



GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO ECODISEÑO DE UNA PALA DE PÁDEL

Autor: Millán Serrano Quiñones

Director: Eva Paz Jiménez

Madrid

Julio de 2021

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
ECODISEÑO DE UNA PALA DE PÁDEL
en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico 2020-2021 es de mi autoría, original e inédito y
no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos. El Proyecto no es
plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido tomada
de otros documentos está debidamente referenciada.

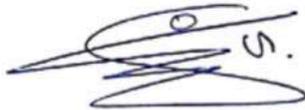


Fdo.: Millán Serrano Quiñones

Fecha: 13 / 07 / 2021

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO



Fdo.: Eva Paz Jiménez

Fecha: 13 / Julio / 2021

ECODISEÑO DE UNA PALA DE PÁDEL

Autor: Serrano Quiñones, Millán.

Director: Paz Jiménez, Eva.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

Palabras clave: pádel, fibra de lino, propiedades mecánicas, impacto medioambiental

Para plantear un futuro sostenible en el que el consumismo de hoy no comprometa las necesidades de generaciones futuras, no basta con sensibilizar al gran fabricante y al gran consumo. Uno debe desarrollarse profesional y personalmente en una sociedad concienciada con el medio ambiente y para ello ha de ser parte del cambio. Pequeños gestos como la ropa que uno compra, el transporte que usa para ir a trabajar o el deporte que practica pueden marcar la diferencia en el devenir de la sostenibilidad del planeta.

El pádel es el deporte que más crece en el mundo hoy en día, al vertiginoso ritmo de un 17% anual. Dicho crecimiento va acompañado de la venta de más de medio millón de palas anuales, una cifra que supone un consumo de más de 17.000 toneladas de CO₂ al año. La alta huella de carbono de las palas procede principalmente de la fabricación de la fibra de carbono, un material con muy baja reciclabilidad y un impacto medioambiental muy negativo.

En este Trabajo de Fin de Grado se pretende abordar la pregunta de si la fibra de lino es capaz de reemplazar a la fibra de carbono como material de fabricación. A pesar de que el negativo impacto medioambiental de la fibra de carbono supone un problema para muchas industrias que dependen de este novedoso y resistente material, el proyecto estará enfocado en la fabricación de material deportivo, más concretamente la manufactura de palas de pádel.

Durante el desarrollo del proyecto se han podido analizar y comparar las propiedades del lino con respecto a otro tipo de materiales compuestos como el carbono y el vidrio. Se han elaborado diferentes probetas y prototipos fabricados con distintas combinaciones de estos materiales y a través de diversos ensayos se ha podido ver la reacción de los materiales ante una serie de adversidades concretas (adversidades que replican los esfuerzos a los que se somete una pala de pádel durante un partido). Asimismo, se han podido extraer parámetros significativos para la evaluación de las propiedades mecánicas de los materiales.

Al combinar un estudio teórico y uno práctico, se ha podido ir contrastando en el transcurso del proyecto los resultados prácticos que se iban obteniendo en el laboratorio con los resultados teóricos que nos proporcionaba Granta Edupack. Gracias a ello, se han podido identificar grandes anomalías como lo sucedido al comparar el módulo de Young obtenido mediante en el ensayo de flexión de las planchas de tipo sándwich, con los resultados teóricos de Granta Edupack.

Además, durante el transcurso este Trabajo de Fin de Grado se han podido implementar las conocidas metodologías ágiles para dinamizar el transcurso del proyecto. En lugar de emplear la tradicional y casi obsoleta metodología en cascada, en la que un proyecto se desarrolla por fases y en la que no se pasa de una fase de trabajo a otra hasta que la anterior esté completada (y rara vez se regresa a una fase anterior), se ha propuesto llevar a cabo un procedimiento 'Agile'. Adoptando las metodologías ágiles, se ha podido volver de una fase del proyecto a otra respondiente a la incertidumbre y las necesidades del proyecto. A continuación, la arquitectura de trabajo empleada:

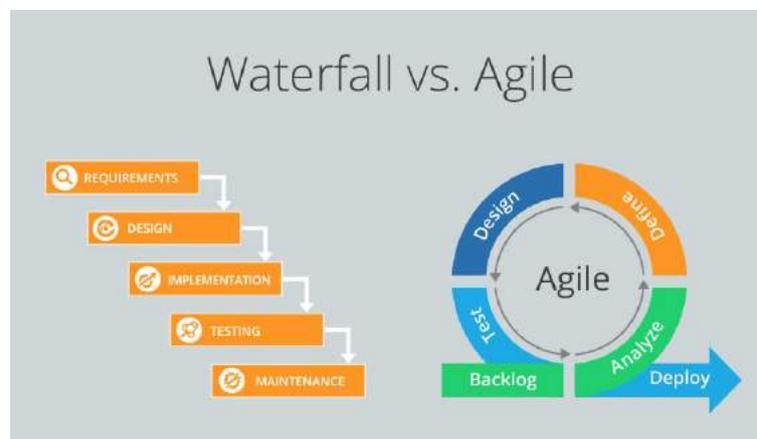


Figura 0: Metodología en cascada vs. Metodología ágil

Con respecto a los resultados obtenidos, se podría decir que son del todo concluyentes. A pesar de que se han llevado a cabo diversos experimentos, es complicado sacar conclusiones rotundas sin asumir que el proyecto no deba hacer una transición a un estudio más exhaustivo. Por un lado, da lugar a un gran margen de mejora, pero por otro, puede llegar a cuestionar la importancia de los resultados que se han logrado.

Quizás, el resultado más importante al que se ha llegado es la demostración de que ante impacto, la combinación de carbono-vidrio y carbono-lino resultan ambas muy similares y eficaces. El aspecto positivo es que da a entender que la combinación carbono-lino en una pala de pádel puede llegar a funcionar correctamente, el negativo es que apenas hay una reducción representativa del impacto medioambiental al cambiar del carbono-vidrio al carbono-lino (ya que el carbono es el principal problema de la ecuación porque la huella de carbono del vidrio no es mucho más alta que la del lino).

Material	Energía absorbida (J)	Resistencia al impacto (kJ/mm ²)
L-L	0,3080	17,47
L-L-L	0,3458	15,22
L-C-(L)	0,7813	50,37
L-V	0,2398	19,47
C-V	0,7315	50,72

Tabla 0.1: Energía absorbida y resistencia al impacto de las distintas probetas

Un resultado similar se ha obtenido a través del ensayo del ‘bote’, en el que se medía la altura a la que era capaz de rebotar una pelota sobre los diferentes paneles sándwich fabricados. Los resultados obtenidos para los prototipos fabricados de carbono-vidrio y carbono-lino, resultan ser también muy similares. A continuación, una tabla que recoge los resultados descritos:

Material	Altura inicial (mm)	Altura final media (mm)	Energía absorbida (J)
L-L-L-PE	1400	851,25	0,2907
L-C-PE	1400	937,50	0,2450
C-V-PE	1400	923,75	0,2523
PE	1400	832,50	0,3006

Tabla 0.2: Energía absorbida en el rebote de una pelota contra la superficie de los distintos paneles sándwich

La transición hacia un pádel sostenible comienza por el desarrollo, la investigación y la creación de tejidos de fibras naturales que sean capaces de sustituir a aquellos otros materiales que suponen un riesgo medioambiental. Fomentar la introducción de dichos materiales al mercado marcará la diferencia entre un deporte concienciado con el medio ambiente y uno que no lo esté. Un factor que en el futuro podrá suponer la diferencia entre practicar un deporte u otro.

ECODESIGN OF A PADEL RACQUET

Author: Serrano Quiñones, Millán.

Supervisor: Paz Jiménez, Eva.

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

ABSTRACT

Keywords: padel, flax fiber, mechanical properties, environmental impact

To envision a sustainable future in which the demand of future generations is not compromised by today's consumption, it is not only enough to raise awareness among large manufacturers and consumers. One must develop oneself professionally and personally in an environmentally conscious society, and to do so, one must be part of the change. Small actions such as the clothes you buy, the transport you use to go to work or the sport you practice can make a difference in the sustainability of the planet.

Padel is the fastest growing sport in the world today, growing at a dizzying rate of 17% per year. This growth implies the sale of more than half a million padel racquets every year, a figure that represents a consumption of more than 17,000 tons of CO₂ per year. The high carbon footprint of the racquets is mainly caused by the manufacturing of carbon fiber, a material with very low recyclability and a very negative environmental impact.

This thesis addresses the question of whether flax fiber can replace carbon fiber as a manufacturing material. Although the negative environmental impact of carbon fiber is a problem for many industries that depend on this new and resistant material, the project will be focused on the manufacture of sports equipment, more specifically the manufacture of padel racquets.

During the development of the project, it has been possible to analyze and compare the properties of flax with those of other types of composite materials such as carbon and glass. Different prototypes were made with the combination of the materials addressed before, these prototypes have been tested mechanically to monitor and analyze their reactions to a series of specific conditions (imitating the strain that a padel racquet withstands during a padel match). It has also been possible to obtain the representative parameters for evaluating the mechanical properties of the materials.

Thanks to the combination of a theoretical and a practical study, it has been possible to contrast the practical results obtained in the laboratory with the theoretical results provided by Granta Edupack. Thus, it has been possible to identify major anomalies such as what happened when comparing the Young's modulus obtained in the bending test of the sandwich plates with the theoretical results of Granta Edupack.

In addition, it has been possible to carry out this Final Degree Project using the well-known agile methodologies to facilitate the course of the project. Instead of using the traditional and almost obsolete waterfall methodology, in which a project is developed in phases and in which you are unable to move from one phase to another until the prior one is completed (and you can rarely return to a previous phase), the Agile procedure has been proposed as the working scheme. By adopting agile methodologies, it was possible to move from one project phase to another when the uncertainty of the events required it. Below we can see a graphic scheme of the working architecture used:

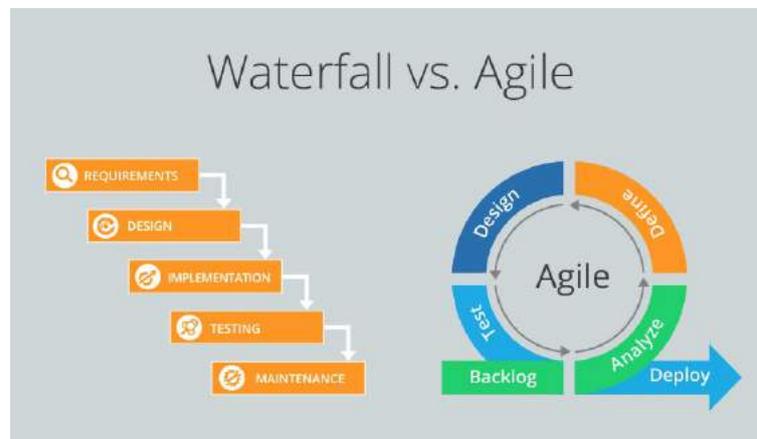


Figura 0: Waterfall vs. Agile methodologies

Regarding the results obtained, we could say that it is difficult to draw firm conclusions. Although several experiments have been carried out, we should expect that the project transitions to a further, more exhaustive, study. On one hand, it leaves plenty of room for improvement, but on the other, it questions the significance of the results that have been achieved.

Perhaps the most important result achieved is the demonstration that the carbon-glass and carbon-flax combinations are both very similar and effective when tested to impact. The positive aspect is that it suggests that the carbon-linen combination in a paddle racket can work properly, the negative aspect is that there is hardly a representative reduction of the environmental impact when changing from carbon-glass to carbon-flax (since carbon is the main problem in the equation).

Material	Energía absorbida (J)	Resistencia al impacto (kJ/mm ²)
L-L	0,3080	17,47
L-L-L	0,3458	15,22
L-C-(L)	0,7813	50,37
L-V	0,2398	19,47
C-V	0,7315	50,72

Tabla 0.1: Absorbed energy and impact strength of the different prototypes

A similar result has been obtained through the 'bouncing ball' test. Upon a low-speed impact of a ball on the designed prototypes made of the carbon-glass and carbon-flax combinations, a very similar response is obtained. The following table of results pictures these statements:

Material	Altura inicial (mm)	Altura final media (mm)	Energía absorbida (J)
L-L-L-PE	1400	851,25	0,2907
L-C-PE	1400	937,50	0,2450
C-V-PE	1400	923,75	0,2523
PE	1400	832,50	0,3006

Tabla 0.2: Absorbed energy in the bounce of a ball over the prototypes of padel racquets manufactured

Transitioning to a sustainable padel begins with the development, research and creation of new natural fibers that will become capable of replacing those materials that pose an environmental risk to the planet. Encouraging the introduction of such materials to the market will make the difference between an environmentally conscious sport and one that is not. A fact that sooner or later will be the reason for many to not practice a certain sport.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido posible gracias a la confianza que depositó en mí Eva Jiménez Paz. Muchas gracias por darme la oportunidad de hacer este Trabajo de Fin de Grado con el que tanto he podido disfrutar.

Gracias también a Jorge Gómez de la Vega por abrirnos las puertas de Starvie y apoyarnos incondicionalmente en este proyecto.

Índice de la memoria

Capítulo 1. Introducción	5
1.1 Historia del Pádel	
1.2 Contexto	
Capítulo 2. Estado de la Cuestión	11
Capítulo 3. Definición del Trabajo	14
3.1 Objetivos	
3.2 Metodología	
3.3 Planificación y Estimación Económica	
Capítulo 4. Metodología Experimental.....	20
4.1 Granta EduPack	
4.1.1 Base de Datos	
4.1.2 Sintetizador	
4.1.3 Eco-Audit	
4.2 Ensayos Mecánicos	
4.2.1 Flexión	
4.2.1.1 UNE-EN 2746	
4.2.1.2 Ensayos de flexión de los paneles sándwich	
4.2.2 Ensayo de Impacto	
4.2.2.1 UNE-EN ISO 179-1	
4.2.3 Ensayo de Rebote de una Pelota	
Capítulo 5. Sistema/Modelo Desarrollado.....	29
5.1 Caracterización de una Pala de Pádel	
5.1.1 Kombat SWAT Blue Titan II	
5.1.2 Bullpadel Hack 2016	
5.1.3 Modelo Base	
5.2 El Núcleo	
5.3 El Marco	
5.4 Cadena de Producción de una Pala de Pádel	
Capítulo 6. Fase de Investigación.....	42
6.1 Selección de Materiales	
6.2 Granta EduPack	
6.2.1 Selección del Núcleo	
6.2.2 Selección del Marco	

6.3 Simulación de una Pala Completa	
Capítulo 7. Fase Experimental y Resultados.....	55
7.1 Fabricación	
7.2 Ensayos de Flexión	
7.2.1 Ensayo de Probetas Simples	
7.2.2 Ensayo de Probetas Sándwich	
7.3 Ensayos de Impacto	
7.4 Ensayo de Rebote de una Pelota	
Capítulo 8. Conclusiones y Trabajos Futuros.....	69
Capítulo 9. Bibliografía.....	73
Anexo I. Información General de la Madera de Nogal.....	75
Anexo II. Información General de la Fibra de Carbono, Espuma de Polietileno y Sándwich de Ambos.....	77
Anexo III. Pala de Pádel Reglamentaria.....	83

Índice de figuras

- Figura 0:* Metodología en cascada vs. Metodología ágil
- Figura 1:* De izquierda a derecha, una raqueta de tenis de los años 50 y una de las primeras palas de Paddle Tennis
- Figura 2:* Datos variados acerca del crecimiento global del pádel
- Figura 3:* Energía empleada y huella de carbono del panel sándwich carbono-PE-carbono
- Figura 4:* Fotografía de la maquina S.A.E. Ibertest ELIB 20 del laboratorio de materiales del ICAI
- Figura 5:* Péndulos Charpy para ensayo de impacto del laboratorio de materiales del ICAI
- Figura 6:* Ensayo del bote de una pelota sobre plancha de polietileno desde una distancia determinada
- Figura 8:* Pala de pádel Kombat SWAT BT 2020
- Figura 9:* Micrografía electrónica de una pala de pádel Kombat SWAT
- Figura 10:* Pala de pádel Bullpadel Hack 2016
- Figura 11:* Micrografía electrónica de una pala de pádel Bullpadel Hack
- Figura 12:* Modelo simplificado de sección de una pala de pádel
- Figura 13:* Módulo de Young de los distintos polietilenos expandidos
- Figura 14:* Precio de los distintos polietilenos expandidos
- Figura 15:* Resistencia a la fatiga de los distintos polietilenos expandidos
- Figura 16:* Huella de carbono de los distintos polietilenos expandidos
- Figura 17:* Módulo de Young de las distintas fibras
- Figura 18:* Módulo a flexión de las distintas fibras
- Figura 19:* Módulo de rotura de las distintas fibras
- Figura 20:* Gráfica precio-huella de carbono de las distintas fibras
- Figura 21:* Gráfica densidad-módulo de Young de los paneles sándwich teóricos
- Figura 22:* Gráfica densidad-módulo de Young de los paneles sándwich teóricos
- Figura 23:* Probetas de flexión (60x15mm) de todas las combinaciones de materiales fabricadas
- Figura 24:* Probetas de impacto (80x10mm) de todas las combinaciones de materiales fabricadas
- Figura 25:* Paneles sándwich de todas las combinaciones de materiales fabricadas
- Figura 26:* Grafica tensión-deformación de una probeta C-V
- Figura 27:* Grafica tensión-deformación de una probeta L-C-(C)
- Figura 28:* Grafica tensión-deformación de una probeta L-L
- Figura 29:* Grafica tensión-deformación del panel sándwich L-L-L-PE-L-L-L
- Figura 30:* Grafica tensión-deformación del panel sándwich C-V-PE-V-C
- Figura 31:* Imagen al microscopio de las fibras de lino y carbono

Índice de tablas

- Tabla 0.1: Energía absorbida y resistencia al impacto de las distintas probetas
- Tabla 0.2: Energía absorbida en el rebote de una pelota contra la superficie de los distintos paneles sándwich
- Tabla 1: Huella de carbono de distintos productos cotidianos
- Tabla 2: Cronograma de trabajo
- Tabla 3: Medida en micrómetros del espesor del marco de las probetas de las dos palas
- Tabla 4: Propiedades mecánicas de diferentes fibras
- Tabla 5: Huella de carbono de distintas fibras
- Tabla 6: Espumas sujetas al estudio del núcleo de una pala de pádel en Granta EduPack
- Tabla 7: Fibras sujetas al estudio del marco de una pala de pádel en Granta EduPack
- Tabla 8: Dimensiones medias de las probetas ensayadas según su composición
- Tabla 9: Tensión máxima, deformación máxima y módulo de flexión de las probetas ensayadas
- Tabla 10: Dimensiones medias de los paneles sándwich ensayados según su composición
- Tabla 11: Fuerza, tensión y deformación máximas y módulo de flexión de las probetas ensayadas
- Tabla 12: Dimensiones medias de las probetas de impacto según su composición
- Tabla 13: Energía absorbida y resistencia al impacto de las distintas probetas
- Tabla 14: Energía absorbida en el rebote de una pelota contra la superficie de los distintos paneles sándwich

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

1.1 HISTORIA DEL PÁDEL

Los primeros antecedentes del deporte se remontan a principios del siglo XX en Michigan, Estados Unidos. Con el objetivo de enseñar a jugar al tenis a los niños pequeños, Frank Peer Beal [1], realiza una serie de modificaciones del ya popular y extendido deporte del tenis para adaptarlo a los más pequeños. Entre dichas modificaciones se encontraba la reducción del tamaño de la pista de tenis y la sustitución de la característica raqueta de cuerdas por una raqueta de madera sólida de menores dimensiones.

