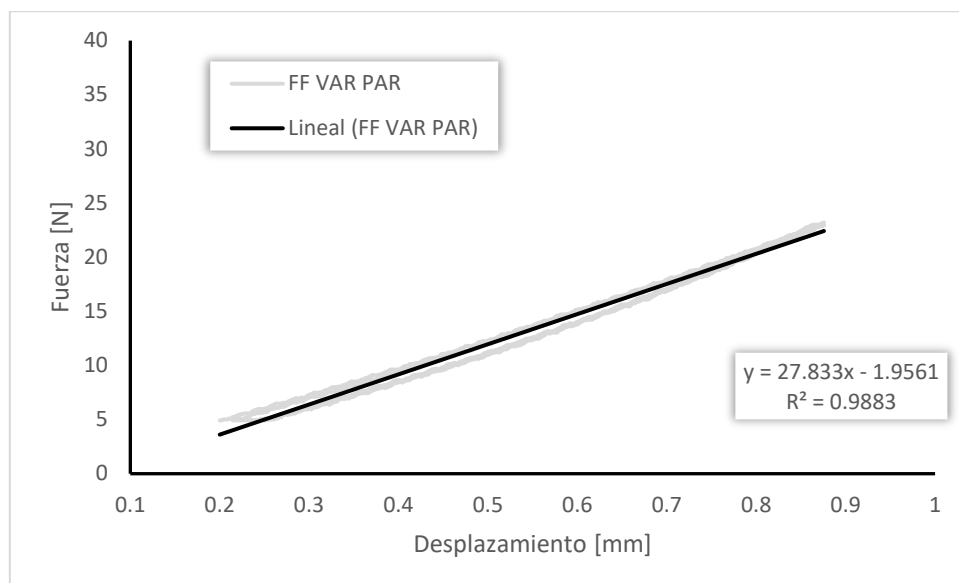


Figura 48 – Línea de tendencia F-D ensayo estático de compresión de la probeta Filaflex VAR en dirección paralela.

Anexo II: Ensayos de compresión dinámica bajo carga de impacto a baja velocidad

Gráficas fuerza frente al tiempo

La Figura 49 representa los ensayos del espécimen con núcleo, con aplicación del impacto en la dirección perpendicular a las capas. De estos ensayos, inicialmente se puede destacar que cumplen con repetibilidad. El valor de la duración del impacto es aproximadamente de 3 ms y el valor máximo de la fuerza de unos 2500 N.

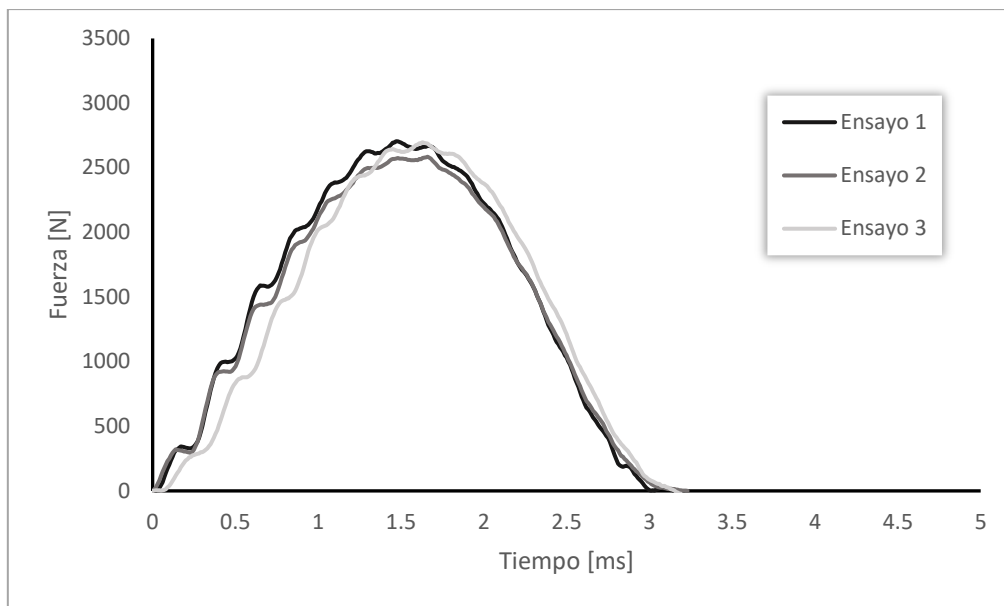


Figura 49 – Curvas F-t ensayo de compresión dinámica de la probeta PLA CN en dirección perpendicular.

La Figura 50 representa el ensayo de la probeta con núcleo donde la carga ha sido aplicada en la dirección paralela a las capas. En ella podemos ver que los ensayos dos y tres cumplen con repetibilidad cosa que no pasa con el primer ensayo que resulta tener un valor máximo ligeramente inferior al de los otros dos y una duración algo mayor. Los valores tanto de fuerza máxima como de tiempo resultan ser aproximados a los de los ensayos realizados al mismo espécimen en la dirección perpendicular.

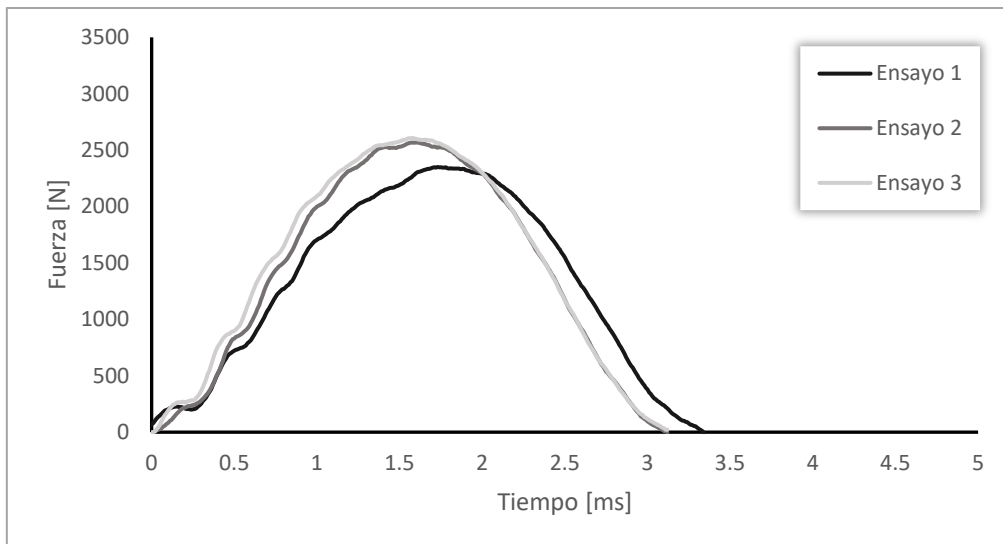


Figura 50 – Curvas F-t ensayos de compresión dinámica de la probeta PLA CN en dirección paralela.

La Figura 51 se representa el ensayo de la probeta sin núcleo donde la carga ha sido aplicada en la dirección perpendicular a las capas. En este caso la repetibilidad entre ensayos es total. Por otro lado, los valores de fuerza resultan ser algo inferiores a 2500 N y el tiempo cercano a los 3.5 ms. Esta diferencia de valores produce que la campana resulte ser ligeramente más achatada que los ensayos realizados a la probeta de PLA con núcleo.

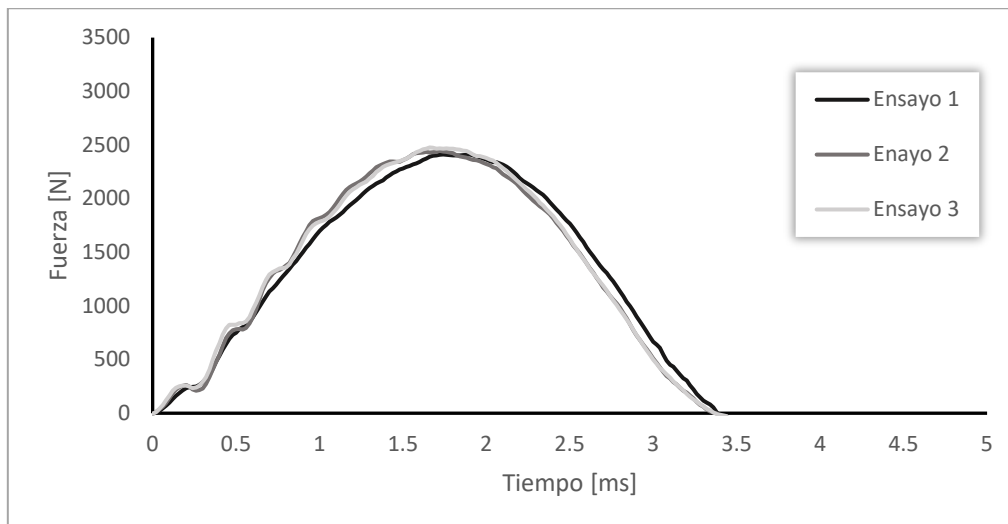


Figura 51 - Curvas F-t ensayos de compresión dinámica de la probeta PLA SN dirección perpendicular.

En la Figura 52 se expone el ensayo de la probeta sin núcleo donde la carga ha sido aplicada en la dirección paralela a las capas. Los ensayos realizados a este espécimen presentan valores de fuerza máxima y tiempo ligeramente diferentes por lo que se puede concluir que la repetibilidad de estos no es tan precisa como la de otras probetas. Dichos valores resultan ser escasamente inferiores a 2500 N para la fuerza máxima y de aproximadamente 3.5 ms para el valor de la duración del ensayo.

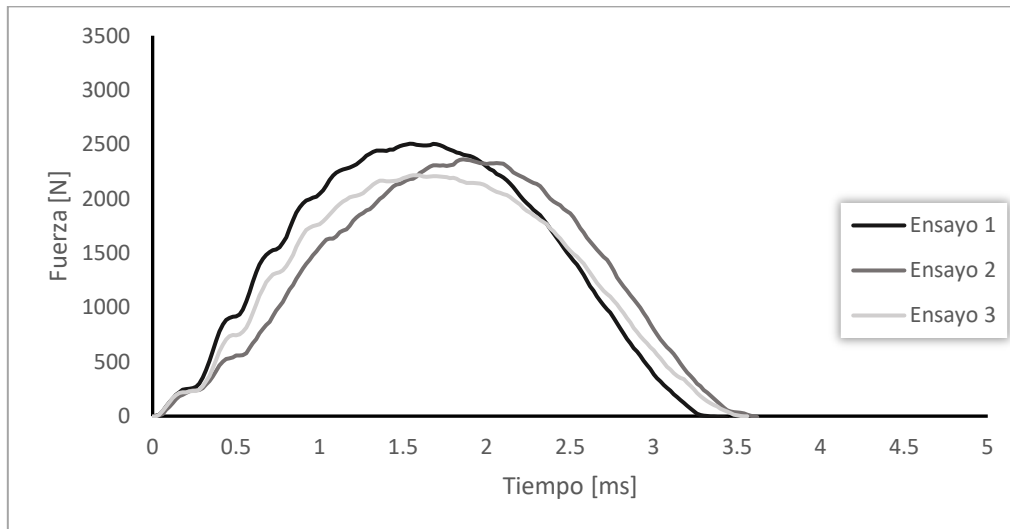


Figura 52 – Curvas F-t ensayos de compresión dinámica de la probeta PLA SN en dirección paralela.

A continuación, se adjunta la Figura 53 que representa el ensayo de la probeta de varillas con el impacto en la dirección perpendicular a las capas. En primer lugar, cabe destacar que existe una buena repetibilidad entre ensayos. Por otro lado, y a diferencia de los demás especímenes de este material, la duración de los ensayos es considerablemente mayor, la duración es de poco más de 4 ms. El valor de la fuerza máxima es similar a la de las probetas anteriores, de entre 2000 y 2500 N, es por ello por lo que la campana resulta ser más achatada.

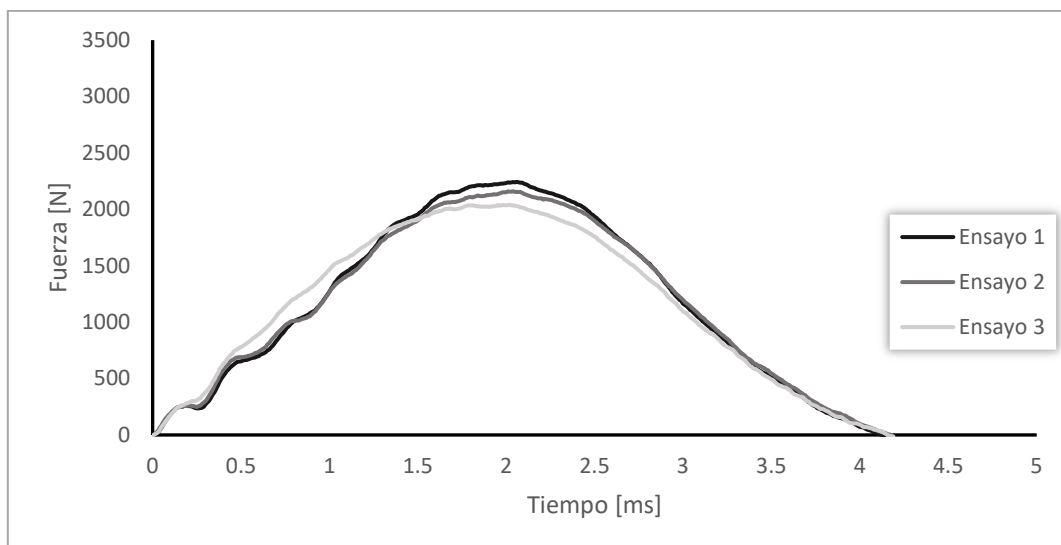


Figura 53 – Curva F-t ensayos de compresión dinámica de la probeta PLA VAR en dirección perpendicular.

En la Figura 54 se muestra el ensayo de la probeta de varillas con el impacto en la dirección paralela a las capas. Estos ensayos son similares a los realizados al mismo material en la dirección perpendicular, con la diferencia de que la repetibilidad resulta ser algo peor. Los valores de fuerza máxima en los ensayos 1 y 3 es de entre 2000 y 2500 N. Por otro lado, la duración del ensayo es de aproximadamente 5 ms, valor que resulta ser superior a la del resto de probetas.

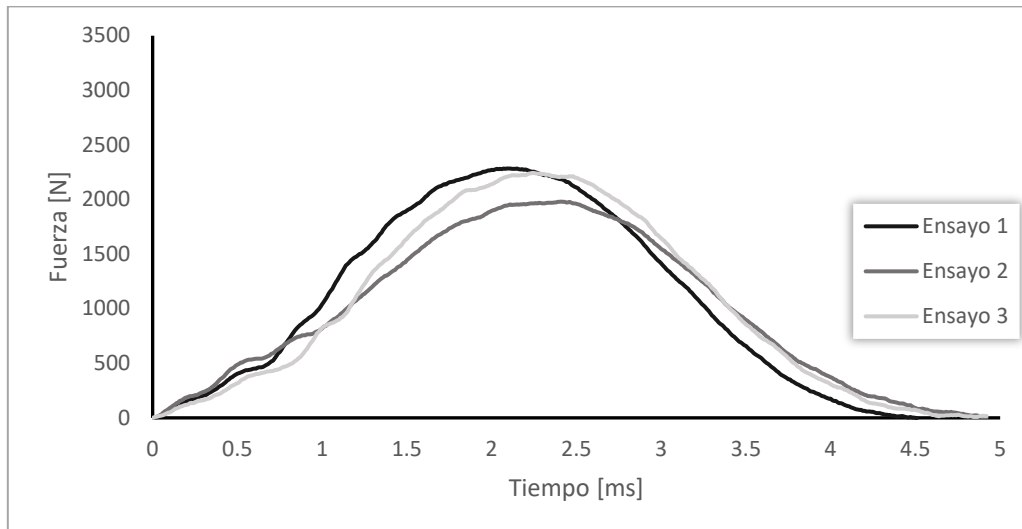


Figura 54 – Curvas F-t ensayos de compresión dinámica de la probeta PLA VAR en dirección paralela.

La Figura 55 representa el ensayo del espécimen con núcleo con aplicación del impacto en la dirección perpendicular a las capas. Este ensayo presenta una buena repetibilidad. Los valores de fuerza máxima resultan ser de unos 3000 N que son valores ligeramente superiores a los obtenidos en las probetas de PLA. Por otro lado, el valor de la duración de los ensayos es de entre 3 y 3.5 ms, valores que corresponden a los obtenidos en las probetas de PLA. Es por ello por lo que la curva resulta ser más vertical. Hay que destacar también que existe cierta asimetría en la misma ya que en el tiempo de aplicación de la carga es algo superior al de liberación de la misma.

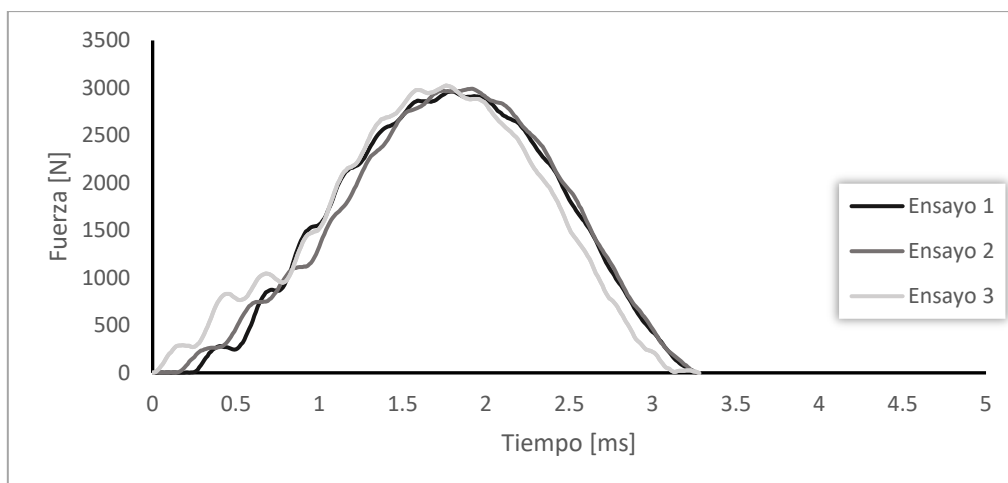


Figura 55 – Curvas F-t ensayos de compresión dinámica de la probeta HIPS CN en dirección perpendicular.

La Figura 56 representa el ensayo de la probeta con núcleo impactada en la dirección paralela a las capas. En ella se puede ver como la repetibilidad no es tan buena como en otros ensayos analizados anteriormente. Dicho valor de fuerza máxima es mayor que el de los ensayos anteriormente analizados, de casi 3500 N y la duración del impacto ligeramente menor, levemente superior a 2.5 ms. Es por ello por lo que las pendientes resultan ser mayores que las de los especímenes analizados con anterioridad e incluso superiores a los del mismo espécimen ensayado en la dirección perpendicular. Así mismo, en comparación con dicho ensayo, estos resultados muestran simetría mayor.

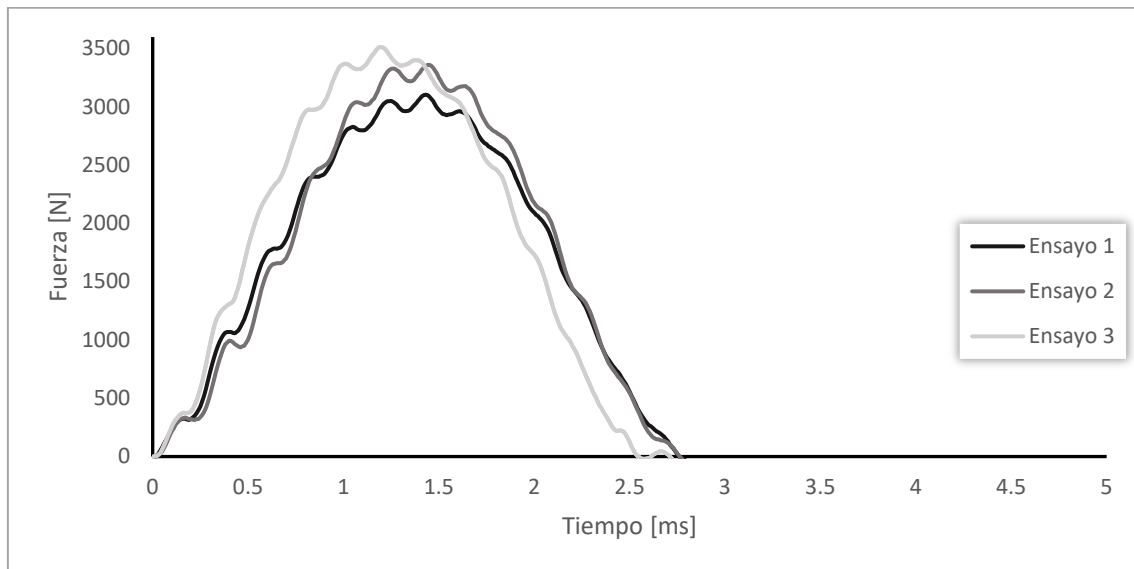


Figura 56 – Curvas F-t ensayos de compresión dinámica de la probeta HIPS CN en dirección paralela.

La Figura 57 representa el ensayo de la probeta sin núcleo realizado en la dirección perpendicular a las capas. Esta probeta cumple con repetibilidad entre ensayos. Los valores de fuerza resultan ser ligeramente inferiores a los obtenidos en los especímenes anteriores y similares a los obtenidos en los ensayos de PLA en los que dicho valor ronda los 2500 N. El valor de la duración del impacto también resulta ser similar al obtenido en los ensayos de las probetas de PLA en las que se han obtenido unos valores de entre 3 y 3.5 ms.

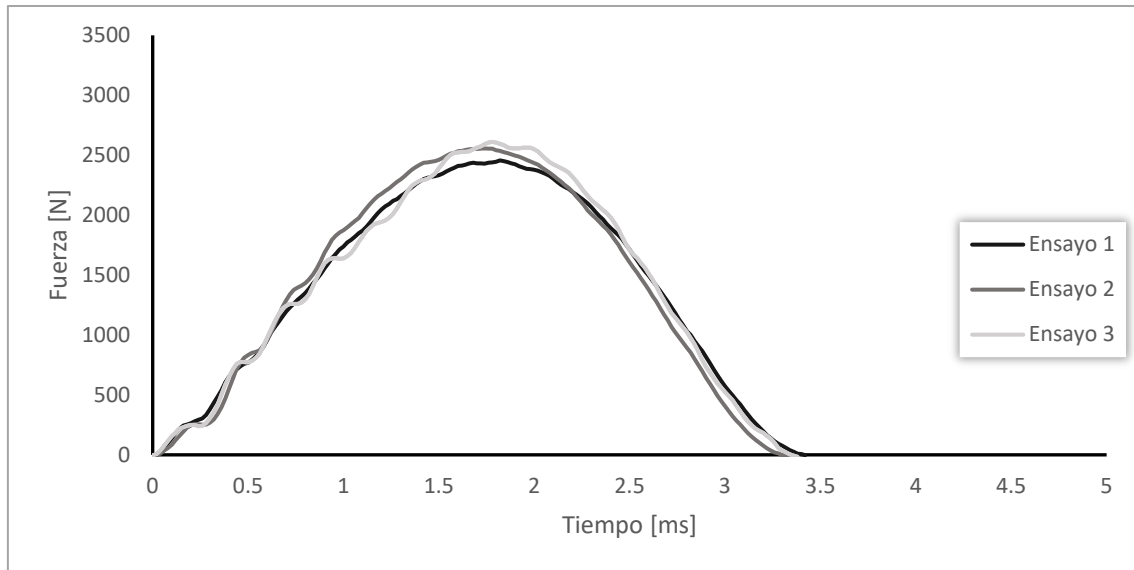


Figura 57 – Curvas F-t ensayos de compresión dinámica de la probeta HIPS SN en dirección perpendicular.

En la Figura 58 se expone el ensayo de la probeta sin núcleo realizado en la dirección paralela a las capas. Tanto la repetibilidad como los valores de fuerza máxima y duración del ensayo son similares a las del mismo espécimen ensayado en la dirección perpendicular. Dichos valores son de aproximadamente 2500 N de fuerza pico y de 3.5 ms de duración.

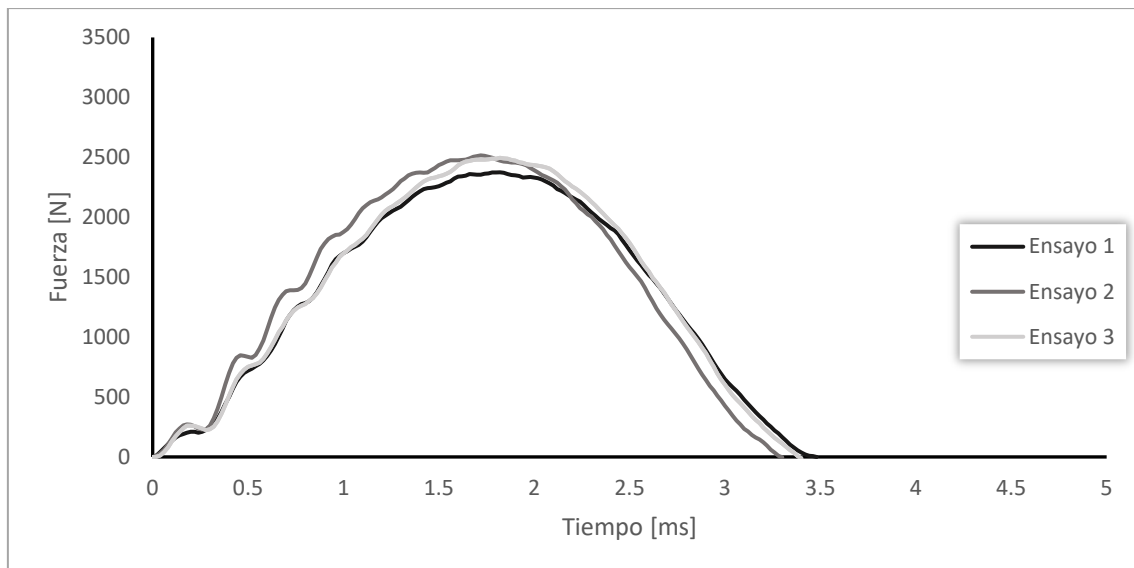


Figura 58 – Curvas F-t ensayos de compresión dinámica de la probeta HIPS SN en dirección paralela.