A partir de esto surge el Paddle Tennis, deporte que se popularizó en los años 20 en Estados Unidos y alcanzó el rango de deporte profesional en 1927 con la creación de la Asociación Estadounidense de Paddle Tennis (USPTA). Actualmente el deporte ha perdido popularidad, pero su vertiente más cercana, el Pickleball, cuenta con más de 3 millones de practicantes y presencia en más de 40 países [2].



Figura 1: De izquierda a derecha, una raqueta de tenis de los años 50 y una de las primeras palas de Paddle Tennis

Como consecuencia del paddle tenis y el auge de muchas otras vertientes del tenis que aparecieron durante mediados de los 90, surge el deporte que más nos concierne en este Trabajo de Fin de Grado, el Pádel. Nace en 1969 a manos de Enrique Corcuera [3], un empresario mejicano que decide rodear una pista de tenis por muros y emplear una raqueta más corta y sin cuerdas, similar a la empleada en el paddle tenis.

En 1974, el pádel hace su primera aparición en España, concretamente en el Club Marbella, donde se fabrican las dos primeras pistas con alguna sutil variación con respecto al diseño original propuesto por Corcuera. El éxito del nuevo deporte es rotundo y en pocos meses empiezan a aparecer canchas de pádel por todos los clubs de la Costa del Sol.

En 1975 ocurre el siguiente gran acontecimiento en la evolución de este deporte. Julio Menditengui, un argentino adinerado que frecuentaba Marbella, fascinado por el éxito del deporte, apuesta por llevar el pádel a su Argentina natal [1].

A partir del éxito y consecuente crecimiento del deporte, aparecen diversas instituciones para dar respaldo administrativo y regular su actividad como la Federación Española de Pádel [4] o la Federación Internacional de Padel [5]. Del mismo modo, se fundan otro tipo de organismos como el World Padel Tour [6], el campeonato de mayor renombre del circuito profesional, o la Asociación de Jugadores Profesionales de Padel [7], encargada de velar por los intereses de los jugadores.

Hoy en día el pádel cuenta con más de 8 millones de jugadores, se practica en más de 57 países [8] y es el deporte de raqueta que más crece en el mundo con un 17% anual [9]. A continuación, se muestra el siguiente gráfico para representar la magnitud de dicho crecimiento:



Figura 2: Datos variados acerca del crecimiento global del pádel [8]

Es destacable y de especial interés el dato del crecimiento en ventas de palas de padel desde 2002. Como se verá más adelante, el tema principal que aborda este Trabajo de Fin de Grado es la sostenibilidad del deporte y este dato, a pesar de tener connotaciones muy positivas en lo que respecta al crecimiento, también tiene implicaciones muy negativas en cuanto a la sostenibilidad y el impacto medioambiental del deporte.

Al igual que en otros muchos deportes de raqueta, en el pádel, el desarrollo de los materiales compuestos ha supuesto un gran avance en lo que respecta a la fabricación de las palas. Lo que antaño fueron palas fabricadas completamente de madera, pronto fueron sustituidas por la resistencia mecánica y ligereza de los materiales compuestos.

Es por ello que, a pesar de que se produce una mejora substancial en la calidad de juego, también supone un paso hacia atrás en lo que respecta a la sostenibilidad del deporte. Se plantea por tanto la siguiente cuestión: ¿es posible que las mejoras tecnológicas puedan volver a brindar un cambio que suponga igual calidad de juego y mejor sostenibilidad?

1.2 CONTEXTO

Lo que comúnmente se denomina una ‘pala de pádel’, es la composición de un núcleo de espuma polimérica con una densidad variable entre los 20-50kg/m³ y un recubrimiento de 1-2mm de espesor de fibras sintéticas de materiales compuestos, típicamente fibra de carbono y fibra de vidrio (aunque también se emplean fibras como el kevlar, el basalto e incluso refuerzos como el grafeno). La variación de la densidad del núcleo y el tipo de fibra empleada son los factores que determinarán la calidad y características de una pala de pádel. No obstante, existen muchos otros factores que influyen en la caracterización de una pala, como, por ejemplo, la forma, el diseño o la aerodinámica de la misma, pero estos factores no serán sujeto de investigación en este proyecto.

Para poder llevar a cabo este Trabajo de Fin de Grado, es importante entender bien porque se decide sustituir la madera por materiales compuestos y cuales son las verdaderas implicaciones en cuanto al daño medioambiental que supone dicho cambio.

Como ya se ha dicho anteriormente, a partir de los años 80, se sustituyen las palas madera, un material que encajaba perfectamente con el enfoque de Ecodiseño y que bien podría encajar en este Trabajo de Fin de Grado, por los materiales compuestos. Por un lado, analizando los aspectos positivos de este cambio, es evidente que los materiales compuestos ofrecen una versatilidad y unas propiedades mecánicas con las que la madera no puede competir. Pero, por otro lado, están los aspectos medioambientales. La baja reciclabilidad y alta huella de carbono hacen de los materiales compuestos un producto con un impacto medioambiental muy negativo, especialmente si se compara con la madera.

Para ilustrar la diferencia entre en las propiedades mecánicas de una pala de pádel actual y una pala de madera, se va a emplear el software de materiales Granta Edupack. El objetivo llegado este punto no es llevar a cabo un estudio exhaustivo, si no más bien poder hacerse una idea del orden de magnitud en los que difieren las propiedades mecánicas de los materiales que conformarían una pala y la otra.

Como no se ha encontrado información específica del tipo de madera que se empleaba en las palas de pádel antiguas, se extrapolará de las raquetas de tenis antiguas. Entre los distintos tipos de madera que se han empleado a lo largo de la historia del deporte [10], se asumirá que las palas de pádel se fabricaban de madera de nogal. Para el caso de las palas actuales se compondrá un panel sándwich formado por fibra de carbono y un núcleo de espuma de polietileno. Las dimensiones del panel y de la cantidad y tipo de material que se emplean se han escogido en base al ‘modelo base’ construido para la caracterización de una pala de pádel (ver capítulo 5).

En los anexos número I y II se pueden ver las fichas técnicas y diferencias entre las propiedades mecánicas de la madera y el panel sándwich. También se pueden ver las fichas de la fibra de vidrio y el polietileno por separado.

Analizando los resultados, se puede comprobar que a pesar de que la madera de nogal ofrece muy buenas propiedades de resistencia y flexibilidad, con el panel tipo sándwich se pueden obtener las propiedades mecánicas más adecuadas con el menor peso posible. Dicho eso, se ha de tener en cuenta que no existe una combinación de materiales perfecta para la fabricación de una pala de pádel, es más, cómo se verá más adelante que en función del tipo de jugador y sus necesidades, los materiales pueden oscilar desde la fibra de vidrio, caracterizada por su flexibilidad y ligereza, hasta la fibra de carbono, mucho más rígida y resistente.

Hay un dato que es de especial importancia destacar y es el elevado impacto medioambiental del panel sándwich. A continuación, se muestra un extracto del anexo número II acerca del impacto del panel:

Primary production energy, CO2 and water				
Embodied energy, primary production	ⓘ	403	- 452	MJ/kg
CO2 footprint, primary production	ⓘ	27,8	- 31,1	kg/kg

Figura 3: Energía empleada y huella de carbono del panel sándwich carbono-PE-carbono

Para poner en contexto la dimensión de estos valores, se muestra una tabla con la huella de carbono de distintos productos cotidianos:

Huella de carbono de distintos productos		
Producto	CO2 min (kg)	CO2 max (kg)
Panel Carbono-PE-Carbono	27,8	31,1
Zapatillas de cuero [11]	3	4
Zapatillas de plástico sintético [12]	18	41
Carne de pollo [13]	4	6
Carne de cerdo [13]	4	11
Carne de vacuno [13]	15	32
Mantequilla [14]	500	730
Deposito de un coche diésel [15]	150	200
Portátil [15]	300	400
Batería de coche eléctrico [16]	5300	17500

Tabla 1: Huella de carbono de distintos productos cotidianos

Se recuerda que el modelo que se ha empleado para llevar a cabo el este estudio es muy básico y que lo verdaderamente relevante son los ordenes de magnitud. En cuanto los valores en los que se sitúa la huella de carbono de la simulación de pala de pádel diseñada, se puede ver que son relativamente significativos dadas las dimensiones y sencillez del producto. Al fin y al cabo, no es comparable toda la elaboración y fases de producción y distribución que rodean a la producción de un portátil o la batería de un coche, con la fabricación de una pala de pádel.

Capítulo 2. ESTADO DE LA CUESTIÓN

En relación con el estado de la cuestión, concretamente al del tema que abarca este Trabajo de Fin de Grado, se tratará de relacionar las investigaciones y estudios más relevantes al proyecto siguiendo un orden cronológico de los acontecimientos.

A pesar de que no hay constancia de ningún estudio en el que se haya explorado a fondo las propiedades del lino en el deporte del pádel, sí que se han desarrollado investigaciones acerca de las posibilidades de este material en ámbitos y áreas completamente distintas. De la misma forma, también se han podido encontrar diversos proyectos relacionando los temas de ecodiseño y el material deportivo que pueden resultar interesantes.

Los primeros indicios de los materiales compuestos se remontan a 1500 a.C. cuando los primeros egipcios y colonos mesopotámicos comenzaron a utilizar una combinación de arcilla y paja para la construcción de casas más resistentes. [17]

No obstante, los primeros materiales compuestos plásticos no aparecen hasta comienzo del siglo XX, cuando durante la Segunda Guerra Mundial surge la necesidad de disminuir el peso de las aeronaves militares. En 1920, Griffith, realiza con éxito la primera caracterización de las propiedades mecánicas del bobinado de fibras de vidrio. Año más tarde, Owens (1935), introduce el primer polímero plástico reforzado por fibras. Se trata de la primera malla de fibra de vidrio.

El verdadero apogeo y avance de los materiales compuestos plásticos se desarrolla durante las décadas de los 60 y 70. Roger Bacon (1958), crea el primer prototipo de las fibras de carbono que conocemos hoy. Fibras que tan solo contenían un 20% de contenido en carbono y cuyas propiedades mecánicas no era lo suficientemente eficaces. En 1963, la empresa automovilística Rolls Royce junto a Courtaulds, una empresa textil y química inglesa, comienzan el desarrollo y producción en masa de una nueva fibra de carbono con un

contenido de carbono cercano al 60%. Sin embargo, no es hasta los años 70 que se consigue fabricar la fibra de carbono de excelentes características mecánicas que se conoce hoy en día (para entonces ya contaba con un contenido de hasta el 85% de carbono) [18]. Durante esta misma época, la compañía química Dupont desarrolla con éxito la fibra de aramida, o Kevlar, que supone todo un avance en la industrial militar, concretamente en la producción de material de protección armamentística (blindajes corporales) [19].

Los primeros avances modernos en lo que respecta al uso de fibras y materiales naturales para la fabricación de materiales compuestos aparece en los años 2000, cuando C.A. Boyard y J.R.M. D’Almeida realizan la primera incursión en las combinaciones híbridas de materiales compuestos y refuerzos naturales. Son capaces de obtener resultados mecánicos positivos en la aplicación de la Luffa como material de gran potencial en el refuerzo para matrices de resina [20].

C. Alves y A.P.S. Dias, en su artículo *‘Eco-Composite: The effects of the jute fiber treatments on the mechanical and environmental performance on the composite materials’*, logran demostrar un incremento significativo de las propiedades mecánicas de un tipo de material compuestos fabricado a partir de una matriz de fibra de yute sin comprometer sus propiedades biodegradables y reciclables [21].

Otro gran acontecimiento en el desarrollo de las fibras naturales ocurre en 2020. Como apuesta de innovación en el sector automovilístico para las 24 horas de Nürburgring, Porsche reemplaza la carrocería de fibra de carbono del Porsche 718 Cayman GT4 Clubsport MR por unas fibras de lino de procedencia 100% natural desarrolladas por Bcomp, una pequeña startup suiza de la que se hablará más adelante. Este acontecimiento es de especial relevancia ya que se trata del primer material de origen natural que logra la homologación para competir en los campeonatos SRO. También cabe la posibilidad que en los próximos años Porsche empiece a desarrollar alguno de sus modelos con este tipo de carrocería [22].

Por último, resultan de interés los resultados recogidos por A. Gallais y A. Zanco en su patente '*Next-Generation Wooden Racket*'. Los autores son capaces de rediseñar y demostrar las ventajas medioambientales y mecánicas de una raqueta de tenis fabricada a partir de distintos tipos de madera. A pesar de ser un material diferente al que se estudiará en este trabajo, es de interés comprender la motivación por disminuir el impacto medioambiental de un producto muy similar. Además, es posible que, a pesar de las diferencias entre una raqueta de tenis y una pala de pádel, se pueda inferir resultados y obtener soluciones acerca del comportamiento de una pala de pádel [23].

Capítulo 3. DEFINICIÓN DEL TRABAJO

3.1 OBJETIVOS

El principal objetivo de este Trabajo de Fin de Grado es la búsqueda de alternativas sostenibles a los materiales empleados en la fabricación de palas de pádel, materiales caracterizados por una baja reciclabilidad e impacto medioambiental muy negativo.

Será clave para el éxito de esta investigación hallar una configuración de materiales reciclables y fibras naturales que proporcionen características mecánicas similares a los productos existentes, pero que a su vez logren mejorar su comportamiento medioambiental a lo largo del ciclo de vida del producto.

Para ser capaces de llevar a cabo dicho objetivo, es importante conocer el producto actual. Se realizará un estudio exhaustivo de la/las palas de pádel de mayor éxito en el mercado para conocer tanto sus características mecánicas como todos aquellos datos que sean de relevancia para determinar su impacto medioambiental.

Una vez evaluado el impacto medioambiental del producto actual, se empleará el uso de software de materiales con el objetivo de hallar la combinación de eco materiales que permita igualar o superar las propiedades mecánicas de las palas a la vez que minimizar la huella de carbono y otros indicadores e índices ambientales.

Por último, se entrará en una fase experimental para comparar las prestaciones mecánicas de los materiales empleados actualmente en el mercado y el nuevo Ecodiseño propuesto. Para ello, se fabricarán probetas tanto con los materiales que conforman el producto actual como con los eco materiales seleccionados. La finalidad será caracterizar las propiedades mecánicas y físicas de ambos productos para poder determinar como varían entre ambos modelos.

3.2 METODOLOGÍA

Este Trabajo de Final de Grado se enfocará de tal forma que estará dividido en dos grandes fases. En primer lugar, una fase de investigación, que a su vez estará dividida en tres subfases, un estudio de mercado de las palas actuales y su composición, un estudio de las posibles fibras naturales capaces de sustituir a las actuales fibras y la obtención de resultados teóricos mediante el software de materiales de Granta EduPack (esta subfase incluirá tanto caracterización teórica de los materiales como el impacto medioambiental). La segunda gran fase será del todo experimental. Se fabricarán probetas simulando tanto el modelo de pala actual como el Ecodiseño y se pondrán a prueba los resultados obtenidos teóricamente para caracterizar los modelos.

Cronograma con el reparto de trabajo:

Tareas	Meses (semanas)				
	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
Toma de contacto					
Busqueda de información	■	■	■		
Familiarización con GRANTA EduPack	■	■	■		
Adquisición de material	■	■	■		
Investigación					
Composición de pala actual (materiales empleados)	■	■	■		
Recaudar información del fabricante	■	■	■		
GRANTA EduPack. Parte 1					
Diseño de modelo teórico (pala actual)		■	■		
Características mecánicas		■	■		
Huella de carbono		■	■		
Agrupación de datos		■	■		
GRANTA EduPack. Parte 2					
Diseño modelo teórico (eco pala)		■	■		
Características mecánicas		■	■		
Huella de carbono		■	■		
Agrupación de datos		■	■		
Sección experimental					
Desarrollo de probetas			■	■	
Medidas			■	■	
Ensayos			■	■	
Resultados			■	■	
Conclusiones			■	■	
Redacción					
Reflejar conclusiones en el documento				■	■
Elaborar un presentación				■	■
Presentación	■	■	■	■	■

Tabla 2: Cronograma de trabajo

3.3 PLANIFICACIÓN Y ESTIMACIÓN ECONÓMICA

La planificación y estimación económica para este Trabajo de Fin de Grado se va a enfocar desde una perspectiva más dirigida al negocio que al producto. Como producto, el coste de fabricación de una pala de pádel resulta bastante sencillo de calcular, puesto que su valor reside simplemente en el precio de la mano de obra para fabricar dicha pala y el coste de los materiales necesarios para producirla. En cambio, si la planificación económica se realiza desde el punto de vista de un negocio de venta de palas de pádel sostenibles, podrá dar lugar a desarrollar una estrategia de plan de negocio.