La Figura 59 representa el ensayo de la probeta de varillas realizado en la dirección perpendicular a las capas. Hay que destacar que el ensayo 3 es ligeramente diferente al resto debido a que la pendiente en el momento de aplicación de la carga es menor que la que tienen el resto de los ensayos. En este caso, al igual que sucede para el mismo espécimen en PLA, los valores de fuerza pico se ven reducidos a unos 2000 N y los de la duración del ensayo incrementan algo más de un milisegundo con respecto a los ensayos realizados al resto de especímenes.

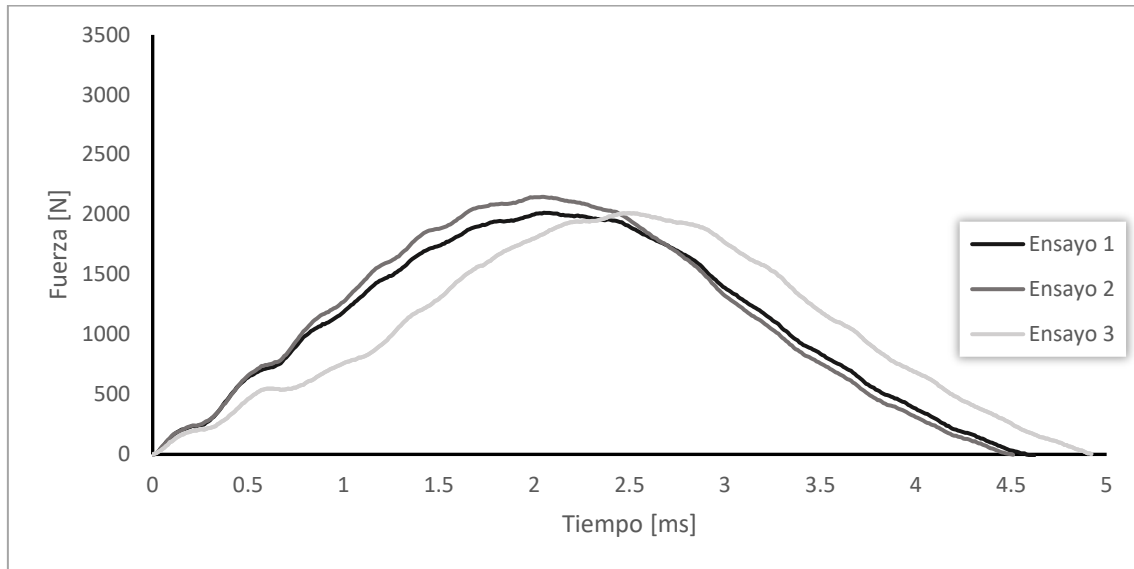


Figura 59 – Curvas F-t ensayos de compresión dinámica de la probeta HIPS VAR en dirección perpendicular.

En la Figura 60 se muestra el ensayo de la probeta de varillas impactada en la dirección paralela a las capas. Esta figura tiene las mismas características que la anterior con la diferencia de que la repetibilidad resulta ser mejor.

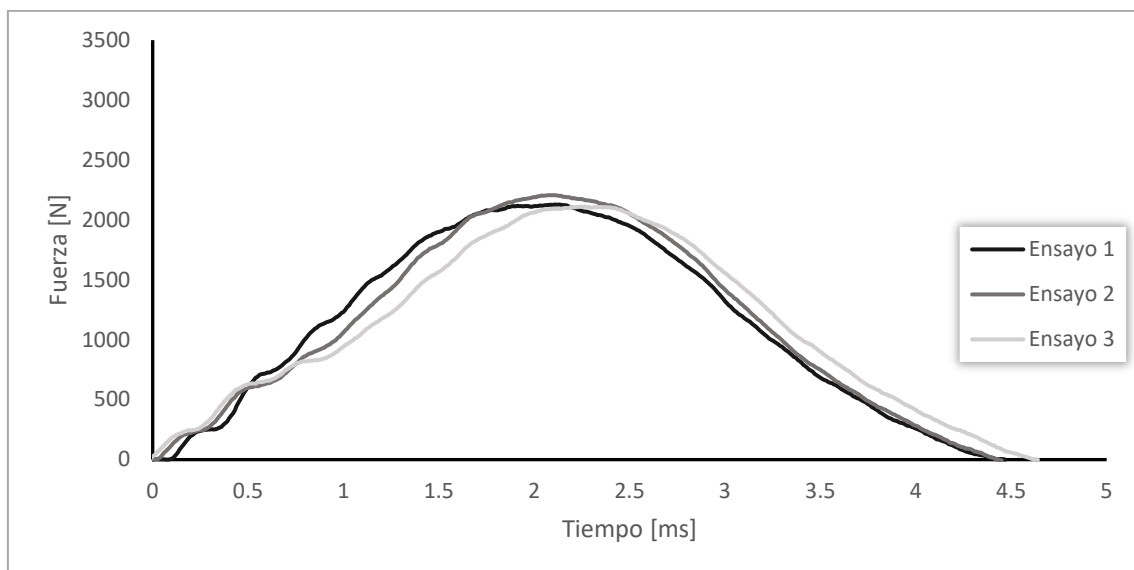


Figura 60 – Curvas F-t ensayos de compresión dinámica de la probeta HIPS VAR en dirección paralela.

La Figura 61 representa el ensayo de la probeta con núcleo ensayada en la dirección perpendicular a las capas. En ella vemos que la repetibilidad de los ensayos es considerablemente buena.

Los valores de la fuerza pico, como se ha mencionado anteriormente, son muy inferiores a los obtenidos en los especímenes de PLA y HIPS, del orden de entre 600 y 700 N, y la duración del ensayo muy superior a los mencionados, del orden de 16 ms.

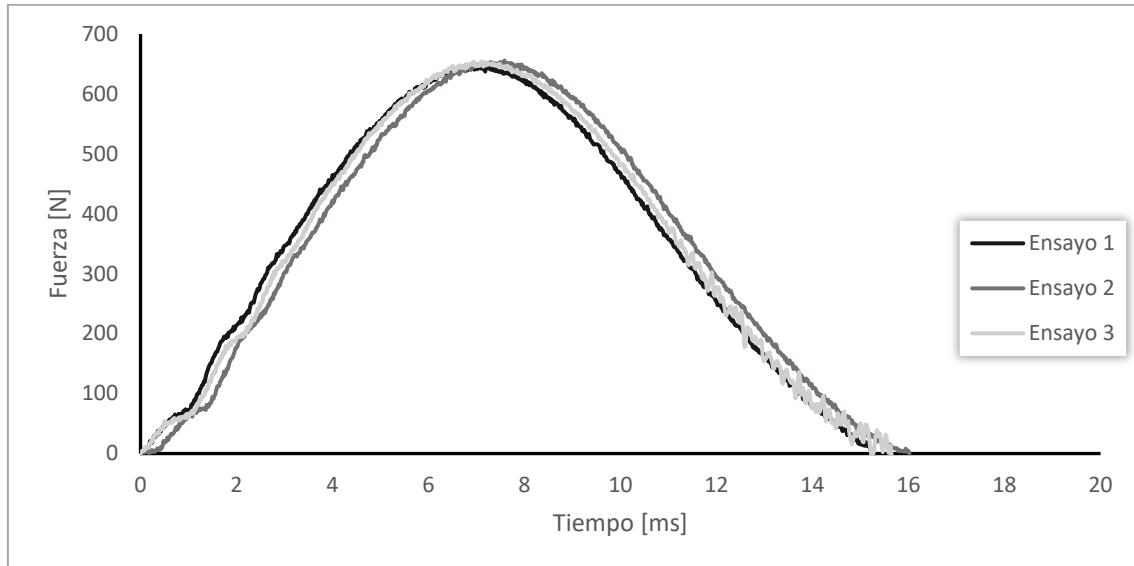


Figura 61 – Curvas F-t ensayos de compresión dinámica de la probeta Filaflex CN en dirección perpendicular.

La Figura 62 representa el ensayo de la probeta con núcleo impactada en la dirección paralela a las capas. Ésta tiene unas características prácticamente idénticas a la anterior tanto en la repetibilidad como la ausencia de ondulaciones y en los valores que se obtienen de la misma.

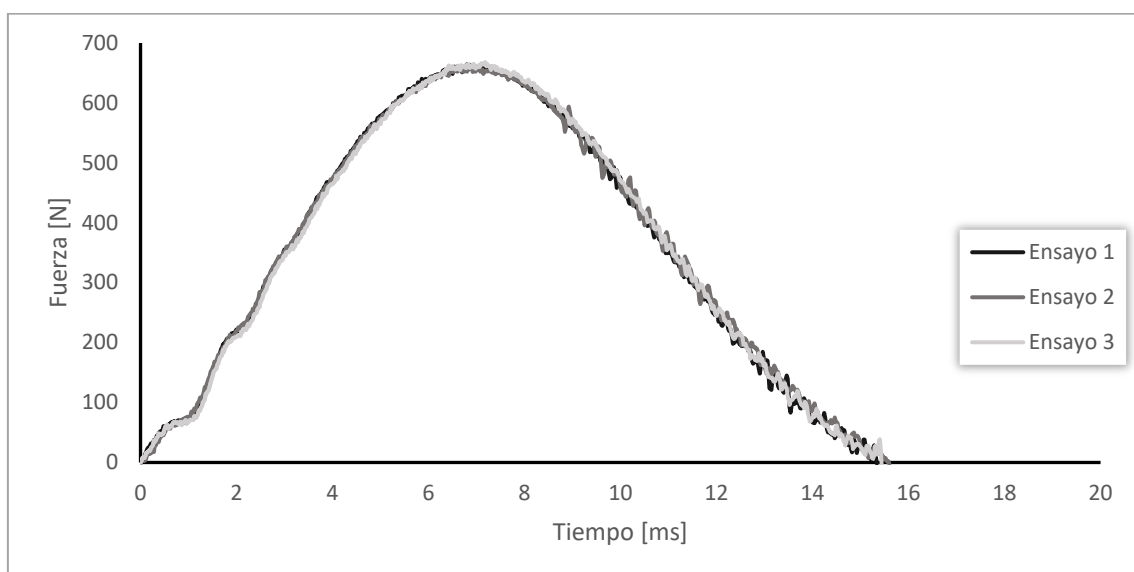


Figura 62 – Curvas F-t ensayos de compresión dinámica de la probeta Filaflex CN en dirección paralela.

La Figura 63 representa el ensayo de la probeta sin núcleo impactada en la dirección perpendicular a las capas. Este espécimen también tiene una buena repetibilidad. Se puede apreciar cierta ondulación al inicio de los tres ensayos.

Los valores de la fuerza pico es inferior a los anteriores del orden de 600 N y la duración es aproximadamente dos milisegundos superior a los anteriores.

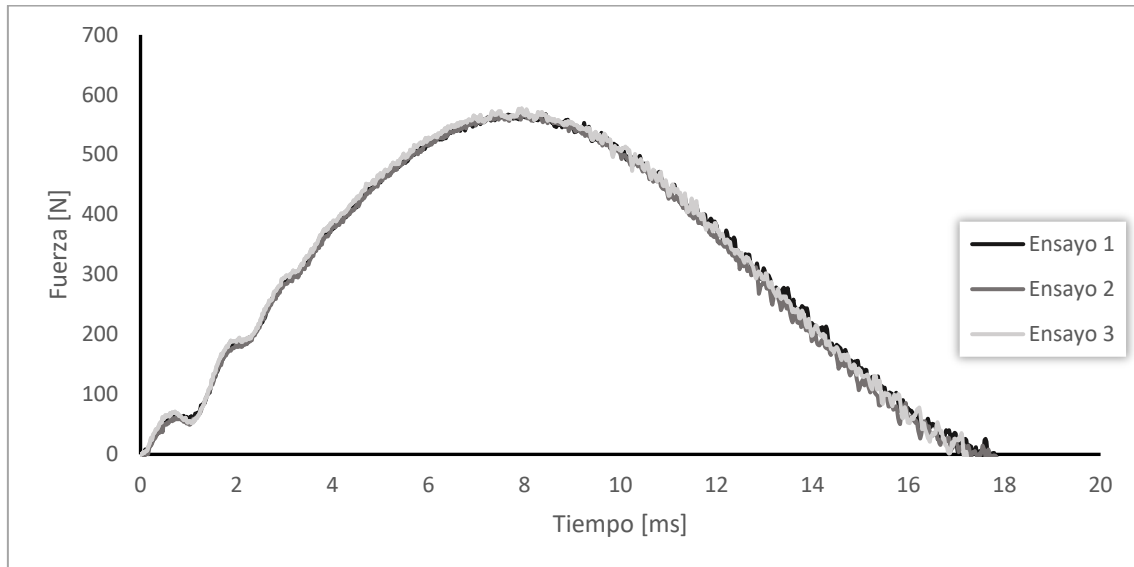


Figura 63 – Curvas F-t ensayos de compresión dinámica de la probeta Filaflex SN en dirección perpendicular.

En la Figura 64 se expone el ensayo de la probeta sin núcleo con aplicación del impacto en la dirección paralela a las capas. Los resultados obtenidos en los tres ensayos distan significativamente del mismo espécimen ensayado en la dirección perpendicular. El valor de la fuerza pico se ve reducido hasta los 400 N y la duración incrementa hasta llegar prácticamente a los 20 ms.

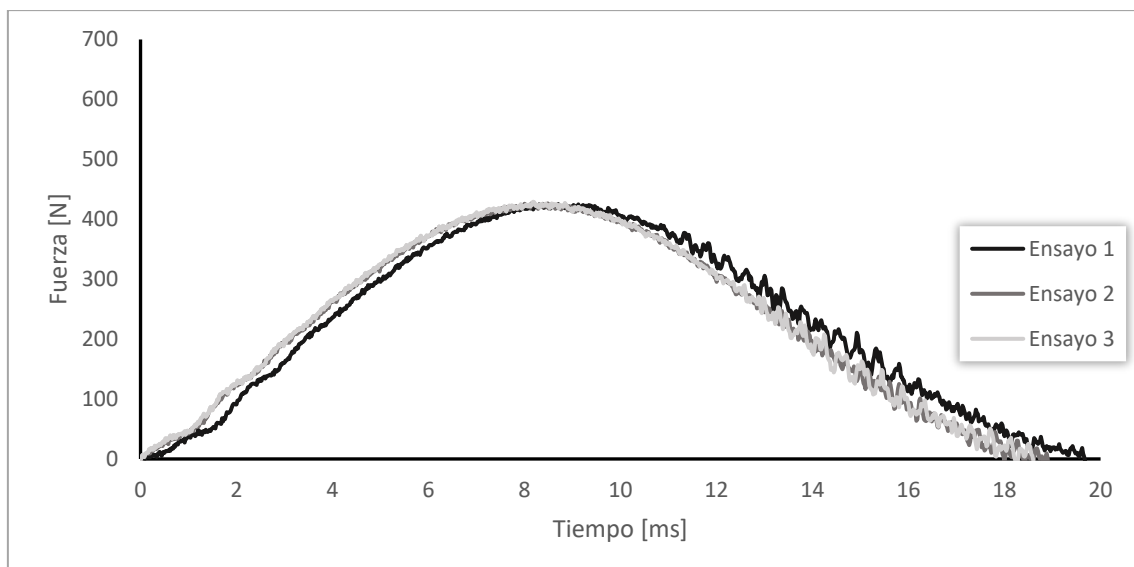


Figura 64 – Curvas F-t ensayos de compresión dinámica de la probeta Filaflex SN en dirección paralela.

La Figura 65 representa el ensayo de la probeta de varillas con aplicación del impacto en la dirección perpendicular a las capas. A diferencia de los especímenes de varillas

obtenidos en PLA y HIPS, para la probeta fabricada mediante Filaflex, los valores de fuerza máxima y duración del impacto no sufren variaciones tan destacadas. Dichos valores son de entre 700 y 600 N para la fuerza y de 18 ms para la duración.

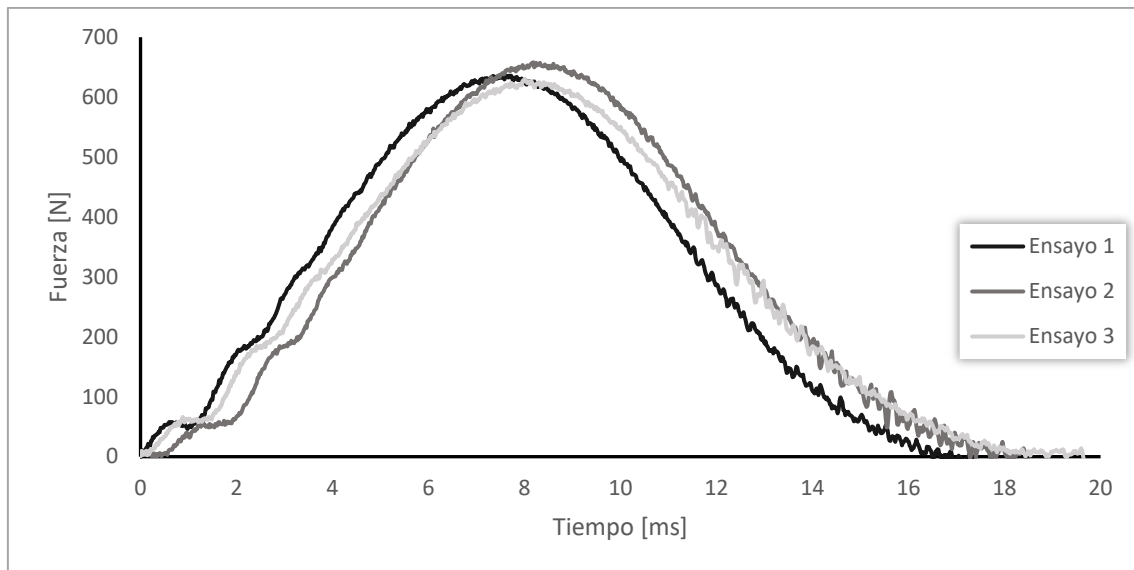


Figura 65 – Curvas F-t ensayos de compresión dinámica de la probeta Filaflex VAR en dirección perpendicular.

En la Figura 66 se muestra el ensayo de la probeta de varillas con aplicación del impacto en la dirección paralela a las capas. Se puede apreciar como existe diferencia de este ensayo con el ensayado en la dirección perpendicular. El valor de la fuerza pico se ve reducido a un valor ligeramente inferior a los 600 N y la duración del ensayo incrementa hasta los 20 ms.

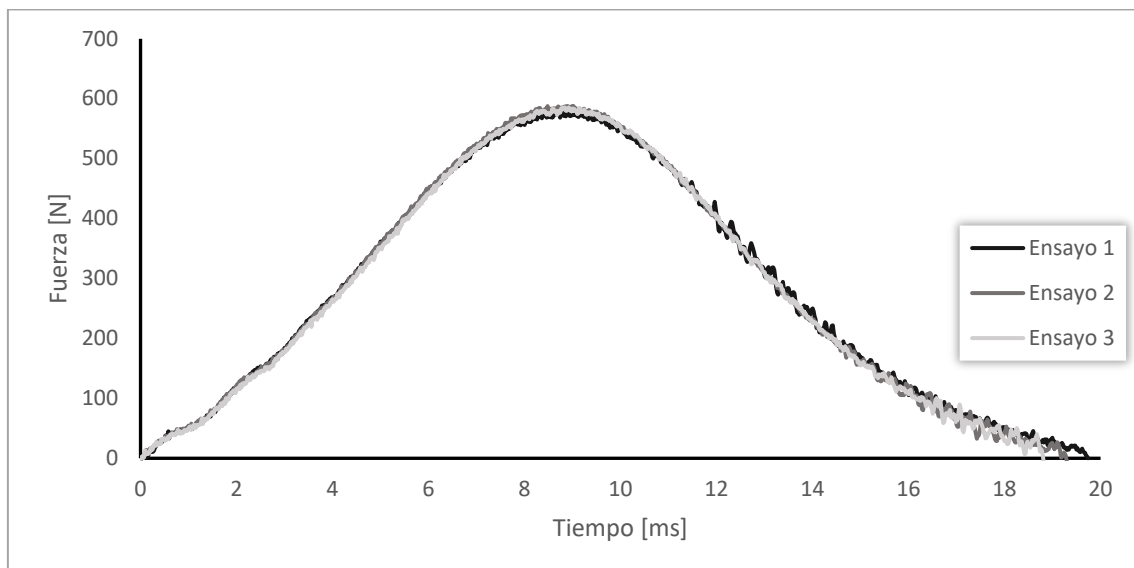


Figura 66 – Curvas F-t ensayos de compresión dinámica de la probeta Filaflex VAR en dirección paralela.

Gráficas energía frente al tiempo

La Figura 67 representa el ensayo de la probeta con núcleo ensayada en la dirección perpendicular a las capas. En ella se puede ver que el valor máximo de la energía es de aproximadamente 2 J y el valor absorbido de la misma de poco más de 1.5 J.

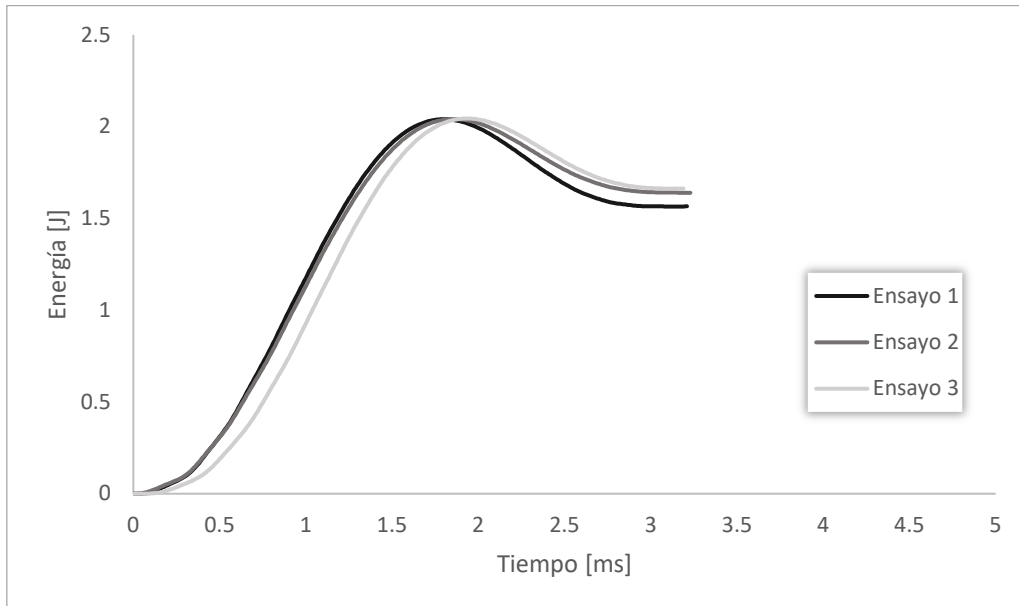


Figura 67 - Curvas E-t ensayos de compresión dinámica de la probeta PLA CN en dirección perpendicular.

La Figura 68 representa el ensayo de la probeta con núcleo ensayada en la dirección paralela a las capas. En dicha figura se puede observar que el valor máximo de la energía es de aproximadamente 2 J y valor de la energía absorbida de entre 1.5 J y 2 J.

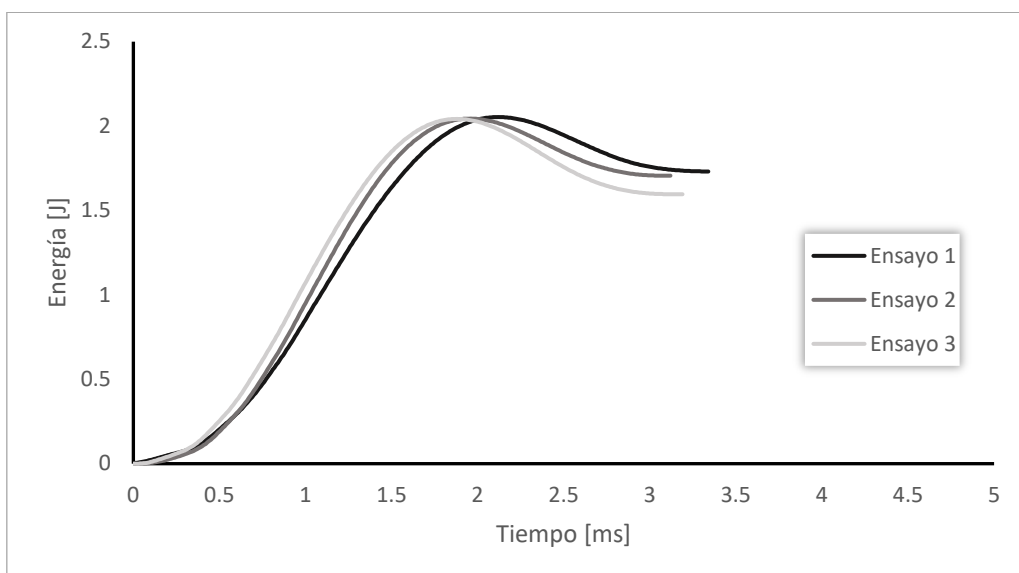


Figura 68 - Curvas E-t ensayos de compresión dinámica de la probeta PLA CN en dirección paralela.

La Figura 69 representa el ensayo de la probeta sin núcleo ensayada en la dirección perpendicular a las capas. En este ensayo se puede apreciar una repetibilidad prácticamente perfecta. Los valores de energía son muy similares a los obtenidos para el espécimen con núcleo.