En resumidas cuentas, se estimarán y planificarán los costes de una pequeña startup cuyo modelo de negocio se base en la venta de palas de pádel fabricadas por un núcleo de polietileno 100% reciclado y un marco de fibra de lino AmpliTex de la marca Bcomp (la mejor fibra de vidrio del mercado). Para simplificar los cálculos e hipótesis, se supondrá que la startup es capaz de fabricar 50 palas de pádel al día en una fabrica situada en la zona industrial de Azuqueca de Henares.

El objetivo será calcular el precio al que se deberían vender dichas palas para que el resultado de la cuenta de resultados de la empresa después del primer año tras la apertura del negocio sea nulo. Esto quiere decir que la empresa no gane ni pierda dinero después de su primer año funcionando.

Se asumirá lo siguiente:

- Cantidad de fibra de lino necesaria para fabricar el marco de una pala: 100 gramos.
- Cantidad de resina epoxi necesaria en una pala: 150 gramos
- Cantidad de catalizador necesario en una pala: 35,5 gramos
- Cantidad de espuma de polietileno necesaria en una pala: 50 gramos
- Cantidad de pintura en espray necesaria en una pala: 20 gramos
- Metros cuadrados de la fábrica: 50

- Precio de un rollo de 50 metros cuadrados de fibra de lino: 684,46 €
- Metros cuadrados de fibra de lino necesarios en una pala: 0,33
- Precio espuma de polietileno: 0,4 €/kilogramo
- Precio pintura en espray: 40 €/kilogramo
- Precio resina Epoxi: 16 €/kilogramo
- Precio catalizador: 15 €/kilogramo
- Días laborables: 253 días/año

A continuación, se anotarán todos los gastos de la empresa en la siguiente tabla:

Concepto	Coste unitario	Coste total (€/año)	Observaciones
Alquiler de la infraestructura: fábrica	1.500 €/mes	18.000	Basado en el precio del metro cuadro en la zona industrial de Azuqueca de Henares (400m ²)
Alquiler de la infraestructura: oficinas	750 €/mes	9.000	Oficinas junto a la fábrica. Al mismo precio (200m ²)
Precio de electricidad, agua y gas	5.000 €/mes	60.000	Precio estimado
Materia prima: Fibra de lino	227,93 €/día	57.666	$50 * 0,33 * 684,46 / 50 = 227,93$
Materia prima: Espuma de polietileno	1 €/día	253	$50 * 0,4 * 0,05 = 1$

Materia prima: Pintura en espray	40 €/día	10.120	$50 \cdot 40 \cdot 0,02 = 40$
Materia prima: Resina Epoxi	120 €/día	30.360	$50 \cdot 16 \cdot 0,15 = 120$
Materia prima: Catalizador Epoxi	26,625 €/día	6.736	$50 \cdot 15 \cdot 0,0355 = 26,625$
Maquinaria: Taladradora automática	15.000 €/ud	15.000	Para realizar los agujeros
Equipo informático: PC	700 €/ud	3.500	<u>Cinco</u> ordenadores.
Útiles: Moldes de aluminio	800 €/ud	2.400	<u>Tres</u> moldes para poder fabricar las 50 palas al día
Mano de obra: Fábrica	25.000 €/año	75.000	Incluye el salario de <u>tres</u> trabajadores
Mano de obra: Comercial y financiero	36.000 €/año	144.000	Incluye el salario de <u>cuatro</u> trabajadores
Imagen de marca: Jugador profesional representante de la marca	4.000 €/mes	96.000	Patrocinio para que <u>dos</u> jugadores profesionales (ranking aproximado 40-50 del mundo)
Imagen de marca: RRSS	50 €/día	18.250	Dinero empleado en publicidad en redes

			sociales, SEO, SEM, Google ads...
Imagen de marca: Patrocinio club de pádel	500 €/mes	30.000	Patrocinios con <u>cinco</u> clubs de padel en Madrid para promocionar las palas entre los jugadores habituales del club
TOTAL (bruto)		576.285 €	
Impuestos (IVA: 21%)		121.020 €	
TOTAL (neto)		697.305 €	

Si se producen 50 palas al día y un año laborable tiene aproximadamente 253 días, entonces:

$$n^{\circ} \text{ de palas fabricadas} = 253 * 50 = 12650$$

Si se asume que se vende el 80% de las palas que se fabrican en el año, el precio mínimo al que se tendrían que vender las palas para que el primer año no haya ni pérdidas ni beneficios es:

$$\text{precio de venta mínimo} = \frac{697.305}{12650 * 0,8} = 68,9 \text{ €}$$

En vista del precio de venta de distintas palas de pádel de alta gama en el mercado, se cree que se podrían vender las palas hasta un 200% más caras del valor mínimo calculado. Si las presunciones e hipótesis realizadas fueran correctas, habría un gran potencial de beneficio en dicho negocio.

Capítulo 4. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

4.1 GRANTA EDUPACK

Granta EduPack es un software de materiales propiedad de desarrollador del software informático ANSYS. Cuenta con una extensa base de datos de materiales y un conjunto de recursos que darán un gran apoyo a la elaboración de prototipos teóricos. Además, cuenta con una extensión llamada ‘Eco-Audit’ con la que se podrá llevar a cabo una estimación del impacto medioambiental (mediante parámetros como la huella de carbono, la reciclabilidad, el gasto de agua en su fabricación o el consumo de energía por kilogramo)

Dentro de la propia plataforma se hará uso de tres herramientas principales: la base de datos de materiales compuestos y espumas, el sintetizador y el Eco-Audit.

4.1.1 BASE DE DATOS

Granta Edupack cuenta con una extensa y fiable base de datos de materiales. Todos los materiales que aparecen en dicha base de datos han sido verificados por expertos para garantizar la veracidad de sus resultados. Además, cuenta con la opción de introducir un nuevo material con las características mecánicas obtenidas en ensayos realizados de forma práctica (este material puede llegar a ser contrastado y pertenecer a la base de datos global del programa, pero la función principal de esta opción es la de contrastar los resultados que uno pueda haber obtenido experimentalmente con los que ya han sido verificados).

4.1.2 SINTETIZADOR

La segunda herramienta que se empleará será el sintetizador. El sintetizador sirve para generar geometrías distintas que puedan ser comúnmente empleadas en diferentes industrias. El programa emplea un complejo software de interpolación y extrapolación de resultados capaz de obtener las propiedades mecánicas de cualquier material o conjunto de materiales colocados y orientados con la geometría especificada.

La geometría del sintetizador que se manejará en este Trabajo de Fin de Grado será la del panel sándwich. Con ella, se podrán recrear modelos muy similares a los de una pala de pádel real.

4.1.3 ECO-AUDIT

Por último, con la herramienta de Eco-Audit, se llevará a cabo la estimación del impacto medioambiental del producto creado. A pesar de que dentro de cada material perteneciente a la base de datos de Granta Edupack se puede obtener indicadores medioambientales como la huella de carbono, la energía primaria empleada o la cantidad de agua destinada a la producción de dicho material, Eco-Audit es un método que tiene en cuenta un mayor número de factores influyentes en la sostenibilidad del producto como: el desplazamiento, el adhesivo empleado, los posibles cambios en el diseño o el almacenamiento. Gracias a la herramienta de Eco-Audit, se podrá llevar a cabo un estudio más completo para determinar el verdadero impacto de una pala de pádel

4.2 ENSAYOS MECÁNICOS

Como por una cuestión de tiempo no es posible realizar todos los ensayos mecánicos accesibles en los laboratorios de materiales, química y fabricación, se seleccionarán aquellos ensayos que aporten mayor información para fabricar la eco-pala de pádel ideal. La selección de los ensayos se basará principalmente en el interés por obtener un parámetro del material en especial.

Se realizarán ensayos tanto para probetas fabricadas únicamente de capas de material compuesto como para el conjunto de material compuesto y espuma de polietileno. En los siguientes sub-apartados se explica cada ensayo que se realizará.

4.2.1 ENSAYO DE FLEXIÓN

El primer ensayo que se realizará es el de flexión. Este ensayo es de especial interés ya que la pala de pádel ha de tener una buena rigidez y resistencia a la rotura. Para la realización de los ensayos, se empleará la máquina S.A.E. Ibertest ELIB 20.



Figura 4: Fotografía de la máquina S.A.E. Ibertest ELIB 20 del laboratorio de materiales del ICAI

Se desarrollarán ensayos a flexión en las probetas con y sin núcleo. Los ensayos se realizarán acorde a la norma UNE correspondiente. A continuación, se indagará en la norma.

4.2.1.1 UNE-EN 2746

Los ensayos que de las probetas fabricadas de material compuesto (sin espuma de polietileno), se efectuarán acorde a la norma UNE-EN 2746. Seguidamente, un resumen de la norma:

Las dimensiones de la probeta son las siguientes:

- L distancia entre apoyos en mm
- h espesor de la probeta en mm
- b anchura de la probeta en mm

$$L = 16 * h$$

Como la longitud de la probeta ha de ser mayor que la distancia entre apoyos, se fabricará la probeta con una longitud de:

$$L' = 20 * h$$

Se establecen por lo tanto las siguientes dimensiones para las probetas:

- $h = 3mm$
- $L' = 60mm$
- $b = 15mm$

Las formulas que se emplearán para obtener esfuerzo de flexión y la deformación son las siguientes:

$$\sigma_f = \frac{3 F L}{2 b h^2}$$

$$\varepsilon = \frac{6 c h}{L}$$

El módulo de elasticidad corresponderá a zona elástica en la curva tensión-deformación. La formula para obtener su valor es la de la pendiente de una recta:

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon}$$

4.2.1.2 Ensayos de Flexión de los Paneles Sándwich

En el caso de la probeta con el núcleo de polietileno, no se pueden fabricar probetas que mantengan las proporciones de la norma UNE-EN 2746, y ya que no existe otra norma que englobe el ensayo a flexión con las dimensiones concretas de las probetas de polietileno, los ensayos se realizarán siguiendo un procedimiento empleado en un artículo elaborado por científicos de la universidad de Cukurova acerca de los ensayos a flexión en estructuras de tipo sándwich [24].

En el artículo se ensayan probetas de dos longitudes distintas, de 250 y 200 milímetros. Ya que las probetas que se fabricarán en el laboratorio tendrán un espesor similar al de una pala de pádel real, la longitud que mejor se adapta a dicho espesor son 200 milímetros, por tanto, se realizarán los ensayos acorde a las dimensiones de 200 milímetros.

Se fijará una distancia entre apoyos de 150 milímetros, por lo que después de realizar el ensayo de las probetas pequeñas, se tendrá que cambiar el puente de flexión de la maquina a uno de mayores dimensiones.

Las formulas para la obtención de: tensión, deformación y módulo de Young serán las mismas que para el ensayo bajo norma UNE-EN 2746.

4.2.2 ENSAYO DE IMPACTO

El ensayo de impacto servirá para registrar y evaluar la energía absorbida que son capaces de retener las distintas configuraciones de probetas tras recibir el impacto del péndulo. Este ensayo también es de especial interés ya que la pala de pádel ha de ser capaz de resistir los fuertes impactos de una pelota de pádel.

Se quiso hacer dos tipos de ensayos de impacto distintos. En primer lugar, el ensayo de impacto normalizado bajo la norma UNE-EN ISO 179-1. En segundo lugar, al igual que para los ensayos de flexión, se pensó en buscar una norma o artículo científico en el que se ensayase ante impacto un panel de tipo sándwich (equivalente al realizado por la universidad de Cukurova). Al no encontrar ningún artículo con las características deseadas y tras plantear la hipótesis de que este tipo de ensayos la mayor parte de energía absorbida se transmitiría al marco (debido principalmente a la magnitud de la fuerza con la que impactaría el péndulo), se decidió únicamente realizar el ensayo de impacto de las probetas de menor espesor (sin núcleo de polietileno).



Figura 5: Péndulos Charpy para ensayo de impacto del laboratorio de materiales del ICAI

4.2.2.1 UNE-EN ISO 179-1

De la misma manera que en las normas anteriores, se muestra un pequeño resumen de la norma y las dimensiones seleccionadas:

Las dimensiones de la probeta son las siguientes:

L	longitud de la probeta en mm
h	espesor de la probeta en mm
b	anchura de la probeta en mm

El valor de estas medidas se tomará siguiendo los criterios que aparecen en la norma. Los valores que se han escogido para llevar a cabo el ensayo son los siguientes:

$$h = 4mm$$

$$L = 80mm$$

$$b = 10mm$$

La máquina bajo la que se realizará el ensayo será máquina de ensayos de impacto pendular Instron CEAST 9050, que se puede ver en la tercera imagen desde la izquierda en la Figura 5. El péndulo apropiado para las dimensiones seleccionadas de la probeta será el de 4 julios.

Los parámetros significativos que se obtendrán de este ensayo y que determinarán si el lino tiene un buen comportamiento ante impacto serán la energía absorbida por la probeta y su resistencia al impacto. La energía absorbida por la probeta será un resultado que nos proporcionará la máquina (que calcula midiendo la diferencia de altura antes y después de impactar con la probeta). La resistencia al impacto se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$a_{cu} = \frac{E_c}{h * b} x 10^3 [kJ]$$

4.2.3 ENSAYO DE REBOTE DE UNA PELOTA

Este ensayo, surge a raíz de una demostración que el director de la fábrica de StarVie, Jorge Gómez de la Vega, realizó durante la visita a la misma. Para ilustrar como afectaba mecánicamente la selección de materiales en el marco de una pala de pádel, seleccionó dos palas distintas compuestas por el mismo núcleo de polietileno, pero marcos fabricados de distintas fibras.

La idea era qué, colocando las palas horizontalmente apoyadas en el suelo, si se dejaba caer una pelota a cierta altura del suelo, la pelota rebotaría más o menos en función de la composición de las palas.

Según la teoría, en las palas más ‘blandas’, las compuestas por fibras con un menor módulo de Young (véase el vidrio), rebotarán más que las palas con mayor módulo (fibra de carbono). Esto se debe a que, ante un impacto suave, la fibra de vidrio es capaz de flexionarse más que la fibra de carbono. No sucede lo mismo ante un impacto a alta velocidad. En el impacto con mayor energía cinética, la espuma de polietileno apenas llega a comprimirse, sino que es la cobertura de material compuesto la responsable del rebote de la pelota (la que absorbe la mayor parte de la energía del impacto).

Se diseñó por lo tanto un experimento original con el propósito de medir el rebote de una pelota a baja velocidad. Mediante un soporte de tubos de ensayos, se dejará caer una pelota desde una altura constante. Grabando el ensayo a cámara lenta, se medirá la altura exacta que alcance la pelota después de rebotar contra los distintos paneles sándwich. El diseño del experimento es el que se muestra en la siguiente página:



Figura 6: Ensayo del bote de una pelota sobre plancha de polietileno desde una distancia determinada

Cabe destacar que este ensayo tiene cierta similitud a un ensayo de impacto, porque está midiendo el rebote, que viene a ser la energía que son capaces de absorber los paneles sándwich que se han fabricado en el laboratorio.

Para calcular la energía que absorbe la probeta se empleará la siguiente fórmula de conservación de la energía mecánica:

$$E_{mec,i} = E_{mec,f} + \tau$$

$$\tau = P_{pelota} * g * (h_i + h_f)$$

Como se puede ver, se ha simplificado la fórmula de conservación para que no incluya ningún tipo de pérdida mecánica. Por lo tanto, el valor de energía absorbida que se obtendrá no será el real, ya que incluirá todas las pérdidas del proceso. De cualquier forma, no es un problema, ya que el objetivo es comparar los distintos paneles sándwich y las pérdidas mecánicas son prácticamente constantes en todos los ensayos que se realizarán.

Capítulo 5. SISTEMA/MODELO DESARROLLADO

5.1 CARACTERIZACIÓN DE UNA PALA DE PÁDEL

En este apartado se indagará en mayor profundidad acerca de los materiales que conforman una pala de pádel y se establecerá un modelo base que sirva de referencia para la fabricación de probetas. Para ello, se analizarán muestras obtenidas del corte de palas reales.

Como se ha dicho anteriormente, la pala de pádel la componen un núcleo de espuma polimérica y un marco de fibras de material compuesto. Las organizaciones reguladoras del deporte no restringen ni recomiendan ningún material a la hora de la fabricación de las palas, por lo que los fabricantes son libres de innovar tanto en las fibras como en las espumas empleadas. Sin embargo, en cuanto a las dimensiones de las palas, la Federación Internacional de Pádel (FIP), estipula una serie de limitaciones en las medidas que puede tomar una pala de pádel reglamentaria. Las medidas máximas son 45,5 centímetros de largo, 38 milímetros de espesor y agujeros de 13 milímetros de diámetro. En el anexo III se puede consultar el reglamento completo.

Otro de los factores que el reglamento no estipula es el espesor del marco y el núcleo de las palas. Es evidente que las dimensiones de la espuma son mucho mayores que las de las fibras, pero para poder llevar a cabo un estudio acerca de los materiales y poder fabricar las probetas en el laboratorio, se ha de saber las medidas aproximadas de estos parámetros. Ya que por lo general las marcas no hacen públicas estas medidas en las fichas técnicas de sus palas, se procede a cortar y examinar dos palas rotas de fabricantes distintos.

5.1.1 KOMBAT SWAT BLUE TITAN II

En primer lugar, se analizará la pala Kombat SWAT. Se caracteriza por ser una pala de pádel de potencia, con el centro de gravedad situado en lo alto de la pala y un marco compuesto al 100% de fibra de carbono (acorde al fabricante). Al realizar el corte y examinar la pala bajo el microscopio también se podrá contrastar si la información proporcionada por el fabricante en cuanto a los materiales es verídica.



Figura 8: Pala de pádel Kombat SWAT BT 2020

La primera impresión de la probeta al tacto es que se trata de una combinación de materiales relativamente flexible. Al comprimir la probeta con los dedos se aprecia la resistencia que ejerce el material ejerciendo muy poca fuerza. Es destacable también la facilidad del material para recuperar su geometría original.

A simple vista se puede diferenciar fácilmente entre el núcleo y el marco de la pala. Tal y como se esperaba, el espesor del marco es prácticamente despreciable frente al del núcleo, que no por ello significa que las propiedades mecánicas que aporta el marco sean despreciables frente a las del núcleo, esta afirmación se tomará una vez se haya estudiado y ensayado los materiales.

Si se lleva a cabo una inspección visual más exhaustiva, se puede diferenciar lo que parecen tres capas de material compuesto en el marco de la pala. Una primera capa exterior de color negro, una segunda azul y una última capa de color blanco. Se procede a visualizar la muestra a través del microscopio Olympus IXplore SpinSR. para llevar a cabo un análisis completo. Se realiza la fotografía a través del objetivo DSX10-XLOB10X a una magnificación total de x140.

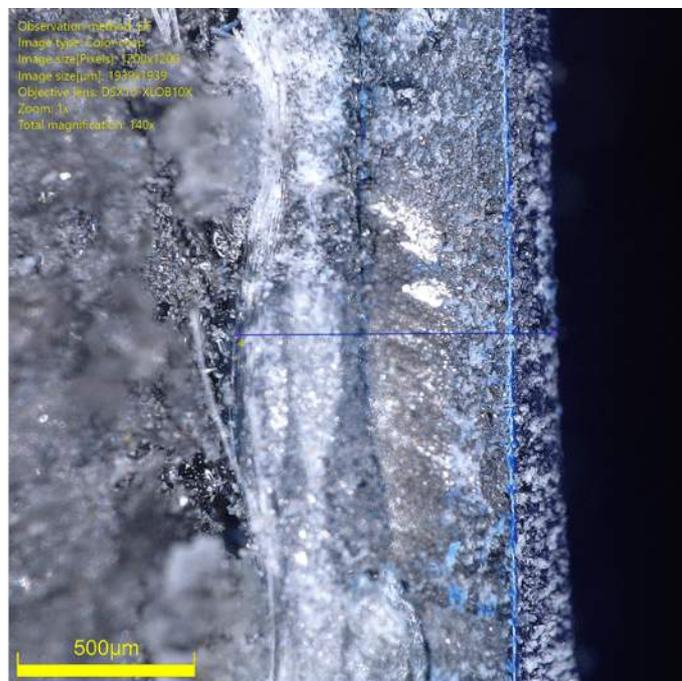


Figura 9: Micrografía electrónica de una pala de pádel Kombat SWAT

Inspeccionando la pala bajo el microscopio se pueden apreciar claramente las tres capas distintas en el marco de la pala. En primer lugar, comenzando por el exterior de la pala, se puede ver una capa de un color azul oscuro que bien podría tratarse de una capa de pintura. Seguido de esa primera capa azul, se observa nítidamente una capa negra de fibra de carbono que delimita con una última capa de fibra de vidrio. Es destacable el hecho de que a pesar de que en la ficha técnica de la pala se especifica que el marco está compuesto al 100% de fibra de carbono, se puede ver que hay materiales en el marco a parte de la fibra de carbono.

En cuanto al corte de la probeta, cabe destacar las imperfecciones debidas al mismo. Al haber realizado el corte con una sierra dentada es inevitable la aparición de deshilaches y otros tipos de imperfecciones que complican tanto la identificación de los materiales como el cálculo del espesor del marco. En lo que respecta al cálculo del espesor, para realizar la medida de este, se ha empleado la herramienta que ofrece el microscopio de distancia entre dos puntos. Las medidas que se han hecho corresponden a las líneas azules que se ven en las micrografías.

5.1.2 BULLPADEL HACK 2016

La segunda pala que se analizará se trata de la Bullpadel Hack, una pala con un formato de diamante y balance alto. Su fabricante, anuncia esta pala como una pala de máxima potencia. Al igual que en la pala de Kombat, en la ficha técnica de la Bullpadel Hack [25] se especifica claramente que el marco esta fabricado únicamente de fibra de carbono. El núcleo está compuesto por una goma a la que denominan ‘Multieva’.



Figura 10: Pala de pádel Bullpadel Hack 2016

Se puede apreciar la presencia de una capa exterior de fibra carbono con una alta densidad de fibras por calda celda, posiblemente se trate de carbono de 24k. Al tacto, se puede apreciar una gran similitud a la probeta de la Kombat, con una buena compresión y flexibilidad, pero especialmente buena recuperación tras la compresión. Comparando ambas probetas al unísono, se pueden apreciar sutiles diferencias, como, por ejemplo, que la Kombat tiene una cobertura algo más gruesa que la hace un poco menos flexible. Al mismo tiempo, se puede ver que la goma de la Bullpadel esta más deteriorada y tiene más signos de envejecimiento que la Kombat, pero a simple vista se podría decir que ambos núcleos están compuestos del mismo material.

A continuación, se muestra el corte de la Bullpadel a través del microscopio Olympus IXplore SpinSR. Se emplea el mismo objetivo y especificaciones que para la micrografía de la Kombat, a excepción de que con fines estéticos se utiliza un tipo de luz distinto (BF en lugar de DF). El efecto es una imagen más opaca.



Figura 11: Micrografía electrónica de una pala de pádel Bullpadel Hack

En la imagen se puede apreciar fácilmente que el marco este compuesto por tres capas de material compuesto. A simple vista es fácil identificar las dos capas exteriores de fibra de carbono y la capa intermedia de fibra de vidrio. No obstante, es importante despuntar que las capas exteriores no son del mismo material, aunque es posible que se haya empleado un carbono de 24k en el exterior con fines más ‘estéticos’ y un carbono 3k en la capa interior.

Por último, con respecto a la afirmación que hace el fabricante de que el marco de la pala está compuesto ‘únicamente de fibra de carbon’, se ha podido volver a comprobar que al menos una de las tres capas de material compuesto es fibra de vidrio.

5.1.3 MODELO BASE

Una vez se han analizado ambas muestras de las palas comerciales se puede llevar a cabo un prototipo o modelo base para que sirva de referencia a lo largo del proyecto. Para la creación del modelo únicamente se ha tenido en cuenta la referencia de medidas que se han tomado empleando la herramienta de distancia entre dos puntos mencionada anteriormente. A continuación, una tabla con las medidas realizadas:

	Medida nº	Distancia (µm)	Media (µm)
Kombat SWAT	1	896,947	862,592
	2	821,597	
	3	869,232	
Bullpadel Hack	1	790,821	755,449
	2	732,710	
	3	742,816	

Tabla 3: Medida en micrómetros del espesor del marco de las probetas de las dos palas

A continuación, se muestra dicho modelo base:

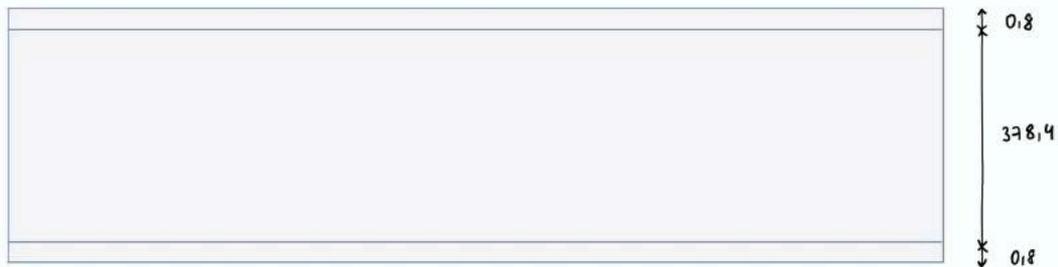


Figura 12: Modelo simplificado de sección de una pala de pádel

En cuanto a los materiales que compondrán el modelo base, se seleccionan la configuración: carbono-vidrio-vidrio-polietileno-vidrio-vidrio-carbono. El motivo por el que se selecciona se basa la visita que se realizó a la fábrica de palas Starvie. En dicha visita se pudo conocer desde dentro tanto los procesos en la cadena de producción de las palas de pádel, como los distintos materiales que conforman una pala según sus características. Durante la visita se siguió de cerca el proceso de fabricación de un modelo en concreto, la StarVie Tritón [26], uno de los modelos más vendidos de la firma y que precisamente esta compuesta por una capa exterior de carbono y dos interiores de vidrio.

A pesar de que se haya seleccionado un modelo fabricado únicamente por dos capas de fibra de carbono (contando ambos lados de la pala), se hará continuamente referencia a otras distribuciones con una mayor cantidad de carbono. El motivo es ilustrar la magnitud del impacto medioambiental que supone añadir un mayor número de capas de fibra de carbono. Además, se sabe, de la visita a la fábrica, que al menos tres modelos distintos de la marca: Aquila Pro, Titania Pro y Tritón Pro, están fabricados de dos o más coberturas de fibra de carbono (por cada lado de la pala).

5.2 EL NÚCLEO

Haciendo un poco de investigación en la web, se ha podido hallar los materiales que conforman el núcleo de las palas de pádel. No obstante, como el pádel se trata de un deporte y no de una industria en la que se deba controlar rigurosamente los materiales de fabricación, ya sea por motivos de calidad o de seguridad, se ha podido observar que los fabricantes emplean estrategias de marketing como tecnicismos y nomenclaturas atractivas para que los materiales de las palas resulten mas llamativos. Véanse ejemplos como: Multieva o Eva Pro.

El núcleo es la parte de la pala que ocupa mayor volumen. Esta envuelta por el marco y únicamente tiene contacto con el exterior por los agujeros. Se emplean principalmente dos materiales: la goma EVA y/o la espuma de Polietileno. A partir de esos dos materiales, los fabricantes crean modelos con distintas densidades que pueden oscilar entre los 20 y los 50 kg/m³.

En un principio se pensó en que otro de los factores con los que se podría reducir el impacto medioambiental de las palas era empleando una goma de origen reciclado. No obstante, tras adquirir unas planchas de goma EVA 100% reciclada de 45kg/m³, se observó que las propiedades y características de dicho material no concordaba precisamente con los materiales de la pala. Al tacto, el material era mucho más rígido y duro. No compartían las propiedades de flexión y compresión que se pueden ver en las probetas extraídas de las palas comerciales.

5.3 EL MARCO

En el marco de una pala de padel sucede algo similar a lo que pasa con los materiales del núcleo. A pesar de que existen infinidad de posibilidades, los materiales compuestos que se suelen emplear son dos: la fibra de carbono y la fibra de vidrio. Por lo general, no es común emplear únicamente uno de estos materiales, si no más bien una combinación de ambos adherida a través de una fibra epoxi. El resultado de la combinación de los materiales es un marco de alta resistencia con muy buenas propiedades ante el impacto y la fatiga. La fibra de carbono sería responsable de aportar la resistencia a la estructura mientras que la fibra de vidrio aportaría la flexibilidad.

Analizando lo que cada material aporta, se puede llegar a hacer la primera reflexión acerca de cómo se podrán sustituir las fibras de materiales compuestos por otra de origen natural. A continuación, se mostrará una tabla con algunas de las fibras naturales disponibles en el mercado y sus propiedades mecánicas. La idea es poder comparar de manera ilustrativa como se asemejan las propiedades de la fibra de carbono y vidrio con las distintas fibras naturales: [27] [28] [29] [30]

Tipo de Fibra:	Gramaje (g/m ²)	Módulo de Young (GPa)	Alargamiento de rotura
Tejido de Lino FlaxDry BL 200	200	22	1,8 - 2,4%
AmpliTex™ twill 2/2	200	62	1,3 - 1,4%
Tejido de vidrio tafétan UTE 200P	200	68	4,6 - 4,9%
Tejido de carbono tafétan 3K	200	235	1,7%

Tabla 4: Propiedades mecánicas de diferentes fibras

Se pueden apreciar diferencias cualitativas entre los distintos materiales. Es de especial interés el hecho de que las propiedades mecánicas de las dos fibras de lino se asemejan más a las propiedades del vidrio que a las del carbono. Sin sacar conclusiones precipitadas, se puede llegar a pensar que es posible que la fibra de lino nunca pueda llegar a sustituir a la fibra de carbono en una pala de pádel. No obstante, este no es motivo suficiente para declarar

que el lino es incompatible con la fabricación de palas de pádel. Más adelante se estudiarán con mayor detenimiento las distintas posibilidades y si realmente el lino puede sustituir al carbono.

El motivo por el cual solo aparecen dos tipos distintos de fibras de lino (y de ningún otro material natural) es porque a pesar de que existen numerosos estudios y se ha demostrado ya el potencial mecánico de las distintas fibras naturales como la seda, el yute, la palmera, el kenaf o la fibra de caña de azúcar, son productos innovadores complicados de obtener en el mercado actual.

Seguidamente, se muestra una tabla con los aspectos medioambientales que los distribuidores proporcionan acerca de las fibras que se han visto anteriormente:

Tipo de Fibra:	Huella de carbono (CO2/kg)
Tejido de Lino FlaxDry BL 200	1,2 - 1,5
AmpliTex™ twill 2/2	1,65
Tejido de vidrio tafétan UTE 200P	2,85 - 3,14
Tejido de carbono tafétan 3K	20

Tabla 5: Huella de carbono de distintas fibras

En esta tabla se puede apreciar el verdadero potencial de las fibras naturales como sustitutas ecológicas de la contaminante fibra de carbono. Volviendo a la cuestión que se planteaba antes de si las fibras naturales eran o no capaces de igualar las propiedades mecánicas del carbono, se tendrá también que evaluar si realmente es crucial emplear fibra de carbono en la manufactura de palas de pádel o si de lo contrario se puede optar por los materiales menos resistentes con mejor impacto ambiental.

5.4 CADENA DE PRODUCCIÓN DE UNA PALA DE PÁDEL

Con el fin de comprender como se podría mejorar la huella de carbono de las palas de pádel, a continuación, se mostrarán las fases de producción en una fábrica de palas. Toda la información se ha obtenido tomando como referencia tanto la visita presencial a la fabrica de palas de pádel de la marca Starvie, situada en Azuqueca de Henares, Guadalajara, como el repositorio de videos de la marca [31]. Cabe destacar que existen otros métodos de fabricación de palas de pádel en el mercado.

- 1. Diseño:** Cada pala tiene las especificaciones de diseño elegidas por la marca, no obstante, la Federación Internacional de Pádel (FIP) estipula unas dimensiones máximas para la pala de pádel reglamentaria. Estas dimensiones pueden consultarse en el anexo III.
- 2. Selección de materiales:** El siguiente paso del proceso será seleccionar los materiales que se emplearán en la fabricación de la raqueta. Se seleccionará el tipo de polietileno que conformará el núcleo de la pala y el tipo de fibras para el marco.
- 3. Troquelado:** Se troquela tanto la espuma como las fibras con las dimensiones adecuadas a cada molde de cada pala empleando una prensa troqueladora.
- 4. Precautado del molde:** Se calienta el molde de aluminio a una temperatura de 60°C. Precautar el molde ayudará a agilizar el proceso de encerado y el proceso de curación de las fibras (carbono, vidrio, basalto...)
- 5. Encerado:** Se emplea una capa de cera para facilitar la extracción de la pala cuando termine el proceso de curado. Durante esta proceso, se aplica también una dosis de gelcoat [32] para conferir un acabado visible de alta calidad.
- 6. Moldeado:** Se procede a aplicar la mezcla de resina epoxi y catalizador que previamente se ha dosificado en función del peso de fibra que se emplea. Se añade la mezcla con un pincel directamente en las fibras, a continuación, se traslada la fibra, ya impregnada, al molde. Se repite el proceso de impregnación hasta que se hayan aplicado al molde todas las capas de fibras. Seguidamente, se sitúa el núcleo de polietileno en el centro de la pala, se rodea con un tubular (el tubular tiene una forma

- cilíndrica y típicamente este fabricado de fibra de carbono) embebido por la mezcla de resina y se cierra el molde.
7. **Curado:** Una vez finalizado el moldeado, se traslada el molde de vuelta al horno. Ahí estará durante 20 minutos a una temperatura de 60°C.
 8. **Rebarbado:** Cuando la pala sale del molde tiene una serie de rebabas que se eliminan empleando una rebarbadora.
 9. **Control de calidad n°1:** En este punto se realiza un control de calidad en el que se comprueba el peso de la pala y el aspecto superficial. Todas las palas que no cumplan con las tolerancias de peso o que tengan muescas superficiales irreparables son desechadas.
 10. **Limpiado:** Al salir de la rebarbadora, la pala esta sucia del polvo que crea la rebarbadora al lijar el material excedente. Es necesario limpiar la pala a fondo para poder llevar a cabo los siguientes procesos de la cadena.
 11. **Imprimación:** El proceso de imprimación se basa en la aplicación de un aerosol que proporciona un acabado superficial que favorece el proceso de pintura. No obstante, no todas las palas pasan por este proceso. Algunas palas, típicamente las que se venden a un precio más bajo, no pasan por este proceso y acceden directamente a la fase de calcas.
 12. **Enmasillado:** Es un proceso manual en el que se rellenan las imperfecciones/poros con una masilla.
 13. **Cámara de calor n°1:** Llegados a este punto, las palas de pádel requieren de un tiempo de secado previo a la pintura. Se introducen en una cámara de calor a una temperatura de 40°C. Es un proceso que además asegura la correcta curación del material compuesto.
 14. **Pintura:** Uno de los pocos procesos que pueden llevarse a cabo mediante maquinaria automática. Aún pudiendo realizarse automáticamente, requieren de la supervisión de un operario.
 15. **Calcas:** Uno de los procesos finales es la puesta de calcas. Es un proceso puramente estético que sirve principalmente para reforzar la imagen de marca. Las calcas

empleadas típicamente son calcas de agua, pero también se pueden emplear un tipo de calcas en seco o pegatinas muy resistentes.