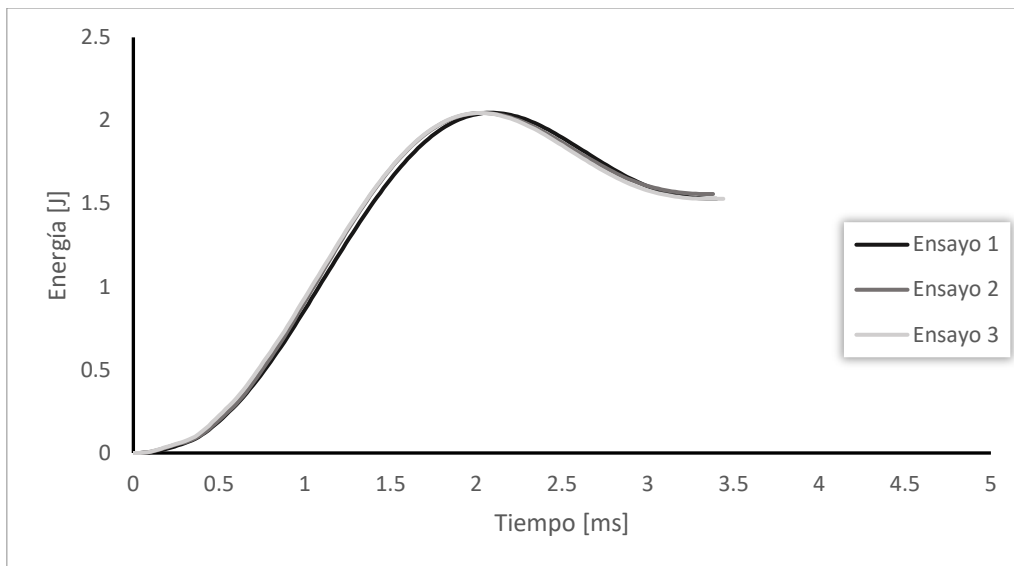


Figura 69 - Curvas E-t ensayos de compresión dinámica de la probeta PLA SN en dirección perpendicular.

En la Figura 70 se expone el ensayo de la probeta sin núcleo ensayada en la dirección paralela a las capas. Destaca de esta gráfica que la repetibilidad no es tan buena como en los ensayos realizados a otros especímenes. De todas formas, los valores de interés entre un ensayo y otro son muy similares. Los valores de energía máxima y absorbida son de 2 J y superiores a 1.5 J respectivamente.

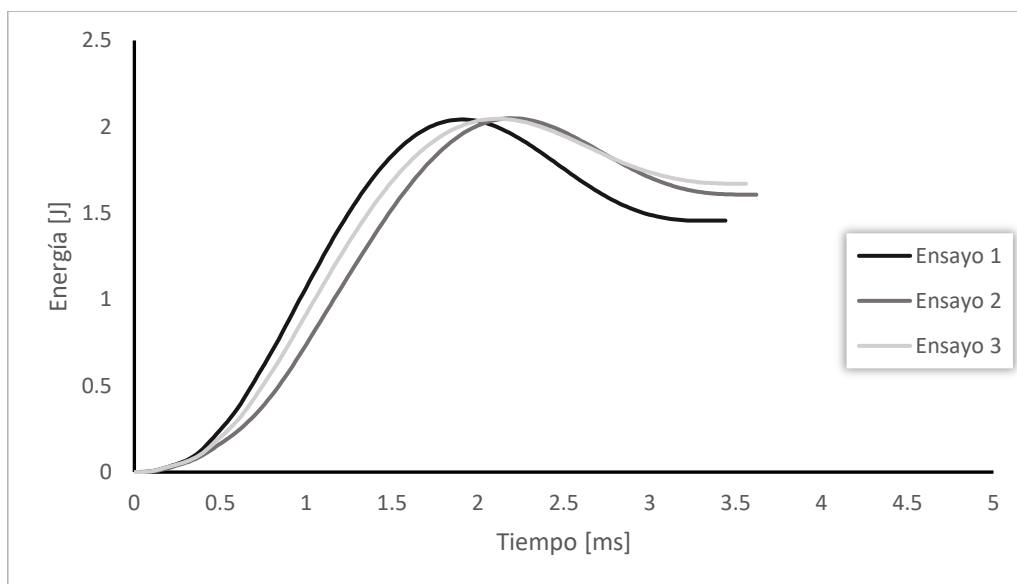


Figura 70 - Curvas E-t ensayos de compresión dinámica de la probeta PLA SN en dirección paralela.

La Figura 71 representa el ensayo de la probeta de varillas ensayada en la dirección perpendicular a las capas. En él se puede apreciar que la repetibilidad del ensayo es considerablemente buena. A su vez, los valores obtenidos para la energía son similares a los obtenidos en los ensayos anteriores.

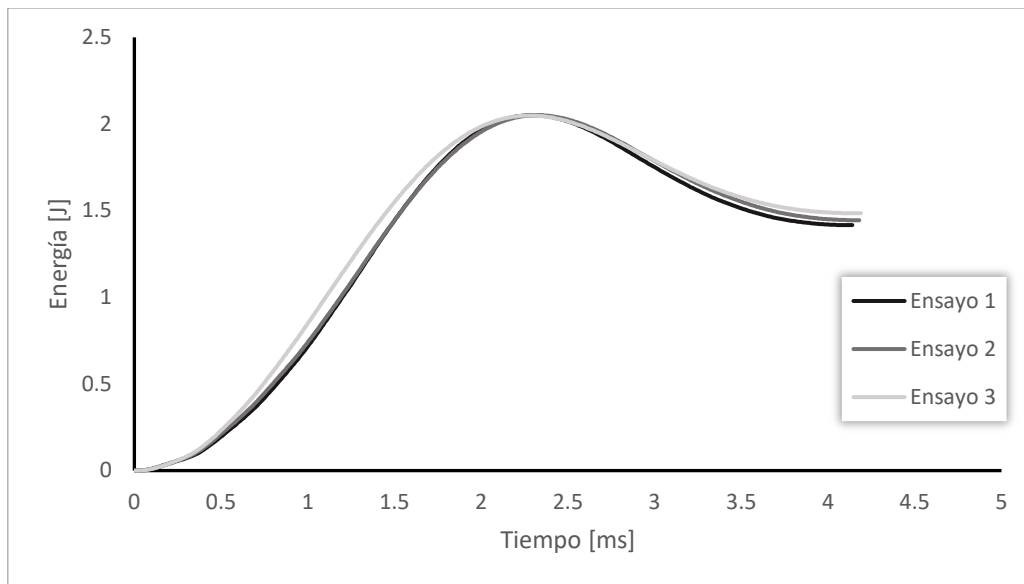


Figura 71 - Curvas E-t ensayos de compresión dinámica de la probeta PLA VAR en dirección perpendicular.

En la Figura 72 se muestra el ensayo de la probeta de varillas ensayada en la dirección paralela a las capas. Pese a que los valores de energía sean semejantes a los obtenidos en los ensayos anteriores, destaca la disparidad que existe entre ensayos debida a la duración del impacto.

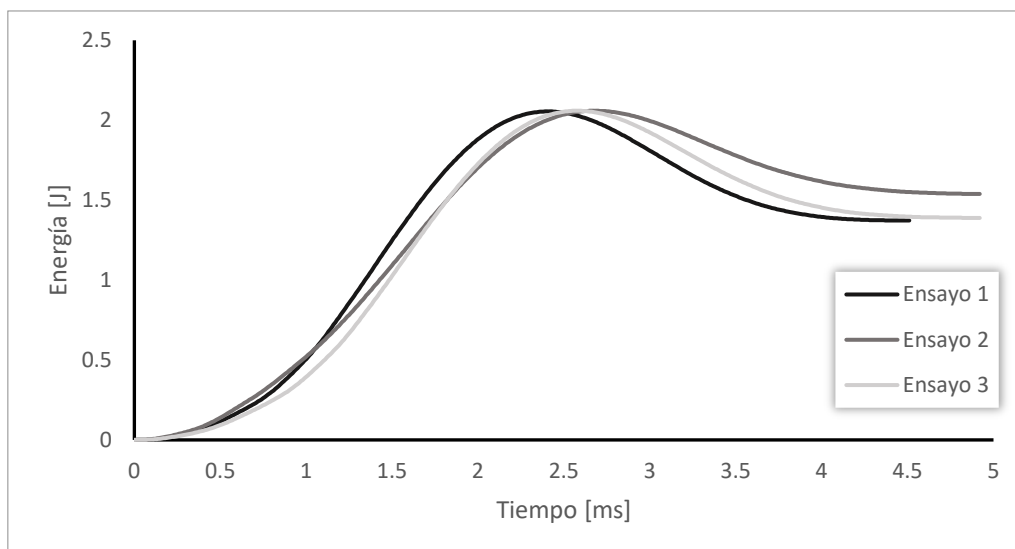


Figura 72 - Curvas E-t ensayos de compresión dinámica de la probeta PLA VAR en dirección paralela.

La Figura 73 representa el ensayo de la probeta con núcleo ensayada en la dirección perpendicular a las capas. Se observa que los valores de interés para esta probeta son los mismos que los obtenidos para el ensayo realizado al mismo espécimen fabricado con PLA.

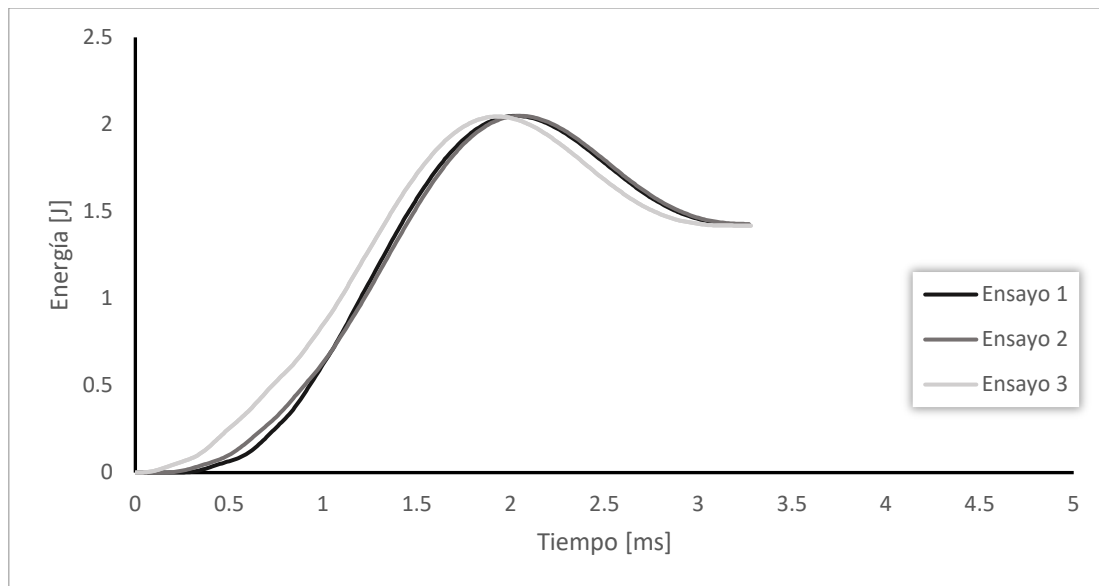


Figura 73 - Curvas E-t ensayos de compresión dinámica de la probeta HIPS CN en dirección perpendicular.

La Figura 74 representa el ensayo de la probeta con núcleo ensayada en la dirección paralela a las capas. Se puede apreciar que el ensayo 3 difiere ligeramente del resto. A su vez, los valores de energía son similares a los del ensayo realizado al mismo espécimen en la dirección perpendicular.

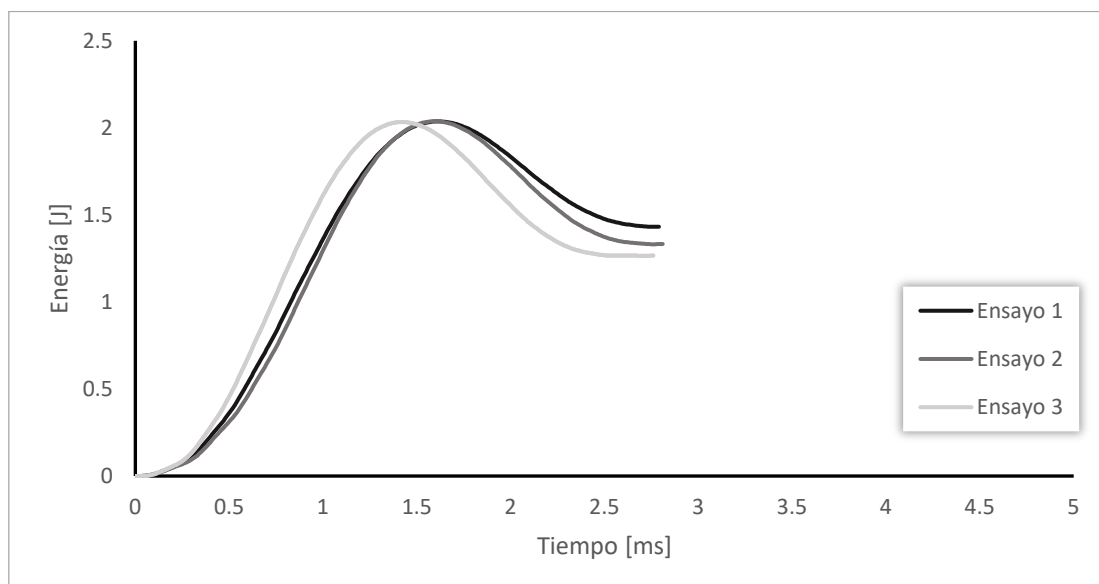


Figura 74 - Curvas E-t ensayos de compresión dinámica de la probeta HIPS CN en dirección paralela.

La Figura 75 representa el ensayo de la probeta sin núcleo ensayada en la dirección perpendicular a las capas. Destaca la buena repetibilidad de los ensayos.