- 16. Taladrado:** Es otro de los procesos automáticos en la fabricación de las palas. Según el modelo de pala se emplean brocas de distintos diámetros y se distribuyen los agujeros de distinta forma.
- 17. Cámara de calor n°2:** Las palas vuelven a entrar en la cámara de calor (a una temperatura de 40°C) para secarse durante 24 horas.
- 18. Lacado y/o Barnizado:** Una vez pintadas, taladradas y con las calcas puestas, se le aplica un barniz y/o lacado para obtener un acabado brillante, satinado o mate.
- 19. Cordón y Tapón:** Se introducen un tapón y un cordón de seguridad en la base de la pala (la FIP estipula que las palas han de tener un cordón de seguridad en caso de que al jugador se le escape la pala al golpear a la bola).
- 20. Control de calidad n°2:** Se vuelve a comprobar que el peso entre dentro de las tolerancias y se coloca un identificador. El identificador sirve para poder tener una trazabilidad del producto una vez salga de la fábrica.
- 21. Grip y plástico termo-retráctil:** Se añade un grip que proporcionará un buen agarre al jugador y un plástico termo-retráctil para identificar que la pala esta recién salida de la fábrica.

Capítulo 6. FASE DE INVESTIGACIÓN

6.1 SELECCIÓN DE MATERIALES

Una vez conocidos los materiales que conforman una pala de pádel actual, se deben de escoger los materiales que se emplearán para fabricar las probetas de nuestro ecodiseño. Como se ha dicho anteriormente, para llevar a cabo este proceso se empleará como soporte principal la base de datos de materiales de Granta EduPack. Ahora bien, la selección de materiales finales para fabricar las probetas estará condicionado por los materiales que se puedan comprar en el mercado.

6.2 GRANTA EDUPACK

El primer paso será seleccionar un amplio abanico de materiales de la base de datos de Granta, tanto para el núcleo como para el marco. Los materiales se seleccionarán en base a la información que se ha recogido examinando los materiales que conforman las palas actuales. En el caso de que se sepa específicamente uno de los materiales que se ha empleado, o las propiedades mecánicas de este, se tratará de seleccionar el material que más se le parezca.

6.2.1 SELECCIÓN DEL NÚCLEO

Comenzando por el núcleo y a sabiendas de que las palas se fabrican principalmente de espumas de polietileno y/o etilvinilacetato (EVA), se seleccionarán todas aquellas gomas compuestas de dichos materiales, que además tengan una densidad que pertenezca a la horquilla de los 20 – 50kg/m³ que se estableció anteriormente.

Ya que no existe un objetivo claro, en el sentido de que no se sabe concretamente las propiedades mecánicas ideales para fabricar la mejor pala de pádel, la selección del mejor material posible se realizará escogiendo todos los materiales que ofrezcan propiedades mecánicas muy similares al producto actual, pero que a su vez ofrezcan otras ventajas, ya sea: menor huella de carbono, mejor comportamiento ante temperaturas adversas, menor precio etc.

Gracias a la colaboración de StarVie, unos de los mejores fabricantes españoles de palas de pádel con diecinueve años de experiencia en el sector, se cuenta con polietileno expandido de 50kg/m³, material que se emplea en la fabricación de algunas de sus mejores palas. Por lo tanto, el material que se seleccionará en Granta EduPack como núcleo base será el PE de 50kg/m³. A continuación, la tabla con las gomas que serán objeto de estudio:

Tipo de espuma	Densidad (kg/m ³)
PE foam	30
PE foam	50
PE-HD foam	30
PE-LD foam	24
PE-LD foam	29
PE-LD foam	33
PE-LD foam	45

Tabla 6: Espumas sujetas al estudio del núcleo de una pala de pádel en Granta EduPack

El motivo por el cual únicamente aparecen polietilenos es porque todas las gomas de etilvinilacetato que aparecen en la base de datos del programa tienen una densidad media de aproximadamente 1000 kg/m^3 . No quiere decir que el material que emplean los fabricantes no exista, sino más bien que la espuma de etilvinilacetato de baja densidad no es tan común y no ha sido registrada en la base de datos del Granta Edupack.

La propiedad mecánica que más relevancia tendrá a la hora de escoger el núcleo ideal será el módulo de elasticidad o módulo de Young. El módulo de Young es un parámetro inherente a cada material que muestra la relación entre el incremento de tensión y los incrementos de deformación producidos en la zona de deformación elástica de la curva tensión-deformación de un ensayo de flexión, tracción o compresión [33]. En otras palabras, el módulo de Young es la pendiente de la recta en la zona elástica de la curva tensión-deformación y mide la rigidez de un material. Para el caso del núcleo de una pala de pádel, se puede estimar que el módulo de elasticidad será relativamente bajo. A continuación, el módulo de Young de los núcleos seleccionados:

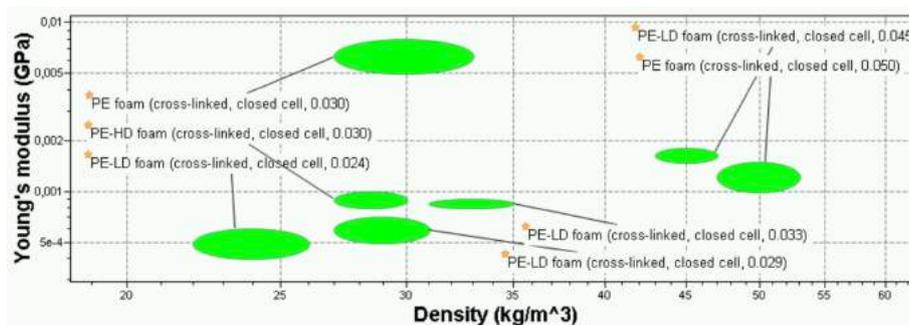


Figura 13: Módulo de Young de los distintos polietilenos expandidos

Como se puede observar, todos los materiales escogidos tienen un módulo de Young muy similar entre sí. Al ser los resultados tan semejantes, es complicado realizar un filtro de que materiales se podrían o no descartar, por lo que habrá que tomar una decisión en base a otras características de los materiales.

La primera característica para analizar será el precio. En la siguiente gráfica se puede ver el precio por kilogramo de material de las distintas foams:

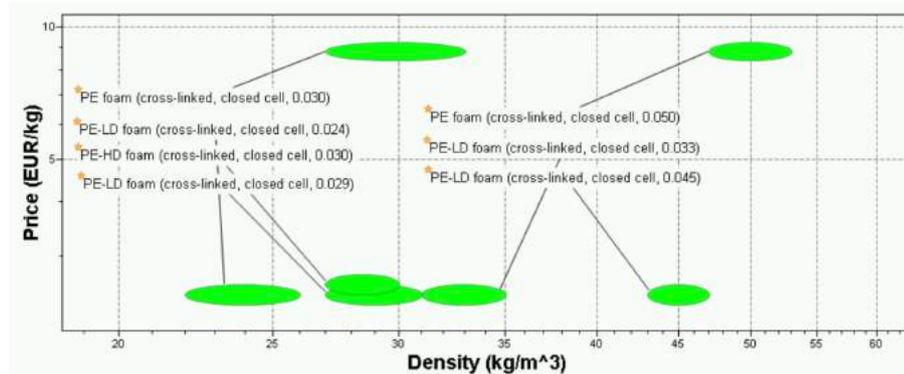


Figura 14: Precio de los distintos polietilenos expandidos

Al contrario que en la gráfica anterior, se puede ver una substancial diferencia de precios que divide los polietilenos sencillos de 30 y 50 kg/m³ del resto de espumas. Un factor como el precio podría ser motivo de suficiente como para descartar el producto actual y sustituirlo por otro más barato, siempre y cuando pueda ofrecer características similares y/o suficientes para garantizar un producto de la calidad adecuada.

El siguiente factor a tener en cuenta es otra propiedad mecánica. En este caso, la resistencia mecánica a la fatiga. ‘Se entiende por resistencia a la fatiga al comportamiento de deformación y fallo de un material bajo una carga cíclica [34]. Esta propiedad es de especial importancia ya que, en el deporte del pádel, el núcleo de la pala tiene que poder recibir continuamente la energía cinética que transmite la pelota en el impacto con la pala.

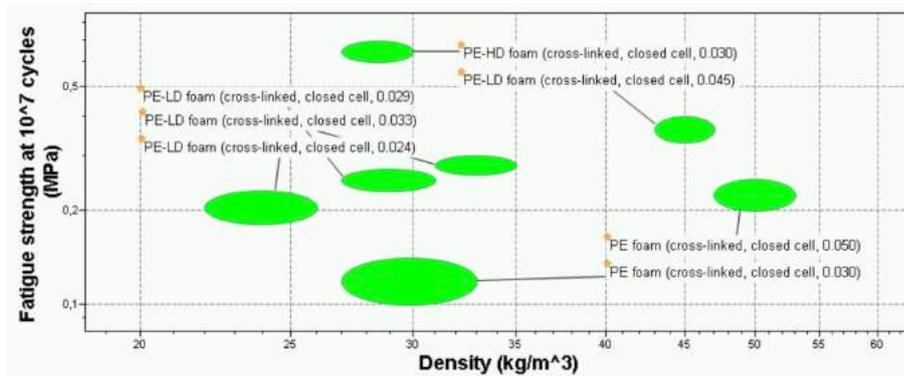


Figura 15: Resistencia a la fatiga de los distintos polietilenos expandidos

Por último y respetando la temática principal de este Trabajo de Fin de Grado, se va a examinar el impacto medioambiental de cada una de las espumas de polietileno.

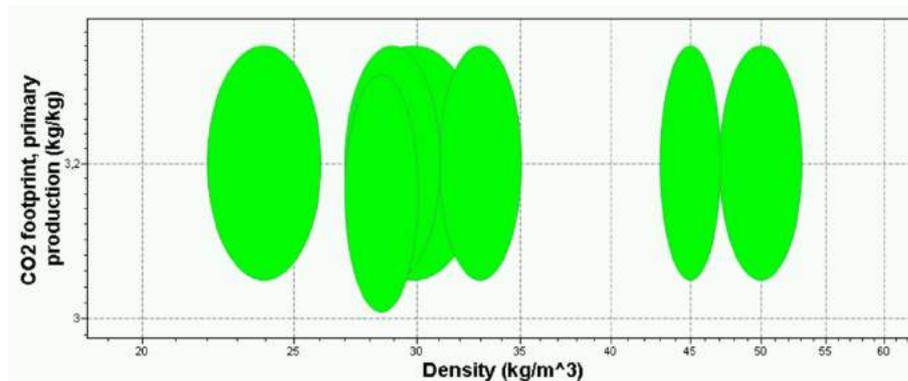


Figura 16: Huella de carbono de los distintos polietilenos expandidos

Resulta sencillo determinar que la huella de carbono no va a ser un factor importante en la selección del núcleo, ya que todas las espumas tienen una similitud casi total en lo que respecta a la huella de carbono. Existen otro tipo de factores medioambientales importantes que podrían ser relevantes como: el consumo de agua, la energía empleada o la reciclabilidad, no obstante, no se mostrarán gráficas porque al igual que sucede con la huella de carbono, todas las espumas se encuentran en una horquilla de valores muy acotada y por lo tanto, no son relevantes.

En base a los resultados obtenidos, resulta sencillo determinar que PE-HD 0.030 o polietileno reticulado de alta densidad (30 kg/m^3) es el material más adecuado para conformar el núcleo de una pala de pádel. A pesar del valor de esta información, para el análisis experimental se empleará el polietileno de 50 kg/m^3 proporcionado por StarVie. El motivo es que, aunque el PE-HD 0.030 tenga un precio 3 veces inferior al material actual y una resistencia a la fatiga muy superior, no se ha podido adquirir dicho material. Asimismo, puede que existan otro tipo de factores que no se hayan tenido en cuenta por los cuales los fabricantes opten por el polietileno de 50 kg/m^3 en lugar del polietileno reticulado de 30 kg/m^3 . Entre dichos posibles factores se encuentran: que el producto no se pueda conseguir fácilmente en el mercado, que el producto no se pueda obtener con el espesor adecuado para la fabricación de las palas, que la calidad sea inferior a la del polietileno de 50 kg/m^3 , que el material no permita que se puedan realizar los agujeros o que el material no facilite la adhesión de la resina epoxi y las fibras de materiales compuestos.

6.2.2 SELECCIÓN DEL MARCO

El procedimiento para la selección del marco se efectuará de manera muy similar a la del núcleo. Para el caso del marco, se seleccionará como material base una composición en disposición de panel sándwich de una capa de fibra de carbono y dos de vidrio (adheridas empleando resina epoxi). Se analizarán los distintos tipos de fibras naturales y se seleccionará la fibra que sea capaz de replicar en mejor medida las propiedades mecánicas del carbono y el vidrio. Al estar comparando fibras naturales con la fibra de carbono, es de esperar que las propiedades mecánicas sean complicadas de reproducir, pero, como ya se ha mencionado anteriormente, el objetivo de este TFG reside en sustituir el carbono por materiales con un impacto medioambiental inferior.

Al igual que para el caso del núcleo, el estudio mediante Granta Edupack servirá como base para la posterior adquisición de las fibras del marco, no obstante, el factor más decisivo a la hora de comprar los materiales será la facilidad y disponibilidad en el mercado.

En el estudio se incluirán todas las fibras naturales que aparecen en la base de datos del programa. A continuación, se puede ver una tabla con dichos materiales:

Tipo de fibra	Densidad (kg/m3)
Platano	1275
Bonote	1180
Algodón	1540
Lino	1470
Cañamo	1490
Pelo humano	1350
Yute	1480
Kenaf	992
Palmira	1490
Talipot	1490
Ramina	1500
Seda	1300
Sisal	1425
Azúcar	1250
Lana	1310
C-V-V	2530

Tabla 7: Fibras sujetas al estudio del marco de una pala de pádel en Granta EduPack

La primera y más notable diferencia es la substancial disimilitud entre la densidad del panel sándwich de carbono y vidrio ante el resto de las fibras naturales. En un principio, que la pala tenga un peso inferior de lo normal si que supone un problema, ya que puede afectar a la jugabilidad. Según un estudio realizado por un revista enfocada en el mundo del pádel, el peso optimo para una pala, esta acotado entre los 350-380 gramos [35].

Sin embargo, este factor tiene una relativamente fácil solución práctica que será simplemente aumentar el espesor del marco (añadir más material).

La primera propiedad mecánica que se analizará será el Módulo de Young. Tanto para el núcleo como para el marco, es de especial interés conocer la característica tensión-deformación del material en el tramo de deformación elástica. Al fin y al cabo, en el pádel, los materiales deben trabajar siempre en la zona de deformación elástica de la curva.

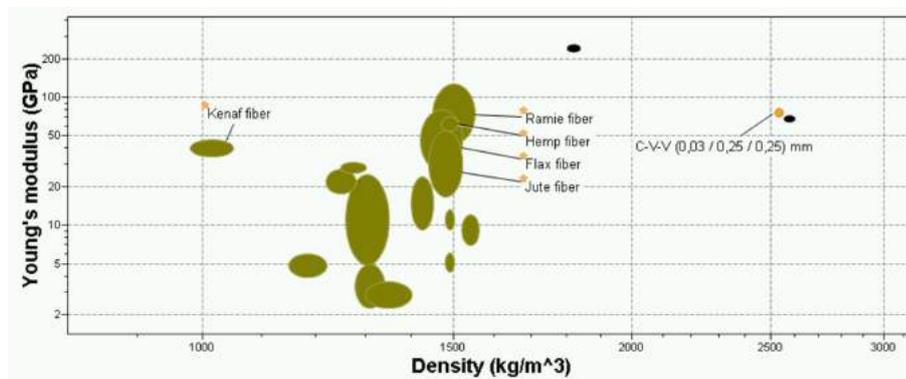


Figura 17: Módulo de Young de las distintas fibras

Con este primer estudio, se puede realizar la primera criba de materiales, ya que la gran mayoría de las fibras naturales poseen un módulo de Young muy inferior al que otorga la combinación del carbono y el vidrio. De aquí en adelante únicamente serán sujeto de estudio la ramina, el cáñamo, el lino y el yute. El kenaf, a pesar de entrar dentro del rango de valores seleccionados, se descarta por su baja densidad.

La siguiente propiedad que se evaluará es el comportamiento de los materiales ante el impacto. Para ello, se medirá la tenacidad los materiales. Como Granta Edupack no cuenta con una medida específica de tenacidad, *toughness* en inglés, el estudio se llevará a cabo analizando las gráficas del módulo de flexión y módulo de rotura.

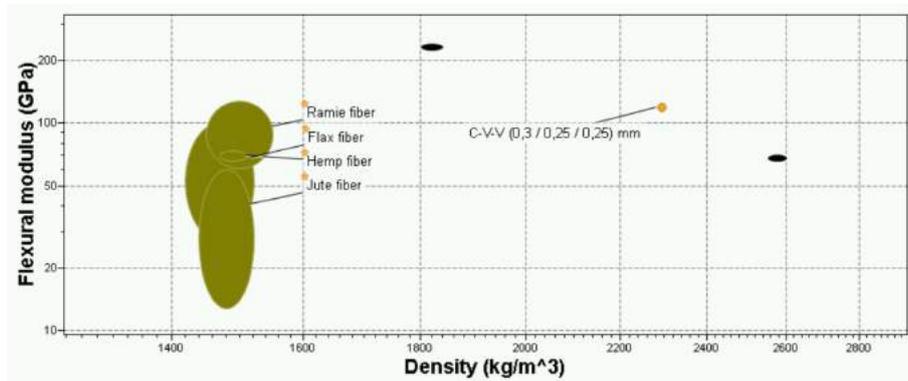


Figura 18: Módulo a flexión de las distintas fibras

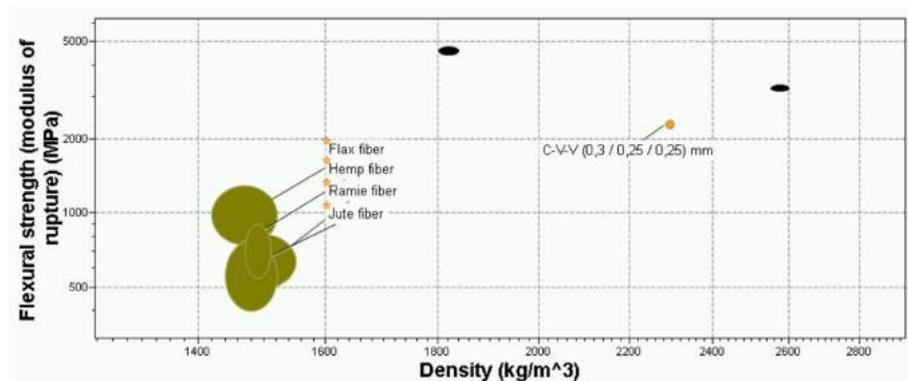


Figura 19: Módulo de rotura de las distintas fibras

En la Figura 13 se puede observar que el módulo a flexión de las fibras naturales no difieren a penas de la de carbono-vidrio. Sin embargo, la gráfica realmente importante y la que podría ser el principal motivo de fracaso de las fibras naturales es la Figura 14. Las palas de pádel han de estar diseñadas para que no se rompan ante impactos fuertes contra la pelota, de ahí la importancia de que el módulo de ruptura sea elevado. Como se puede ver en la figura 14, todas las fibras naturales tienen un módulo de ruptura de aproximadamente la mitad que el panel sándwich y la fibra que ofrece las mejores prestaciones es la de lino.