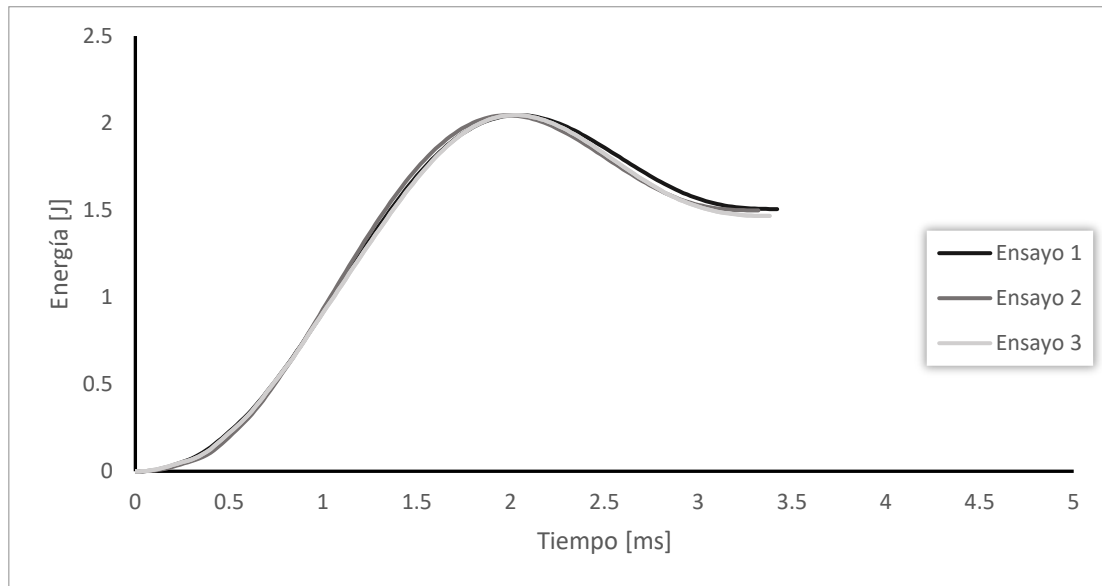


Figura 75 - Curvas E-t ensayos de compresión dinámica de la probeta HIPS SN en dirección perpendicular.

En la Figura 76 se expone el ensayo de la probeta sin núcleo ensayada en la dirección paralela a las capas. Se puede concluir que los valores obtenidos se asemejan mucho a los obtenidos para el mismo espécimen ensayado en la dirección perpendicular a las capas pese a que la repetibilidad de los ensayos es ligeramente menor.

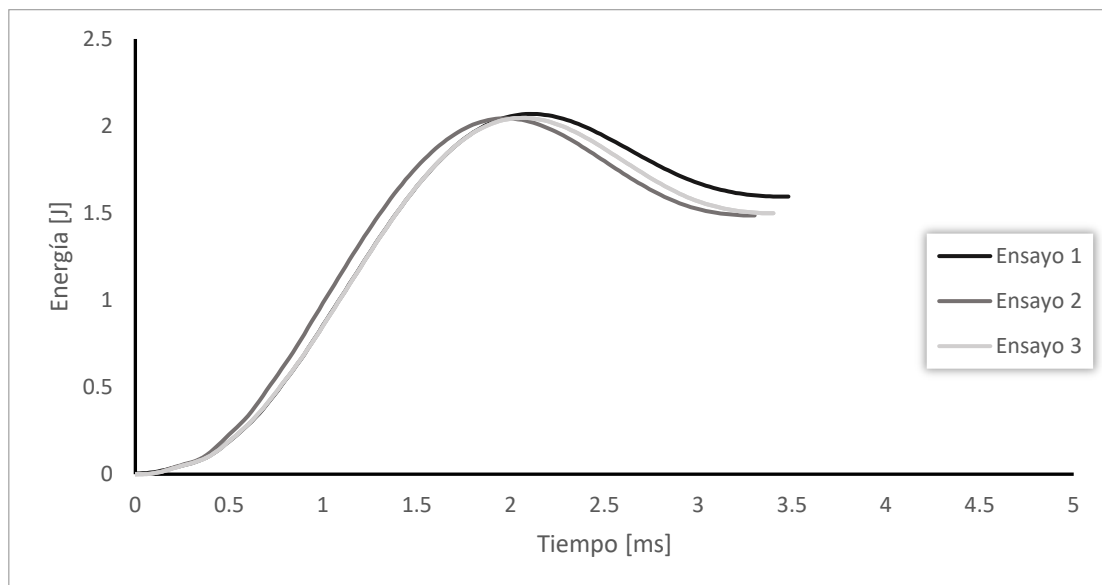


Figura 76 - Curvas E-t ensayos de compresión dinámica de la probeta HIPS SN en dirección paralela.

La Figura 77 representa el ensayo de la probeta de varillas ensayada en la dirección perpendicular a las capas. Destaca la diferencia entre el ensayo 3 y el resto, pese a eso, los valores de energía coinciden entre ensayos.

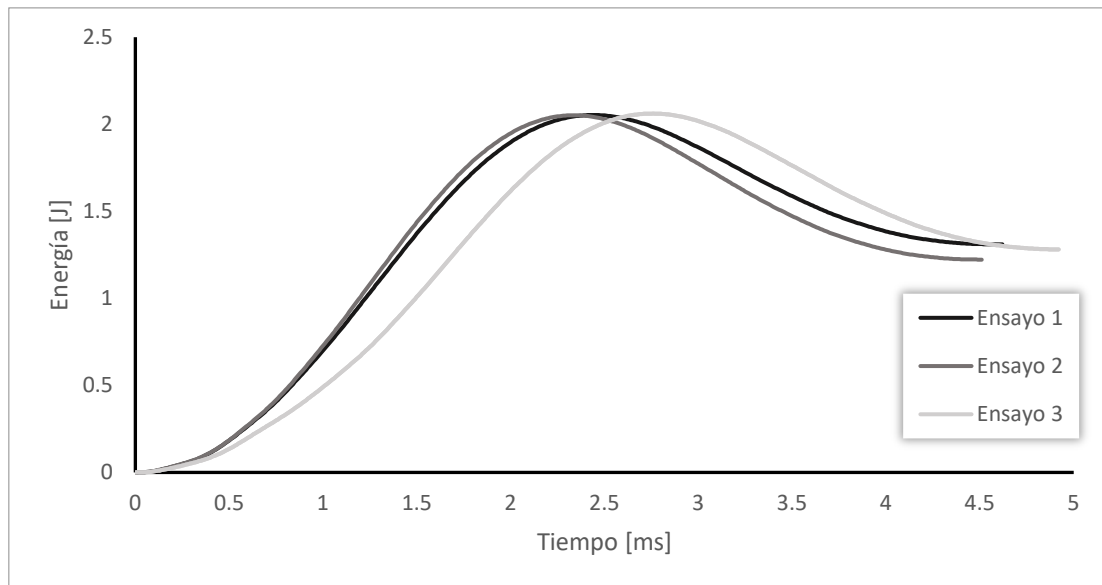


Figura 77 - Curvas E-t ensayos de compresión dinámica de la probeta HIPS VAR en dirección perpendicular.

En la Figura 78 se muestra el ensayo de la probeta de varillas ensayado en la dirección paralela a las capas. A diferencia de los ensayos realizados en la dirección perpendicular a las capas, en este caso, la repetibilidad es buena. Por otro lado, los valores de energía son los mismos que los obtenidos en los ensayos realizados en la dirección perpendicular a las capas de impresión.

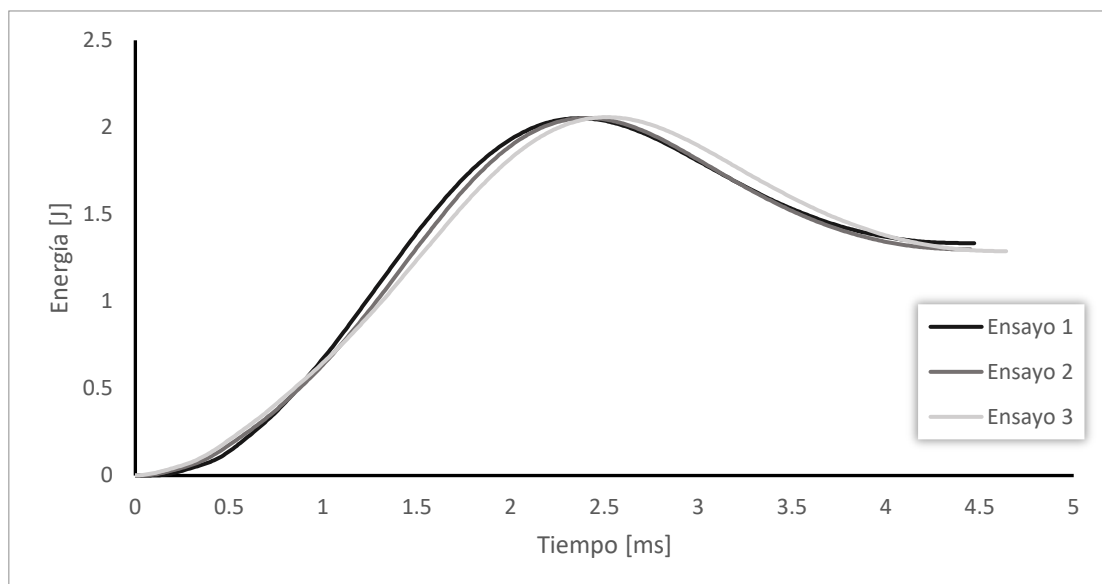


Figura 78 - Curvas E-t ensayos de compresión dinámica de la probeta HIPS VAR en dirección paralela.

La Figura 79 representa el ensayo de la probeta con núcleo ensayado en la dirección perpendicular a las capas. En ella se puede ver como el valor de la energía máxima se ve incrementado ligeramente y el valor de la energía absorbida resulta ser inferior en comparación con los materiales anteriormente ensayados.

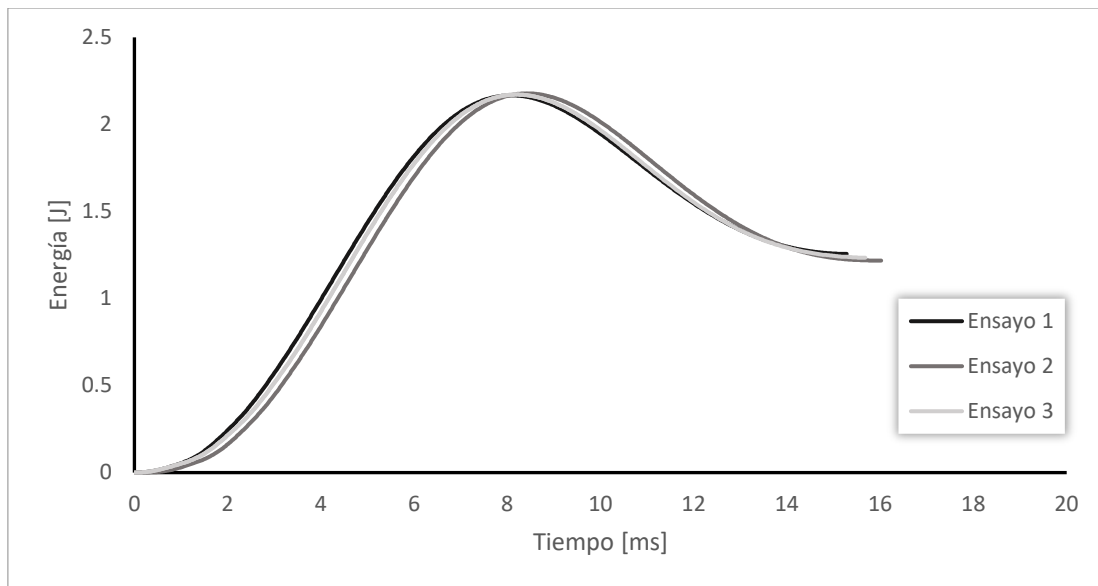


Figura 79 - Curvas E-t ensayos de compresión dinámica de la probeta Filaflex CN en dirección perpendicular.

La Figura 80 siguiente representa el ensayo de la probeta con núcleo ensayada en la dirección paralela a las capas. Estos ensayos cumplen con una muy buena repetibilidad. Por otro lado, los valores de interés coinciden con los obtenidos para el mismo espécimen ensayado en la dirección paralela a las capas.

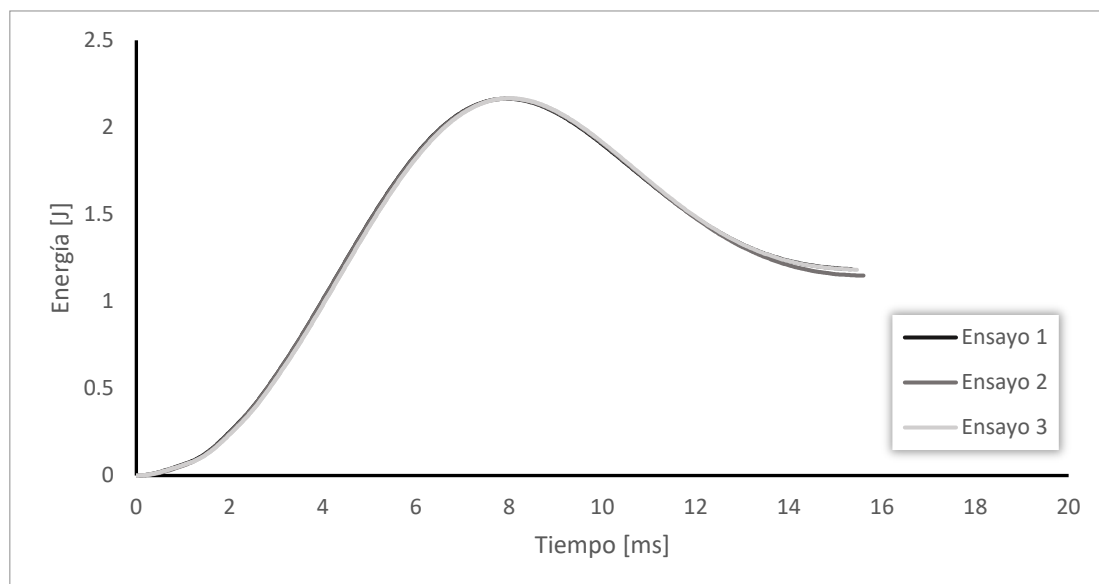


Figura 80 - Curvas E-t ensayos de compresión dinámica de la probeta Filaflex CN en dirección paralela.

La Figura 81 representa el ensayo de la probeta sin núcleo ensayada en la dirección perpendicular a las capas. Se puede apreciar que la repetibilidad es considerablemente buena, los valores de energía son también los obtenidos en los ensayos anteriores.

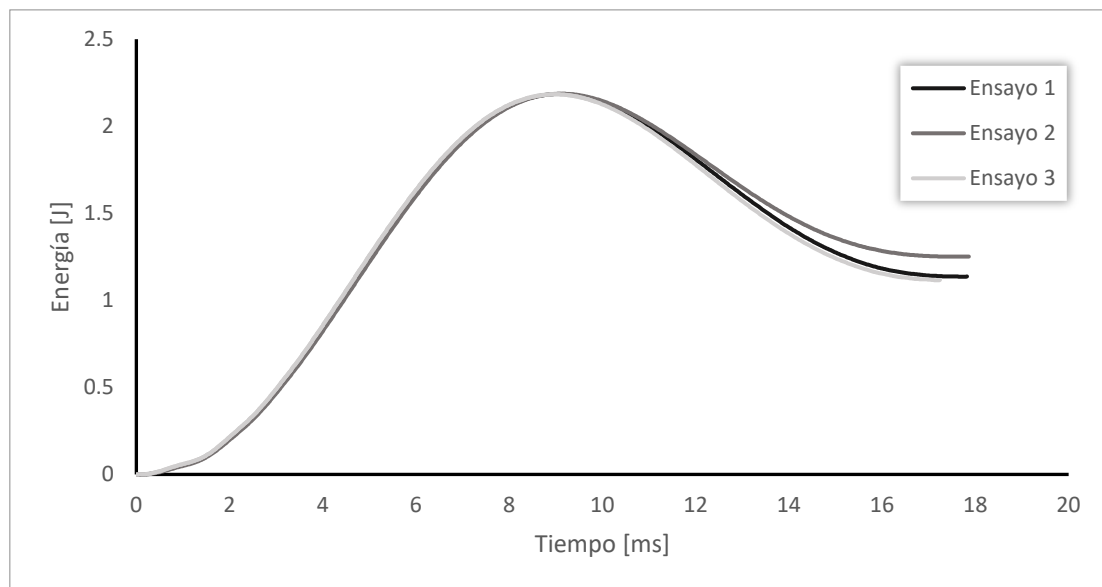


Figura 81 - Curvas E-t ensayos de compresión dinámica de la probeta Filaflex SN en dirección Perpendicular.

En la Figura 82 se expone el ensayo de la probeta sin núcleo ensayada en la dirección paralela a las capas. Resalta con respecto al resto de los ensayos que la curva es más plana, esto se debe a que los valores de energía máxima y absorbida son inferiores, concretamente de entre 1 J y 1.5 J de energía máxima y de entre 0.5 J y 1 J de energía final.

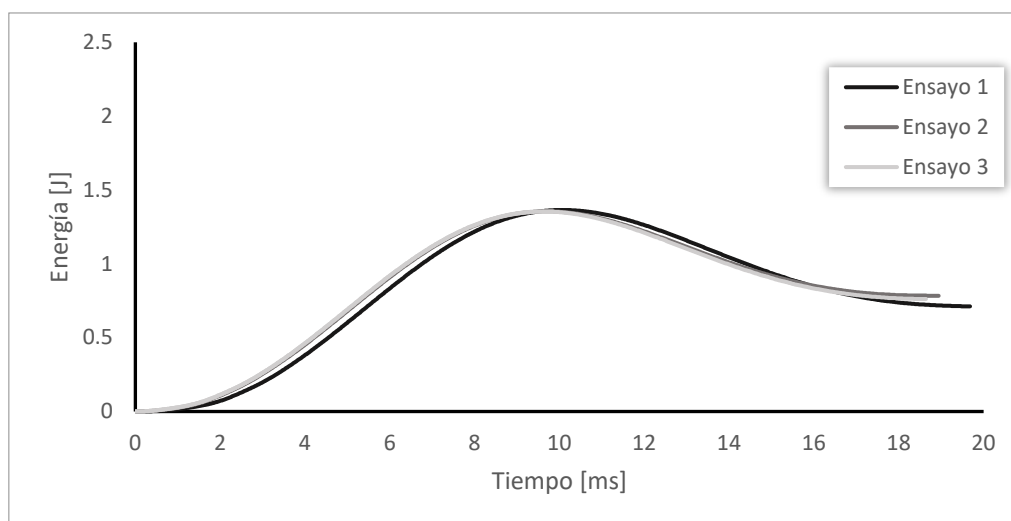


Figura 82 - Curvas E-t ensayos de compresión dinámica de la probeta Filaflex SN en dirección paralela.

La Figura 83 representa el ensayo de la probeta de varillas ensayada en la dirección perpendicular a las capas. La repetibilidad en este caso no resulta ser tan buena como en especímenes ensayados anteriormente. Por otro lado, los valores de energía resultan ser otra vez similares a los obtenidos en las probetas fabricadas mediante este material.

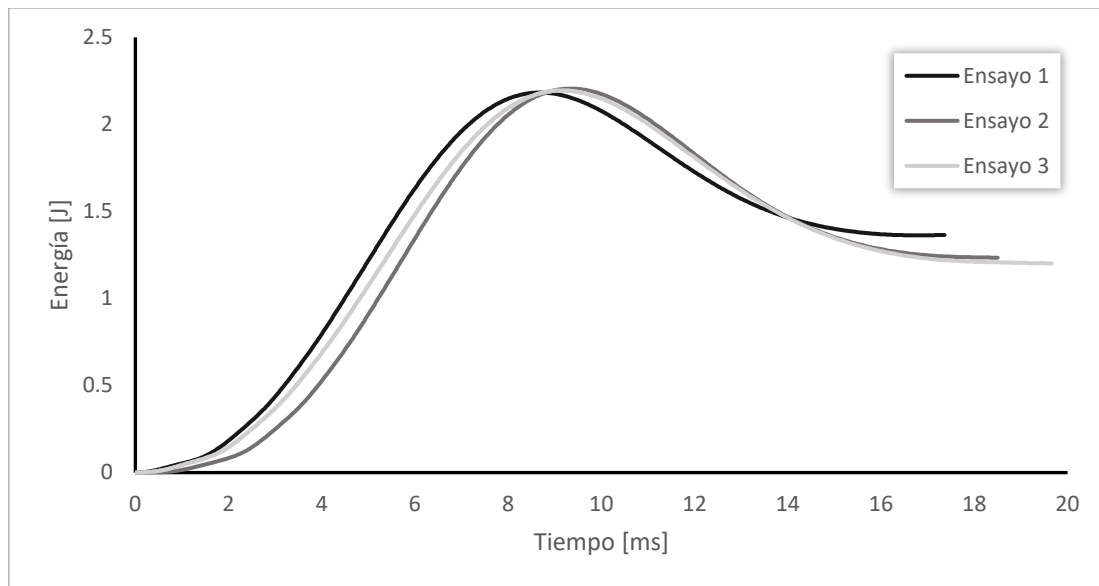


Figura 83 - Curvas E-t ensayos de compresión dinámica de la probeta Filaflex VAR en dirección perpendicular.

En la Figura 84 se muestra el ensayo de la probeta de varillas ensayado en la dirección paralela a las capas. En ella se puede apreciar la buena repetibilidad del ensayo. A su vez se puede ver como el valor de la energía máxima parece mantenerse en el valor obtenido en los ensayos anteriores, aunque el valor de la energía absorbida parece ser ligeramente mayor que en los mismos.

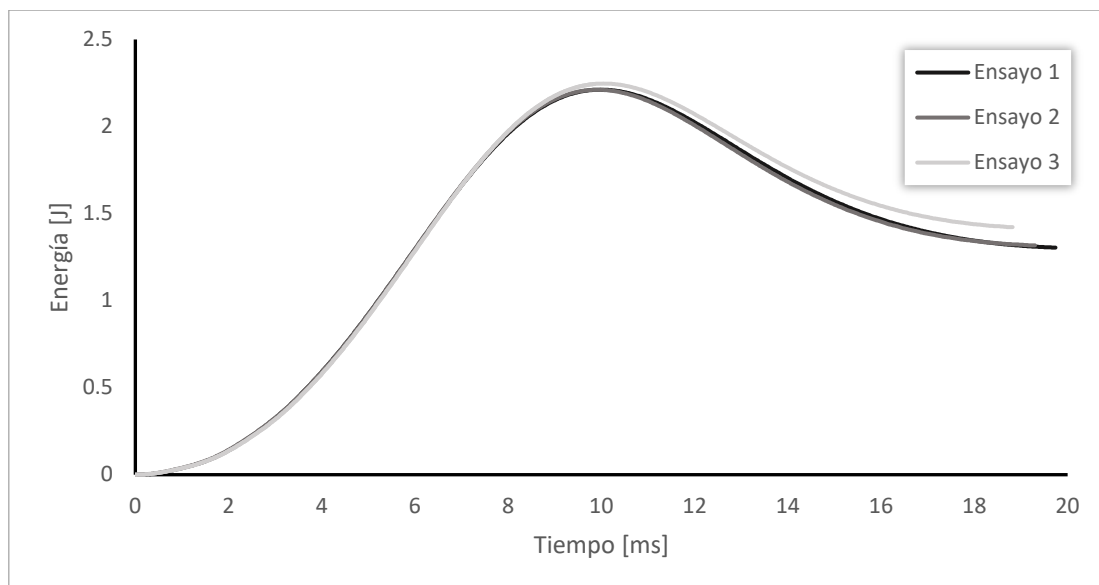


Figura 84 - Curvas E-t ensayos de compresión dinámica de la probeta Filaflex VAR en dirección paralela.

Anexo III: Ensayos estáticos de compresión hasta rotura

A continuación, se adjuntan las gráficas que representan las curvas de fuerza frente a desplazamiento de los ensayos estáticos de compresión hasta rotura de cada una de las probetas ensayadas. En la Figura 85 se representan las curvas de los ensayos estáticos de compresión hasta rotura de las probetas fabricadas mediante PLA. En ella se puede ver como el espécimen obtenido de varillas es el que rompe con menor desplazamiento, aunque es la probeta con núcleo la que rompe al aplicarle una fuerza menor. Por otro lado, el espécimen sin núcleo es el que rompe a mayor fuerza y desplazamiento.

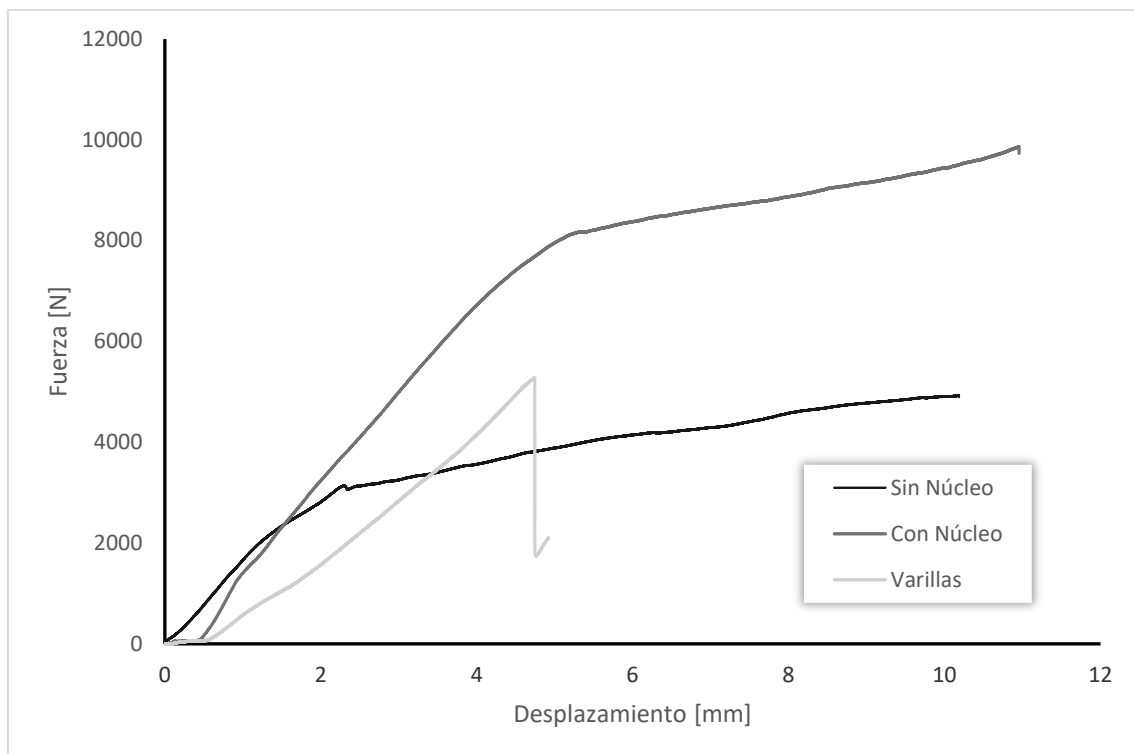


Figura 85 - Curvas F-D ensayos estáticos de compresión hasta rotura PLA.