Por último, se empleará una gráfica para discutir los factores medioambientales y económicos sujetos a cada fibra:

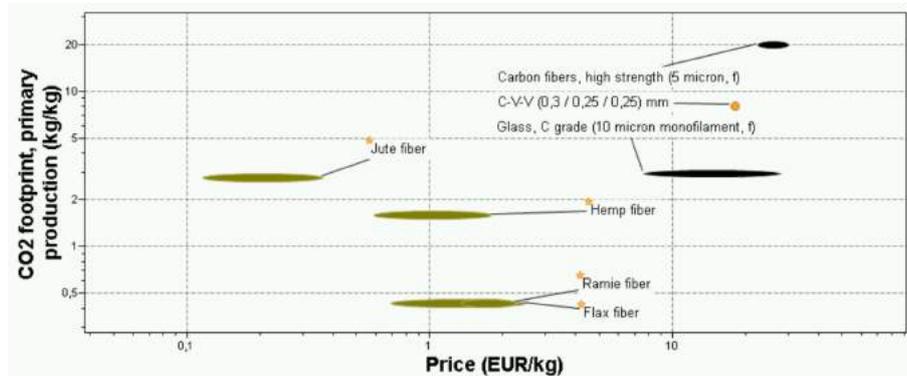


Figura 20: Gráfica precio-huella de carbono de las distintas fibras

Tal y como se ilustra en la Figura 15, la fibra de carbono por si sola tiene un importante impacto medioambiental, muy superior al resto de fibras mostradas en la gráfica. Aunque es cierto que al combinar el carbono con el vidrio se reduce notablemente la huella de carbono producida, sigue siendo hasta 20 veces superior que las alternativas ecológicas del lino y ramina. Con respecto precio la diferencia es incluso más significativa. Mientras que el panel de carbono y vidrio alcanza los 11 EUR/kg, el yute desciende hasta los 0,2 EUR/kg.

Una vez vistos los aspectos y propiedades más relevantes de las fibras naturales, se puede llevar a cabo una decisión de cuál es, teóricamente, la fibra ecológica más adecuada para poder sustituir al carbono en una pala de pádel. Por lo tanto, el material que se comprará por motivos de precio, propiedades mecánicas, impacto medioambiental y disponibilidad en el mercado, será la fibra de lino. La fibra de lino adquirida es el tejido de Lino FlaxDry BL 200, adquirida a través del distribuidor Castro Composites.

6.2.3 SIMULACIÓN DE LA PALA COMPLETA

Una vez seleccionada el lino la como fibra natural que se empleará en la fase experimental se procede a comprobar, mediante Granta Edupack, las posibles combinaciones de materiales que se podrán llevar a cabo para sacar el mejor partido de las propiedades mecánicas del lino, el carbono y el vidrio, que serán los materiales a las que tendremos acceso durante la fase experimental.

Para entender el comportamiento de los distintos materiales que componen la pala, se simularán desde la combinación que emplean las palas actuales (carbono, vidrio y vidrio) hasta la combinación más ecológica (empleando 3 capas de fibra de lino) y pasando por fases intermedias con una mezcla de hibrida entre ambos extremos. Las combinaciones de materiales que se llevarán a cabo serán las siguientes:

- Carbono, vidrio, vidrio, PE, vidrio, vidrio, carbono (C-V-V-PE-V-V-C)
- Carbono, lino, lino, PE, lino, lino, carbono (C-L-L-PE-L-L-C)
- Lino, carbono, carbono, PE, carbono, carbono, lino (L-C-C-PE-C-C-L)
- Lino, lino, lino, PE, lino, lino, lino (L-L-L-PE-L-L-L)

Tal y como se hizo en los ensayos anteriores, la primera propiedad mecánica que se comparará será el módulo de Young. A continuación, se muestra la gráfica densidad-módulo de Young de las distintas combinaciones.

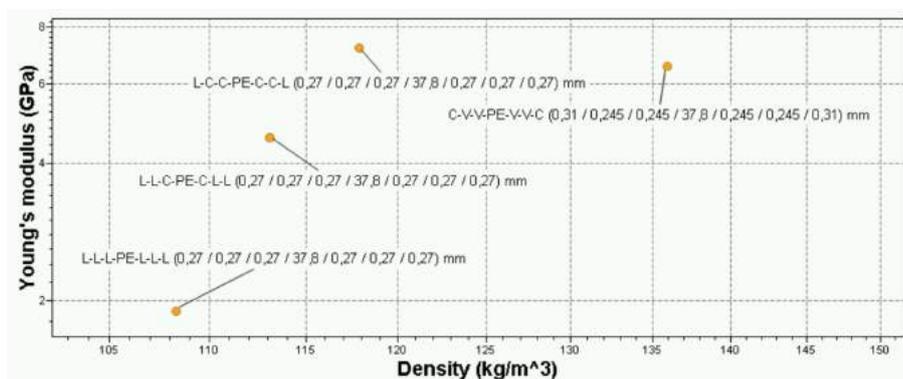


Figura 21: Gráfica densidad-módulo de Young de los paneles sándwich teóricos

Los datos obtenidos, a pesar de mostrarse bastante pesimistas para la triple combinación de lino, concuerdan con lo que se podría esperar después de analizar todos los materiales por separado. En vista de los resultados, se puede ver que la combinación de materiales de las palas actuales tiene un módulo de Young muy similar a la combinación creada de L-L-C-PE-C-L-L. No obstante, es cierto que difieren substancialmente en términos de su densidad, pero como se menciono anteriormente, una posible solución es añadir una capa adicional de fibra de lino. Esta solución no solo solucionaría el problema del peso de la pala, sino que incluso podría aportar ventajas mecánicas, como una mayor rigidez, al conjunto de la pala.

El siguiente paso será analizar la huella de carbono de las cuatro combinaciones diseñadas:

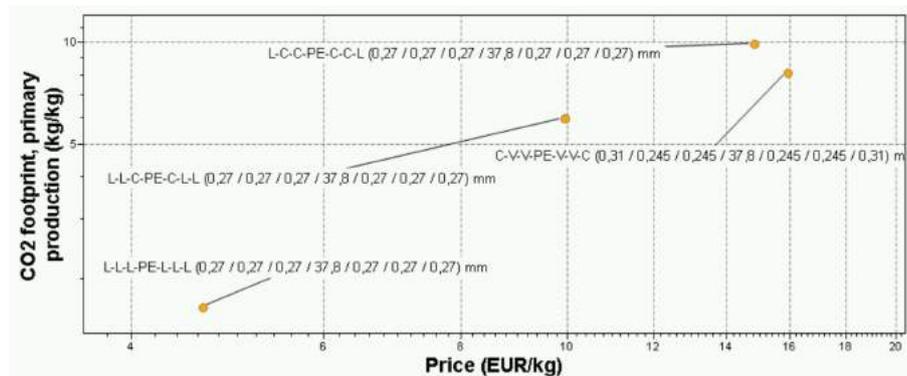


Figura 22: Gráfica densidad-módulo de Young de los paneles sándwich teóricos

Tal y como se esperaba, la combinación de triple fibra de lino es la opción más amigable con el medio ambiente. Como se puede observar, las combinaciones formadas por las dobles capas de fibra de carbono tienen hasta diez veces la huella de carbono de la opción más sostenible. En el punto intermedio se encuentra la variante formada por la doble capa de lino y la capa simple de carbono. Por lo que, a efectos teóricos, esta opción parece una buena solución tanto mecánica como medioambiental.

Capítulo 7. FASE EXPERIMENTAL Y RESULTADOS

7.1 FABRICACIÓN

La primera fase experimental del proyecto estará centrada en la fabricación de probetas para su posterior ensayo en los distintos equipos de ensayos mecánicos. Como se ha dicho con anterioridad, se fabricarán dos tipos de probetas. Por un lado, las probetas compuestas únicamente por el material compuesto y, por otro lado, las probetas de material compuesto con el núcleo interior de polietileno (replicado la pala de pádel real).

En primer lugar, se fabricarán y ensayarán las probetas sin el núcleo de polietileno. El motivo es que de esta forma se podrá tomar decisiones a lo largo de la fase experimental de que materiales pueden ser los más indicados para los paneles sándwich. Además, ya que el material del núcleo va a ser siempre el mismo (polietileno de 50 kg/m³), resulta práctico estudiar las configuraciones de los diferentes marcos.

Se fabricarán las planchas sin tener en cuenta el espesor necesario para realizar los ensayos normalizados, ya que se quiere conocer las propiedades de los materiales compuestos simulando el espesor que tendrían en su aplicación real. Una vez fabricados, simplemente se cortarán las suficientes probetas como para realizar un mínimo de cuatro ensayos. Seguidamente aparece enumerado la secuencia de pasos que se han seguido en el proceso de fabricación de las planchas:

- 1. Corte de las fibras:** El primer paso del proceso es cortar las distintas fibras con las dimensiones establecidas de 220x270mm. La dimensión final de las fibras será de 200x250mm, así que se fabrican con algo de margen para que después resulte más fácil realizar el corte.
- 2. Selección del molde:** Como molde se emplean dos placas de aluminio con un muy buen acabado superficial, de esta forma el acabado será mejor y por consiguiente las propiedades mecánicas de la plancha resultante.

3. **Enceramiento del molde:** Con el propósito de mejorar el desmoldamiento de la plancha de material compuesto, se aplica una cobertura de cera sólida industrial sobre la placa de aluminio y se retira hasta que se obtenga un acabado liso.
4. **Mezcla de epoxi:** se siguen estrictamente las proporciones establecidas por _____. Por cada 100 gramos de fibras (sintéticas o naturales), se emplean 150 gramos de mezcla de resina. De los 150 gramos de resina, un 75% de resina epoxi Resoltech 1200 y un 25% de catalizador para ayudar en el endurecimiento.
5. **Laminación manual:** Una vez la mezcla de epoxi y catalizador está uniformemente mezclada, se emplean una brocha y un rodillo para laminar una encima de otra las fibras según la configuración requerida. El proceso comienza con una de las placas de aluminio y termina con la otra (encerrando dentro la mezcla de fibras y resina).
6. **Curado:** Una vez finalizado el proceso de laminación, se coloca todo dentro de una bolsa de vacío y envuelto en una manta de absorción de resina.
7. **Corte:** Por último, se retira el molde de la bolsa, se desmolda y se corta la plancha con la geometría deseada de 200x250mm.

Una vez obtenidas las planchas con todas las combinaciones, se lleva a cabo un proceso de corte y lijado para obtener probetas con el mejor acabado y uniformidad posible. A continuación, se muestran las probetas terminadas:



Figura 23: Probetas de flexión (60x15mm) de todas las combinaciones de materiales fabricadas



Figura 24: Probetas de impacto (80x10mm) de todas las combinaciones de materiales fabricadas

Como se puede ver, se han fabricado una amplia cantidad de combinaciones distintas de fibras. Enumeradas de izquierda a derecha, se tiene:

- Lino, lino, lino (L-L-L)
- Lino, lino (L-L)
- Lino, carbono (L-C)
- Lino, vidrio (L-V)
- Carbono, vidrio (C-V)

En cuanto al proceso de fabricación de las probetas con núcleo de polietileno, es muy similar al descrito anteriormente. Lo único que cambia es que entre cada conjunto de laminas se introduce un núcleo de polietileno. Se han fabricado únicamente las combinaciones que mejores resultados han dado tras realizar los ensayos de los materiales anteriores.

En la siguiente imagen se pueden ver los paneles cortados en bloques de 200x250 mm:



Figura 25: Paneles sándwich de todas las combinaciones de materiales fabricadas

Las planchas sándwich enumeradas de izquierda a derecha están formadas por:

- Lino, lino, lino, polietileno, lino, lino, lino (L-L-L-PE-L-L-L)
- Lino, carbono, polietileno, carbono, lino (L-C-PE-C-L)
- Carbono, vidrio, polietileno, vidrio, carbono (C-V-PE-V-C)

7.2 ENSAYOS DE FLEXIÓN

Tal y como se ha descrito en el apartado de tecnologías, los ensayos de flexión se realizarán en la maquina S.A.E. Ibertest ELIB 20. La única diferencia entre los dos ensayos de flexión que se realizarán será que, para las probetas extraídas de las placas simples, se empleará un puente de flexión más pequeño que en caso de las probetas con núcleo de polietileno (que se usará el puente más grande).

7.2.1 ENSAYO DE PROBETAS SIMPLES

Más abajo, se adjunta una tabla con el valor de medio de longitud, anchura y espesor de las distintas probetas a ensayar. Las letras que se encuentran entre paréntesis simbolizan la cara por la que se ha realizado el ensayo (el material en cuestión estará orientado hacia arriba durante el ensayo).

Material	Distancia entre apoyos (mm)	Espesor medio (mm)	Anchura media (mm)
L-L	32	1,62	15,83
L-L-L	32	2,04	15,78
L-C (C)	32	1,34	15,43
L-C (L)	32	1,36	15,50
L-V	32	1,24	15,95
C-V	32	1,15	15,43

Tabla 8: Dimensiones medias de las probetas ensayadas según su composición

En cuanto a las configuraciones de la máquina que se han empleado, cabe destacar que la velocidad del ensayo no se ha escogido acorde a lo que dice la norma UNE-EN 2746, sino que se ha seleccionado para que la duración máxima del ensayo no superase los dos minutos. La velocidad de ensayo ha sido por lo tanto 5 mm/s.

A pesar de que se comentarán los resultados obtenidos de todas las distintas probetas, se mostrarán tan solo tres de las gráficas más representativas de los ensayos que se han realizado.

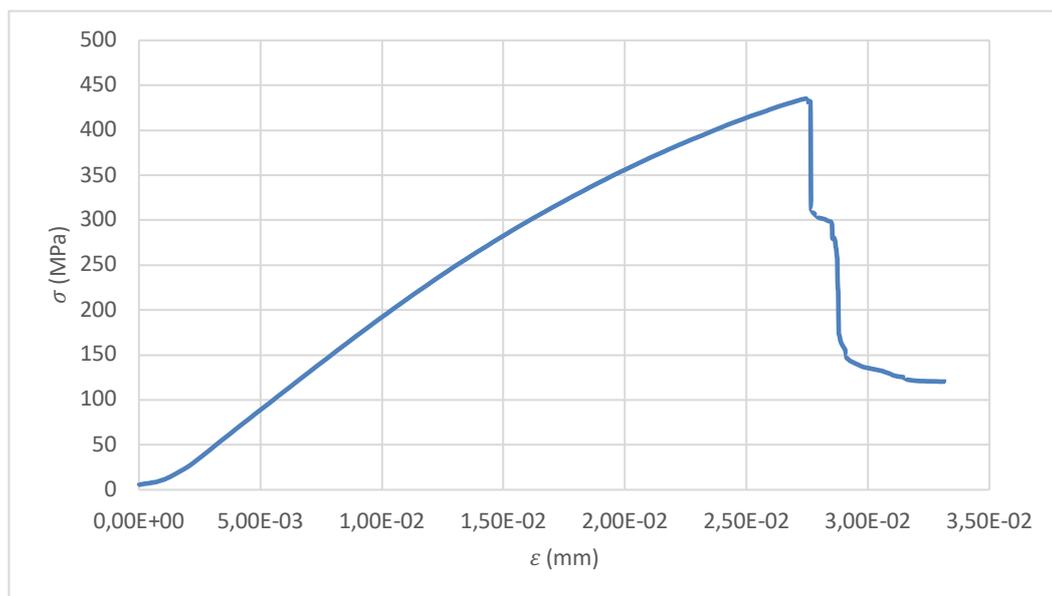


Figura 26: Gráfica tensión-deformación de una probeta C-V

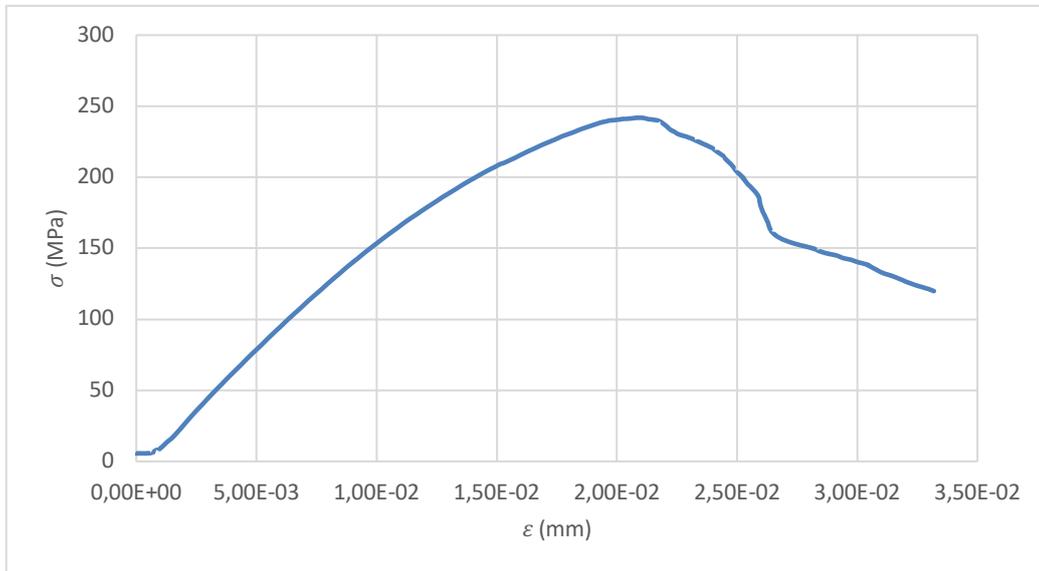


Figura 27: Grafica tensión-deformación de una probeta L-C-(C)