La Figura 86 se representan las curvas de los ensayos estáticos de compresión hasta rotura de las probetas fabricadas mediante HIPS. En ella se puede ver cómo, al contrario que en las probetas fabricadas mediante PLA, el espécimen obtenido con núcleo es el que rompe con menor desplazamiento, aunque es la probeta de varillas la que rompe al aplicarle una fuerza menor. Por otro lado, el espécimen sin núcleo es el que rompe a mayor fuerza y desplazamiento.

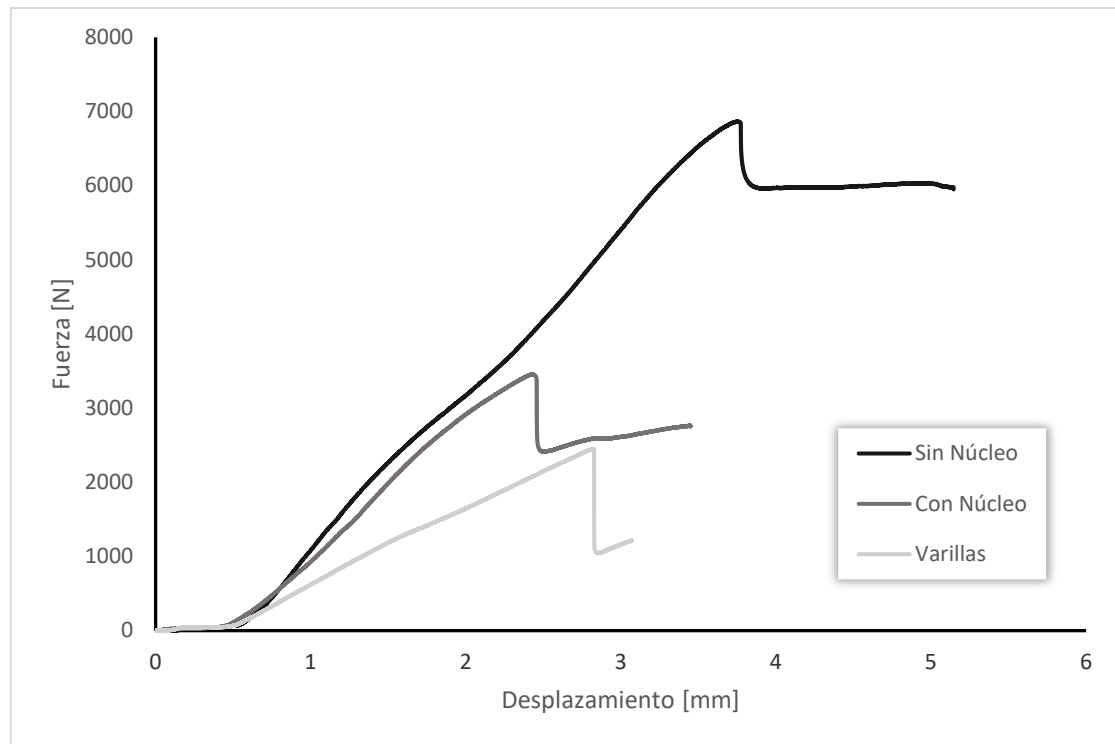


Figura 86- Curvas F-D ensayos estáticos de compresión hasta rotura HIPS.

La Figura 87 se representan las curvas de los ensayos estáticos de compresión hasta rotura de las probetas fabricadas mediante Filaflex. En ella se puede ver que, pese a no llegar a la rotura en ninguno de los casos, para un mismo desplazamiento, el espécimen con núcleo es el que requiere una mayor fuerza y, por lo contrario, la probeta sin núcleo es la que requiere un menor valor.

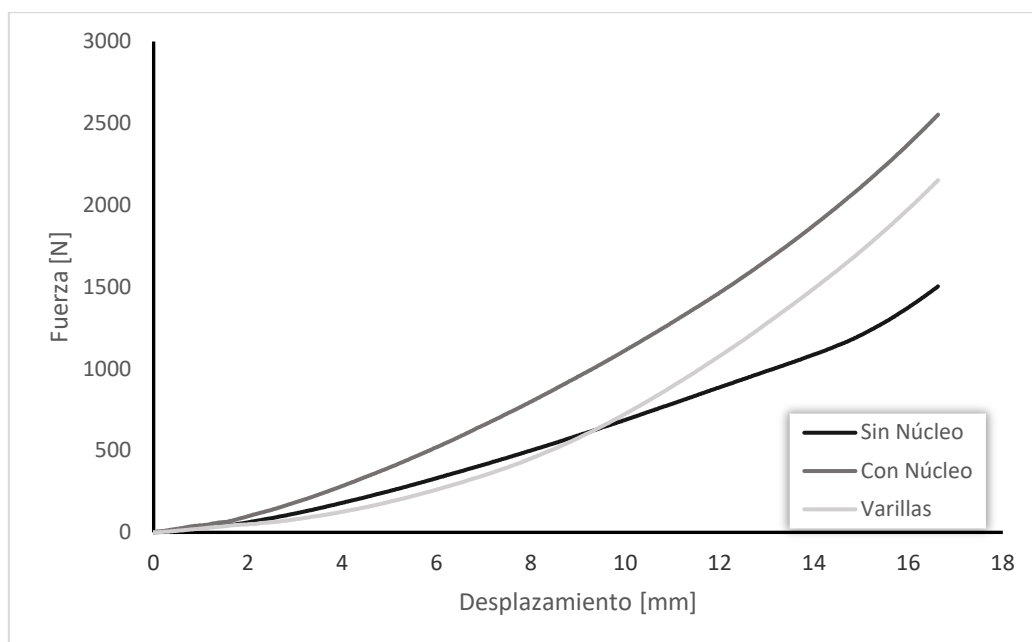


Figura 87 - Curvas F-D ensayos estáticos de compresión hasta rotura Filaflex.

8. Referencias

-
- [1] *Golf Park Madrid - Qué es el golf y cómo se juega*. Disponible en: <https://www.golfpark.es/que-es-el-golf-como-se-juega/>. Último acceso: Marzo de 2023.
 - [2] *Nociones básicas del deporte del Golf*. Disponible en: <https://www.rfegolf.es/Noticias/NewsDetails.aspx?NewsId=914>. Último acceso: Marzo de 2023.
 - [3] *El golf en el mundo, y en España, hoy - Crónica Golf*. Disponible en: <http://www.cronicagolf.com/el-golf-en-el-mundo-y-en-espana-hoy/>. Último acceso: Septiembre de 2022.
 - [4] *Historia del Golf y sus orígenes - Chaparral Golf Club*. Disponible en: <https://golfelchaparral.com/the-history-of-golf-and-its-origins>. Último acceso: Septiembre de 2022.
 - [5] *¿De dónde proviene el golf? - El Blog de Lester #BeyondElegance*. Disponible en: <https://www.corbataslester.com/magazine/de-donde-proviene-el-golf/>. Último acceso: Septiembre de 2022.
 - [6] *St Andrews Links: The Home of Golf*. Disponible en: <https://standrews.com/homepage/>. Último acceso: Septiembre de 2022.
 - [7] *Golf Park Madrid - Cuántos campos de golf hay en España actualmente*. Disponible en: <https://www.golfpark.es/cuantos-campos-de-golf-hay-en-espana-actualmente/>. Último acceso: Marzo de 2023.
 - [8] *Países con más jugadores de golf federados en Europa | Statista*. Disponible en: <https://es.statista.com/estadisticas/859931/paises-con-mas-jugadores-de-golf-en-europa/>. Último acceso: Septiembre de 2022.
 - [9] *Tipos de bolas de golf: Guía completa - Replay Golf*. Disponible en: <https://replaygolf.com/blog/tipos-de-bolas-de-golf-guia-completa/>. Último acceso: Marzo de 2023.
 - [10] *Golf Park Madrid - Los principales tipos de bolas de golf y sus usos*. Disponible en: <https://www.golfpark.es/los-principales-tipos-de-bolas-de-golf-y-sus-usos/>. Último acceso: Marzo de 2023.
 - [11] *Tipos de bolas de golf - Golf Los Palos*. Disponible en: <https://golflospalos.com/tipos-de-bolas-de-golf/>. Último acceso: Marzo de 2023.
 - [12] *Tipos de bolas de golf: Guía completa - Replay Golf*. Disponible en: <https://replaygolf.com/blog/tipos-de-bolas-de-golf-guia-completa/>. Último acceso: Marzo de 2023.
 - [13] *Bola de golf: todo lo que debes saber*. Disponible en: <https://sotapar.com/bola-de-golf-todo-lo-que-debes-saber/>. Último acceso: Marzo de 2023.
 - [14] *Pelotas de Golf - Materiales y Manufactura*. Disponible en: <https://todoenpolimeros.com/2017/04/03/los-polimeros-definiendo-el-golf/>. Último acceso: Marzo de 2023.

-
- [15] *El ayer y hoy de las bolas de golf - Federación de Golf de Madrid*. Disponible en: <https://fedgolfmadrid.com/noticia/el-ayer-y-hoy-de-las-bolas-de-golf/11721>. Último acceso: Marzo de 2023.
- [16] A. Lassagne, A. M. Benasat. *Modelización dinámica de las pelotas de golf*. Proyecto Fin de Carrera, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, 2006.
- [17] *¿Sabes cuántas capas tienen las bolas de golf?* Disponible en: <http://persongolf.com/sin-categoria/sabes-cuantas-capas-tienen-las-bolas-de-golf/>. Último acceso: Abril de 2023.
- [18] R&A y USGA, *The Equipment Rules*. Disponible en: www.randa.org. Último acceso: Septiembre 2022.
- [19] Norma ISO/ASTM 52900:2015. *Fabricación aditiva Principios generales. Terminología*. Organización Internacional de Estandarización, Ginebra, 2017.
- [20] S. Martín Béjar. *INTRODUCCIÓN A LA FABRICACIÓN ADITIVA*.
- [21] S. Martín Béjar. *PROCESOS Y TECNOLOGÍAS DE FABRICACIÓN ADITIVA*.
- [22] *7 ventajas de la fabricación aditiva Addvance3D*. Disponible en: <https://advvance3d.com/7-ventajas-de-la-fabricacion-aditiva/>. Último acceso: Marzo de 2023.
- [23] *Fabricación aditiva: descubre 8 de sus principales ventajas*. Disponible en: <https://www.asidek.es/blog-8-ventajas-de-la-fabricacion-aditiva/>. Último acceso: Marzo de 2023.
- [24] *Fabricación aditiva: ventajas y desventajas de este proceso. - Herramienta de futuro*. Disponible en: <https://www.ferrotall.com/es/fabricacion-aditiva-ventajas-y-desventajas-de-este-proceso/>. Último acceso: Marzo de 2023.
- [25] Norma ISO 17296-2. *Fabricación aditiva. Principios generales Parte 2: Visión general de categorías de procesos y de materias primas*. Organización Internacional de Estandarización, Ginebra, 2017.
- [26] *Impresión 3D FDM y Todos los Detalles de la Tecnología*. Disponible en: <https://www.tridimx.com/blog/todos-los-detalles-sobre-la-tecnologia-de-impresion-3d-fdm/>. Último acceso: Septiembre de 2022.
- [27] *What is FDM 3D Printing? – Simply Explained*. Disponible en: <https://all3dp.com/2/fused-deposition-modeling-fdm-3d-printing-simply-explained/>. Último acceso: Septiembre de 2022.
- [28] *Guía de materiales de impresión 3D: Tipos, aplicaciones y propiedades*. Disponible en: <https://formlabs.com/es/blog/materiales-impresion-3d/>. Último acceso: Marzo de 2023.
- [29] *PLA Basic Negro | Filament2Print*. Disponible en: <https://filament2print.com/es/pla-basic/693-pla-basic-negro-bobina-1kg.html>. Último acceso: Julio de 2022.
- [30] *HIPS Premium (Poliestireno) | Filament2Print*. Disponible en: <https://filament2print.com/es/hips/1146-hips-premium-poliestireno.html>. Último acceso: Julio de 2022.
- [31] *FilaFlex TPE 82A | Filament2Print*. Disponible en: <https://filament2print.com/es/flexibles-tpe-tpu/1145-filaflex-tpe-82a.html>. Último acceso: Julio de 2022.

- [32] Z. Xu y C. A. Brown, «*A Study of Impact between Golf Ball and Face of Golf Club Head A Major Qualifying Project Report*», 2015. Disponible en: <http://www.wpi.edu/Academics/Projects>. Último acceso: Septiembre 2022.
- [33] P. J. Caravaca Peñalver. *Influencia de las condiciones de trabajo en piezas generadas por 3D*. Proyecto Fin de Carrera, Universidad Politécnica de Cartagena, Cartagena, 2019.