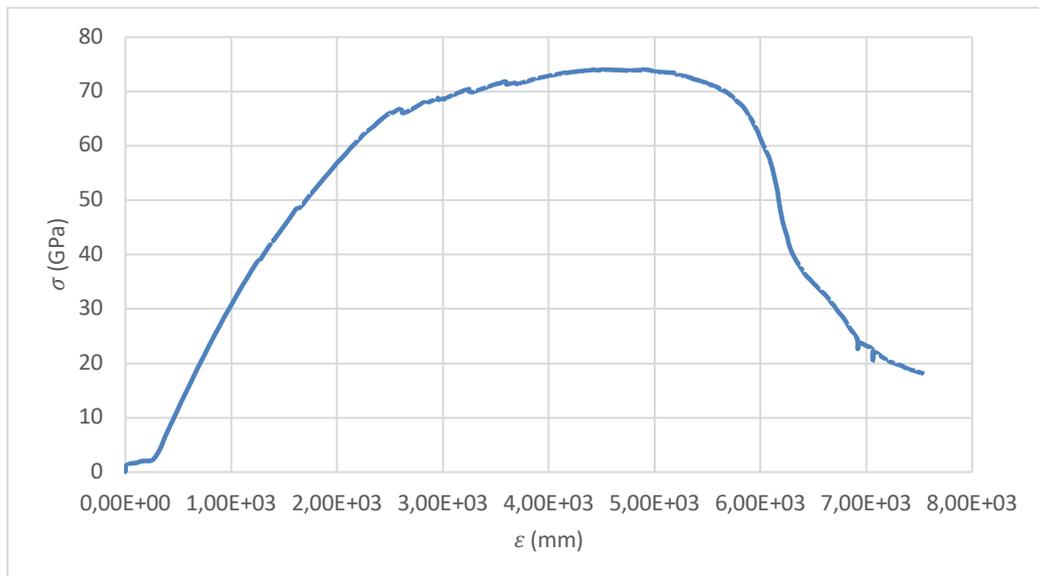


Figura 28: Grafica tensión-deformación de una probeta L-L

Analizando tan solo las gráficas mostradas, se observa fácilmente como afectan las propiedades mecánicas de los distintos materiales al conjunto que conforma la probeta. Se ve que la tensión que capaz de resistir la probeta fabricada de carbono-vidrio es sumamente superior a la de las probetas de lino-carbono y lino-lino, haciendo de esta combinación un material con una extremada resistencia a la flexión. En el otro extremo, se puede ver que las propiedades del lino a flexión no son del todo buenas. La tensión máxima que es capaz de soportar la probeta lino-lino a penas llega a la sexta parte de la del carbono-vidrio.

A pesar de los resultados tan negativos del lino, esto no concluye que no se pueda emplear el lino como material de fabricación para las palas de pádel. Al fin y al cabo, en el pádel, los materiales no necesariamente tienen que alcanzar unos niveles de resistencia tan altos.

Se procede a mostrar la tabla con los resultados y parámetros que se han obtenido ensayando todas las probetas. Los resultados obtenidos son la media de los cuatro ensayos que se han hecho por cada tipo de probeta distinta.

Material	Tensión máxima (Mpa)	Deformación máxima (mm)	Módulo (GPa)
L-L	75,7	0,073	3,63
L-L-L	90,2	0,086	3,76
L-C (C)	156,3	0,057	8,53
L-C (L)	185,1	0,097	8,44
L-V	175,9	0,077	7,77
C-V	390,7	0,036	17,18

Tabla 9: Tensión máxima, deformación máxima y módulo de flexión de las probetas ensayadas

Los resultados numéricos de los ensayos nos proporcionan una información muy similar a lo que se veía gráficamente. Cabe destacar el aumento significativo de la tensión máxima cuando se ensaya la probeta de lino-carbono por la cara del lino. Esto se debe muy probablemente a que al estar el lado de la fibra de carbono en el lado inferior (el lado que sufre mayor tracción) influyen más las propiedades del carbono a la hora de doblarse. Sin embargo, se puede ver que tan solo influye en la tensión máxima, porque el módulo de

Young es prácticamente el mismo independientemente de la cara por la que se haya ensayado.

Con respecto a la columna de la deformación máxima, se puede ver que, a excepción del caso de la probeta de lino, carbono (por el lado del lino), la deformación es mayor cuando mayor es el contenido de lino. El caso del lino, carbono (L) resulta bastante extraño, ya que al estar el carbono en el lado que más tracción sufre se podría pensar que la deformación debería de ser de las más bajas, pero resulta ser justo lo contrario.

7.2.2 ENSAYO DE PROBETAS SÁNDWICH

A continuación, se muestra una tabla con los valores medios de longitud, anchura y espesor de los distintos paneles sándwich fabricados.

Material	Distancia entre apoyos (mm)	Espesor medio (mm)	Anchura media (mm)
L-L-L-PE	150	40,7	48,9
L-C-PE	150	39,1	50,3
C-V-PE	150	39,6	48,4

Tabla 10: Dimensiones medias de los paneles sándwich ensayados según su composición

Cabe destacar que, para los tres diseños, el espesor es superior al de una pala de pádel. El motivo es que los materiales empleados para la fabricación de las probetas son considerablemente más gruesos que los empleados en las palas de pádel reales, esto se pudo comprobar en la visita a la fábrica. Mientras que el espesor de la fibra de carbono empleada en la fábrica es de 0,2 mm, la fibra de 3k del laboratorio de materiales tiene casi el doble de grosor.

Se programa una velocidad de ensayo de 20 mm/s. Es una velocidad muy alta para tratarse de un ensayo de flexión, pero como la duración media por ensayo a 20 mm/s era de tres minutos (porque al incorporar la espuma de polietileno el material era capaz de flexionarse bastante más que en el anterior ensayo) se decidió no seguir aumentando la velocidad.

Igual que para el ensayo anterior, se muestra a continuación dos de las gráficas obtenidas. Se analizarán los resultados en el próximo capítulo.

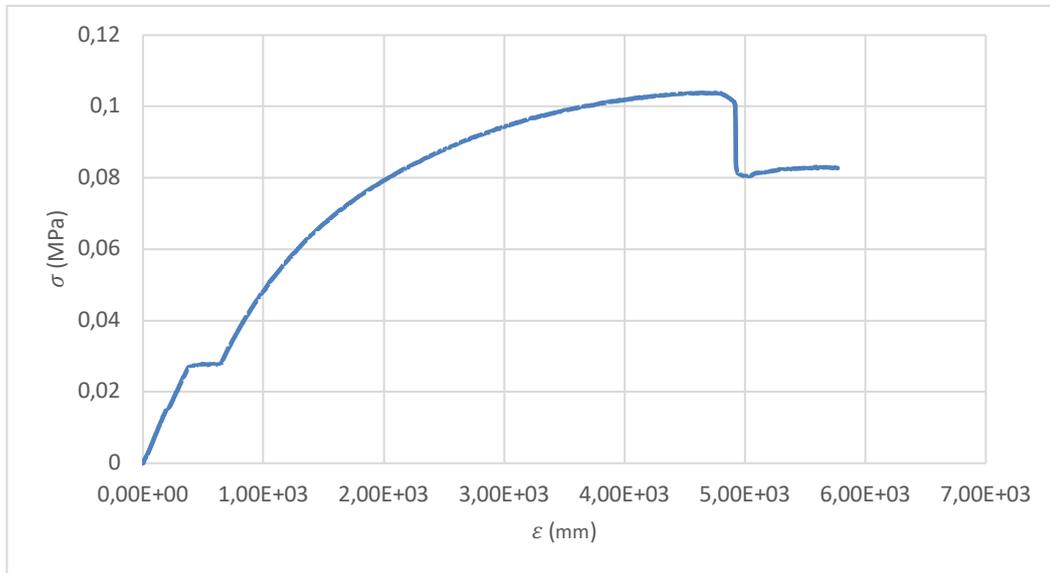


Figura 29: Grafica tensión-deformación del panel sándwich L-L-L-PE-L-L-L

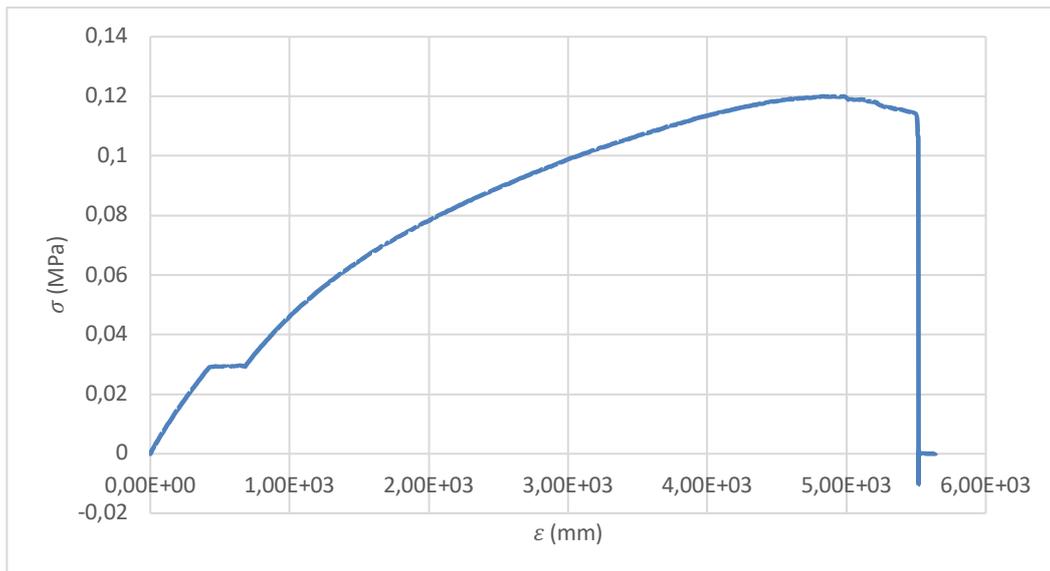


Figura 30: Grafica tensión-deformación del panel sándwich C-V-PE-V-C

Antes de comentar e interpretar las gráficas, se muestra la tabla con las propiedades mecánicas que se han extraído después de ensayar todas las probetas:

Material	Fuerza máxima (N)	Tensión máxima (MPa)	Deformación máxima (mm)	Módulo (MPa)
L-L-L-PE	177,90	0,1039	12,0	0,0305
L-C-PE	127,95	0,0798	13,8	0,0261
C-V-PE	231,05	0,1458	12,7	0,0287

Tabla 11: Fuerza, tensión y deformación máximas y módulo de flexión de las probetas ensayadas

Es especialmente interesante ver como introducir el núcleo de polietileno altera drásticamente las propiedades mecánicas del material. Se puede ver que la tensión máxima disminuye muy notablemente con respecto al ensayo anterior sin núcleo de polietileno. Por otro lado, la deformación responde inversamente. Mientras que deformación máxima antes no alcanzaba los 0,1mm, ahora supera los 13mm. Esto se debe a que para que se flexionen las capas de material compuesto antes debe hacerlo toda la espuma de polietileno.

Resulta también interesante ver la gran diferencia entre los resultados obtenidos experimentalmente comparados con los teóricos obtenidos mediante Granta Edupack. Mientras que experimentalmente se ha obtenido un módulo de Young que ronda los 0,03 MPa, los resultados de Granta Edupack rondaban los 4 MPa. El motivo de porque sucede esto no es esta claro, pero puede suceder que las condiciones de ensayo que estima Granta Edupack sean muy distintas a las del método de ensayo que se ha realizado en este proyecto. De cualquier forma, la diferencia es demasiado y dada la reputación y la fiabilidad del programa, es muy probable que el fallo provenga de la manera en la que se han realizado los ensayos en el laboratorio.

7.3 ENSAYO DE IMPACTO

El ensayo de impacto se llevará a cabo en la máquina de ensayos de impacto pendular Instron CEAST 9050. El ensayo se llevará a cabo empleando el martillo de 4J y la configuración que se empleará será la de flexión a tres puntos con impacto por péndulo Charpy.

La intención del ensayo de impacto es determinar la tenacidad de las distintas configuraciones de materiales al someterse a un impacto. Midiendo la diferencia entre la altura del martillo con respecto a la probeta antes y después del impacto y la masa del martillo se podrá obtener la energía que absorbe la probeta. La ejecución del ensayo se llevará a cabo siguiendo las indicaciones recogidas en la norma ISO 179-1 tal y como se ha descrito en el capítulo 2.

El ensayo trata de determinar la tenacidad a resistir la rotura de las probetas. No obstante, eso no quiere decir que todas las probetas vayan a romper. El dato significativo que se obtendrá del ensayo será la energía absorbida por la probeta. A continuación, se muestra una tabla con las dimensiones de las probetas que se han ensayado:

Material	Distancia entre apoyos (mm)	Espesor medio (mm)	Anchura media (mm)
L-L	60,0	1,6	11,0
L-L-L	60,0	2,2	10,5
L-C-(L)	60,0	1,4	11,0
L-V	60,0	1,1	11,2
C-V	60,0	1,4	10,3

Tabla 12: Dimensiones medias de las probetas de impacto según su composición

Se puede ver que, tal y como se explicaba en el capítulo 2, el espesor de las probetas no tiene el valor de 4mm constante que establece la norma. Podría ser un factor representativo a la hora de comparar los resultados, pero se espera que no influya de manera categórica.

A continuación, se muestra los valores de energía absorbida media y resistencia al impacto media de todos los ensayos realizados (se han realizado cuatro ensayos por cada combinación de materiales):

Material	Energía absorbida (J)	Resistencia al impacto (kJ)
L-L	0,3080	17,47
L-L-L	0,3458	15,22
L-C-(L)	0,7813	50,37
L-V	0,2398	19,47
C-V	0,7315	50,72

Tabla 13: Energía absorbida y resistencia al impacto de las distintas probetas

Al igual que sucedía en los ensayos de flexión sigue siendo muy característica la diferencia entre la probeta formada por el carbono-vidrio y las formadas únicamente por lino. Tanto la energía absorbida como la resistencia al impacto son notablemente más altas para las probetas que contienen carbono.

También es destacable el buen comportamiento ante el impacto de las probetas de lino-carbono. A pesar de los mediocres resultados del lino en los ensayos de flexión. se puede ver que para este caso en particular de lino-carbono, los resultados son verdaderamente positivos. Pero al igual que para los casos anteriores, los buenos o malos resultados no implican necesariamente que el material vaya a encajar bien o mal en una pala de pádel, el conjunto de resultados serán los que permitan determinar dicha declaración.

7.4 ENSAYO DE REBOTE DE UNA PELOTA

Como se mencionaba en el capítulo segundo, este ensayo se trata de un ensayo completamente original y personalizado. El objetivo es obtener una característica muy particular de los paneles sándwich que se han fabricado, el rebote. Al tratarse de una propiedad que no está recogida como tal entre las propiedades mecánicas de los materiales, se ha diseñado este experimento (explicado con mayor detalle en el capítulo 2) que en mayor o menor medida trata de replica un ensayo de impacto a baja velocidad.

Analizando la reproducción a cámara lenta del ensayo, se podrá medir la altura antes y después del impacto contra la probeta y por lo tanto calcular la energía absorbida. Se espera que el rebote de la probeta de lino se aproxime al rebote de la probeta fabricada de carbono y vidrio (el modelo que simula una pala actual).

Antes de mostrar la tabla con los resultados obtenidos del ensayo, es importante recordar que la formula empleada para calcular la energía absorbida por el panel sándwich es la siguiente:

$$\tau = P_{pelota} * g * (h_i + h_f)$$

Donde:

$$P_{pelota} = 0,054kg$$

$$g = 9,81 m/s^2$$

$$h_i = 1,4 m$$

A continuación, la tabla con los resultados obtenidos del ensayo:

Material	Altura inicial (mm)	Altura final media (mm)	Energía absorbida (J)
L-L-L-PE	1400	851	0,2907
L-C-PE	1400	938	0,2450
C-V-PE	1400	924	0,2523
PE	1400	833	0,3006

Tabla 14: Energía absorbida en el rebote de una pelota contra la superficie de los distintos paneles sándwich

Contra todo pronóstico, los resultados obtenidos son del todo desconcertantes. Se esperaba que en las probetas con los materiales más flexibles (lino), la pelota sería capaz de rebotar más, ya que la flexibilidad de dichos materiales permitiría que actuase como un muelle, lanzando la pelota despedida a mayor altura (en comparación con los materiales menos flexible).

Los resultados solo pueden significar una cosa y es que la combinación carbono-vidrio es más flexible que la de carbono-lino o lino-lino-lino. Por lo tanto, se demuestra aquí las estupendas propiedades de flexibilidad que el vidrio aporta al carbono cuando se combinan ambos materiales. No obstante, se puede ver que no hay una gran diferencia de resultados entre las combinaciones de carbono-vidrio y lino-carbono. Se confirma por lo tanto la similitud de las propiedades del lino con las del vidrio cuando están combinados con carbono.

Cabe destacar también la gran diferencia entre el dato de energía absorbida del ensayo normalizado con el péndulo Charpy y de el ensayo de la pelota. Para el ensayo con péndulo Charpy, los materiales más flexibles como el lino-vidrio absorben una cantidad de energía mucho menor que el resto de las combinaciones, principalmente porque el material se dobla lo suficiente como para atravesar el puente de apoyo (y por supuesto, no absorbe apenas la energía del martillo). Mientras tanto, en el ensayo de la pelota, los materiales que menos energía absorben son los que permiten el máximo bote de la pelota. Es algo evidente, pero que puede llegar a causar confusión.

Capítulo 8. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Desde el principio de este proyecto se ha propuesto la fibra de lino como el material natural capaz de solventar el problema al que se enfrentaba medioambientalmente la fabricación de palas de pádel. Una vez finalizadas las fases teóricas y experimentales de este proyecto se puede llevar a cabo una recogida de resultados y elaboración de una conclusión acerca de si la fibra de lino puede o no sustituir al carbono y al vidrio como refuerzo principal en la fabricación del marco de una pala de pádel.

Se recuerda que a lo largo de la fase experimental se han llevado a cabo tres experimentos diferentes en los que se han ensayado probetas compuestas de fibras distintas que simulaban el corte de una pala de pádel. Los ensayos que se han llevado a cabo son los de flexión, impacto y un tercer ensayo completamente original basado en el rebote de una pelota sobre la superficie de las ‘palas’ que se han fabricado en el laboratorio. La intención con la que se han realizado los ensayos ha sido extraer información útil sobre las propiedades y el comportamiento mecánico de los materiales para poder identificar si el lino realmente valido.

Cabe destacar que en ningún momento se esperaba que el lino fuese capaz de mejorar las increíbles y ya demostradas propiedades mecánicas de carbono. La premisa inicial de la que se ha partido ha sido que cabía la posibilidad de que las propiedades mecánicas ofrecidas por el lino pudiesen garantizar una buena jugabilidad sin tener que recurrir necesariamente al carbono. Si es así, se lograría disminuir notablemente la huella de carbono producida en la fabricación de una raqueta.

Analizando los resultados obtenidos, resulta complicado hacer una declaración rotunda de el papel exacto que podría llegar a tener la fibra de lino dentro del marco de una pala de pádel. Lo que si que se ha podido determinar es que las propiedades mecánicas del lino, en términos de tenacidad, resistencia o rigidez, no son mínimamente comparables a las de la fibra de carbono. Sin embargo, lo que si queda demostrado es que el lino, acompañado del

carbono tiene unas propiedades muy similares a las de la combinación carbono-vidrio. Es cierto que esto solo se ha podido demostrar estos en los ensayos de impacto y el del bote, ya que en el de flexión seguía siendo muy superior el carbono-vidrio.

En cualquier caso, el problema de la combinación carbono-lino es que su impacto medioambiental es muy similar al del carbono-vidrio. El motivo es que medioambientalmente la fibra de vidrio se comporta relativamente bien. Evidentemente, la fibra de lino tiene mayores ventajas medioambientales, pero al comparar carbono-lino y carbono-vidrio, el problema principal sigue siendo el carbono.

Llegados a este punto en el que realmente no se ha llegado a una conclusión en claro, lo mejor que se puede hacer es discutir los posibles ensayos y futuros cambios a los que se podría someter este proyecto para obtener la respuesta que trata de resolver este Trabajo de Fin de Grado. La solución práctica más inmediata sería fabricar una pala de pádel a partir del lino (con la forma y dimensiones de una raqueta real) y someterlas a ensayos muy específicos que estuviesen orientados al tipo de esfuerzos a los que esta sometida una pala de pádel auténtica.

Un ensayo que podría haber sido de gran utilidad habría sido el de fatiga. Someter a las probetas a una carga cíclica permitiría simular el comportamiento de las fibras a un esfuerzo continuo en el tiempo (como si se tratase del impacto reiterado de una pelota contra la superficie de la pala). Otro aspecto clave que se podría haber estudiado habría sido emplear múltiples tipos distintos de fibra de lino. El motivo principal es que examinando las probetas rotas que contenían fibra de lino, se ha podido ver que la orientación de las fibras probablemente no sea la óptima. Bajo el microscopio se puede ver que las fibras de lino en lugar de estar orientadas en mallas con los filamentos distribuidos en paralelo (como en la fibra de carbono) están retorcidos, se puede ver mejor en la figura mostrada a continuación:



Figura 31: Imagen al microscopio de las fibras de lino y carbono

Al microscopio se pueden claramente ver las diferencias entre ambos tejidos. Mientras que la fibra de carbono es un tejido compacto y uniforme, el lino deja muchos espacios entre cada cordón de filamentos. También se puede ver que el carbono rompe con mayor fragilidad que el lino. Si la orientación de las fibras de lino se pareciese más a la del carbono, muy probablemente se obtendrían unas propiedades mecánicas muy superiores a las actuales.

Uno de los materiales que se ha tratado adquirir sin éxito es precisamente una de las fibras de lino que fabrica una startup suiza llamada Bcomp. Su particularidad es que la orientación de las fibras es muy similar a la orientación biaxial tradicional (como el carbono). Para futuros estudios, se propone adquirir y estudiar las propiedades de esta fibra en particular.

En definitiva, en este proyecto se ha podido estudiar en profundidad las características mecánicas del lino. A pesar de que los resultados que se han obtenido no han sido los más favorables para responder a la pregunta de si se puede fabricar una pala de pádel de lino, a

dado lugar al aprendizaje y la puesta en práctica de numerosas habilidades tanto de investigación como otras más mecánicas y enfocadas a la fabricación.

Capítulo 9. BIBLIOGRAFÍA

- [1] B. J. S.-A. Martínez, «Historia del pádel = History of padel», *Mater. Para Hist. Deporte*, vol. 0, n.º 11, Art. n.º 11, oct. 2013.
- [2] «Pickleball Participation Report 2019». https://www.sfia.org/reports/798_Pickleball-Participation-Report-2017 (accedido may 25, 2021).
- [3] J. C. Ruiz, *Iniciación al Pádel: Cuaderno Didáctico*. Wanceulen S.L., 2009.
- [4] «Federación Española de Padel · FEP». <https://www.padelfederacion.es/Home> (accedido may 25, 2021).
- [5] «PadelFip – International Padel Federation». <https://www.padelfip.com/es/> (accedido may 25, 2021).
- [6] «Home | World Padel Tour», *worldpadeltour.com*. <https://www.worldpadeltour.com/> (accedido may 25, 2021).
- [7] AJPP, «Pagina Inicio», *AJPP*. <http://ajpp.com.ar/> (accedido may 25, 2021).
- [8] «Infographic: Padel: The Biggest Sport You've Never Heard Of», *Statista Infographics*. <https://www.statista.com/chart/18041/growth-of-padel-around-the-world/> (accedido may 25, 2021).
- [9] «ITF - ITF Global Tennis Report 2019: Overview». <http://itf.uberflip.com/i/1169625-itf-global-tennis-report-2019-overview/13?> (accedido may 25, 2021).
- [10] M. Hagl, «Introducción al tenis con paleta de madera», *Educ. Física Deporte*, vol. 3, n.º 3, pp. 34-42, 1981.
- [11] Z. Rivera Muñoz, «Water, energy and carbon footprints of a pair of leather shoes», jun. 2013, Accedido: may 27, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/19862>
- [12] L. Cheah *et al.*, «Manufacturing-focused emissions reductions in footwear production», *J. Clean. Prod.*, vol. 44, pp. 18-29, abr. 2013, doi: 10.1016/j.jclepro.2012.11.037.
- [13] X. P. C. Vergé, D. Maxime, J. A. Dyer, R. L. Desjardins, Y. Arcand, y A. Vanderzaag, «Carbon footprint of Canadian dairy products: Calculations and issues», *J. Dairy Sci.*, vol. 96, n.º 9, pp. 6091-6104, sep. 2013, doi: 10.3168/jds.2013-6563.
- [14] J. E. Hermansen y T. Kristensen, «Management options to reduce the carbon footprint of livestock products», *Anim. Front.*, vol. 1, n.º 1, pp. 33-39, jul. 2011, doi: 10.2527/af.2011-0008.
- [15] «The carbon impact of everyday activities | OVO Energy». <https://www.ovoenergy.com/blog/green/carbon-footprint-conundrum.html>, <https://www.ovoenergy.com/blog/green/carbon-footprint-conundrum.html> (accedido may

28, 2021).

[16] «New Study: Large CO2 Emissions From Batteries Of Electric Cars», *The Global Warming Policy Forum*, jun. 12, 2017. <https://www.thegwpcf.com/new-study-large-co2-emissions-from-batteries-of-electric-cars/> (accedido may 27, 2021).

[17] «La fascinante historia de los materiales plásticos compuestos», *La fascinante historia de los materiales plásticos compuestos*, ago. 01, 2018. <https://www.greelane.com/es/ciencia-tecnología-matemáticas/ciencia/history-of-composites-820404> (accedido jul. 13, 2021).

[18] «La fibra de carbono», *Clickmica*. <https://clickmica.fundaciondescubre.es/conoce/descubrimientos/la-fibra-carbono/> (accedido jul. 13, 2021).

[19] «Una breve historia sobre la fibra de carbono - Graffit Eyewear», *Gafas de sol de fibra de carbono - Graffit Eyewear*, abr. 15, 2020. <https://graffit-eyewear.com/una-breve-historia-sobre-la-fibra-de-carbono/> (accedido jul. 13, 2021).

[20] C. A. Boynard y J. R. M. D’Almeida, «MORPHOLOGICAL CHARACTERIZATION AND MECHANICAL BEHAVIOR OF SPONGE GOURD (*LUFFA CYLINDRICA*)–POLYESTER COMPOSITE MATERIALS», *Polym.-Plast. Technol. Eng.*, vol. 39, n.º 3, pp. 489-499, may 2000, doi: 10.1081/PPT-100100042.

[21] C. Alves *et al.*, «Eco-composite: the effects of the jute fiber treatments on the mechanical and environmental performance of the composite materials», *J. Compos. Mater.*, vol. 45, n.º 5, pp. 573-589, mar. 2011, doi: 10.1177/0021998310376111.

[22] L. Reyes, «Porsche quiere poner fin a la fibra de carbono: atento a esta fibra totalmente sostenible». <https://www.autonocion.com/porsche-quiere-poner-fin-a-la-fibra-de-carbono-atento-a-esta-fibra-totalmente-sostenible/> (accedido feb. 23, 2021).

[23] A. Gallais, «Next-Generation Wooden Racket», US20140038754A1, feb. 06, 2014. Accedido: feb. 23, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://patents.google.com/patent/US20140038754A1/en>

[24] Ç. Uzay, D. Acer, N. Geren, y A. Çetin, «Evaluation of Flexural Stiffness for the Lightweight Polymer Foam Core Sandwich Structures», vol. 6, pp. 36-40, nov. 2018.

[25] «PALA BULLPADEL HACK 21», *Bullpadel | Tienda de Pádel Online*. <https://www.bullpadel.com/es/1115-pala-bullpadel-hack-21.html> (accedido jun. 28, 2021).

[26] «Tritón 2021». <https://www.starvie.com/es/triton-2021.html> (accedido jul. 05, 2021).

[27] «Tejido de Lino FlaxDry BL 200, 200 g/m²», *Castro Composites*. <https://www.castrocompositesshop.com/es/fibras-de-refuerzo/2851-200-gm2-tejido-de-lino-flaxdry-bl-200-ancho-100-cm.html> (accedido jun. 30, 2021).

[28] «ampliTex™», *Bcomp*, mar. 20, 2020. <https://www.bcomp.ch/products/amplitex/> (accedido jun. 30, 2021).

[29] «Tejido de vidrio tafetán UTE 200P de 200 g/m²», *Castro Composites*.

<https://www.castrocompositesshop.com/es/fibras-de-refuerzo/1190-200-gm2-tejido-de-vidrio-tafet%C3%A1n-ute-200p.html> (accedido jun. 30, 2021).

[30] «Tejido de carbono 3K sarga 2x2 y 200 g/m2», *Castro Composites*.

<https://www.castrocompositesshop.com/es/fibras-de-refuerzo/2371-tejido-de-carbono-3k-sarga-2x2-y-200-gm2-ancho-100-cm.html> (accedido jun. 30, 2021).

[31] ¿Cómo se elaboran las palas de pádel? ¡Visitamos la fábrica de StarVie!

Accedido: may 28, 2021. [En línea Video]. Disponible en:

<https://www.youtube.com/watch?v=3KThf9xQRPQ>

[32] P. Jawahar y M. Balasubramanian, «Preparation and Properties of Polyester-Based Nanocomposite Gel Coat System», *J. Nanomater.*, vol. 2006, p. e21656, ene. 2007, doi: 10.1155/JNM/2006/21656.

[33] «Young's Modulus - an overview | ScienceDirect Topics».

<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/youngs-modulus> (accedido jul. 12, 2021).

[34] «What is a Fatigue Strength? - Definition from Corrosionpedia», *Corrosionpedia*.

<http://www.corrosionpedia.com/definition/494/fatigue-strength> (accedido jul. 12, 2021).

[35] P. W. Press, «Cómo elegir el peso correcto de tú pala de pádel | Padel World Press 2021». <https://padelworldpress.es/elegir-peso-correcto-pala-padel/> (accedido jul. 12, 2021).

[36] «Reglamentos y Normativas | FEP». <https://www.padelfederacion.es/Reglamentos> (accedido may 28, 2021).

ANEXO I: INFORMACIÓN GENERAL DE LA MADERA DE NOGAL

Walnut (*Juglans nigra*)

Physical properties

Density	(i)	550	-	680	kg/m ³
---------	-----	-----	---	-----	-------------------

Mechanical properties

Young's modulus	(i)	* 11,5	-	14	GPa
Specific stiffness	(i)	* 18	-	23,9	MN.m/kg
Yield strength (elastic limit)	(i)	* 46	-	56,2	MPa
Tensile strength	(i)	* 84,2	-	103	MPa
Specific strength	(i)	* 72,1	-	95,9	kN.m/kg
Elongation	(i)	* 1,99	-	2,43	% strain
Compressive strength	(i)	47	-	57,5	MPa
Flexural modulus	(i)	10,4	-	12,7	GPa
Flexural strength (modulus of rupture)	(i)	90,6	-	111	MPa
Shear modulus	(i)	* 0,85	-	1,04	GPa
Shear strength	(i)	8,5	-	10,4	MPa
Bulk modulus	(i)	* 0,72	-	0,81	GPa
Poisson's ratio	(i)	* 0,35	-	0,4	
Shape factor	(i)	5,2			
Hardness - Vickers	(i)	* 4,99	-	6,1	HV
Hardness - Brinell	(i)	* 49,2	-	60,1	HB
Hardness - Janka	(i)	* 4,99	-	6,1	kN
Elastic stored energy (springs)	(i)	* 82,5	-	126	kJ/m ³
Fatigue strength at 10 ⁷ cycles	(i)	* 27,2	-	33,2	MPa
Differential shrinkage (radial)	(i)	0,19	-	0,22	%
Differential shrinkage (tangential)	(i)	0,28	-	0,33	%
Radial shrinkage (green to oven-dry)	(i)	5	-	6,1	%
Tangential shrinkage (green to oven-dry)	(i)	7	-	8,6	%
Volumetric shrinkage (green to oven-dry)	(i)	11,5	-	14,1	%
Work to maximum strength	(i)	66,4	-	81,2	kJ/m ³

Impact & fracture properties

Fracture toughness		* 4,7	- 5,8	MPa.m ^{0.5}
Toughness (G)		* 1,73	- 2,67	kJ/m ²

Primary production energy, CO2 and water

Embodied energy, primary production		11,6	- 12,8	MJ/kg
Sources 0.5 MJ/kg (Ximenes, 2006); 2 MJ/kg (Ximenes, 2006); 9.1 MJ/kg (Hammond and Jones, 2008); 11.6 MJ/kg (Hubbard and Bowe, 2010); 23.7 MJ/kg (Ecoinvent v2.2); 26 MJ/kg (Ecoinvent v2.2)				
CO2 footprint, primary production		0,574	- 0,633	kg/kg
Sources 0.229 kg/kg (Ecoinvent v2.2); 0.412 kg/kg (Ecoinvent v2.2); 0.862 kg/kg (Hammond and Jones, 2008); 0.909 kg/kg (Hubbard and Bowe, 2010)				
Water usage		* 665	- 735	l/kg

ANEXO II: INFORMACIÓN GENERAL DE LA FIBRA DE CARBONO, LA ESPUMA DE POLIETILENO Y EL SÁNDWICH DE AMBOS

Resin impregnated carbon

Physical properties				
Density	ⓘ	1,7e3	- 2e3	kg/m ³
Porosity (closed)	ⓘ	* 0,02	- 0,05	%
Porosity (open)	ⓘ	0,005	- 0,05	%
Mechanical properties				
Young's modulus	ⓘ	17	- 22	GPa
Specific stiffness	ⓘ	9,03	- 12,2	MN.m/kg
Yield strength (elastic limit)	ⓘ	* 12	- 25	MPa
Tensile strength	ⓘ	* 12	- 25	MPa
Specific strength	ⓘ	* 6,47	- 13,6	kN.m/kg
Elongation	ⓘ	* 0,05	- 0,15	% strain
Compressive strength	ⓘ	120	- 250	MPa
Flexural modulus	ⓘ	17	- 22	GPa
Flexural strength (modulus of rupture)	ⓘ	35	- 80	MPa
Shear modulus	ⓘ	* 6,6	- 8,5	GPa
Bulk modulus	ⓘ	* 13,8	- 17,9	GPa
Poisson's ratio	ⓘ	* 0,24	- 0,35	
Shape factor	ⓘ	19,9		
Hardness - Vickers	ⓘ	36	- 75	HV
Elastic stored energy (springs)	ⓘ	* 4,09	- 14,7	kJ/m ³
Fatigue strength at 10 ⁷ cycles	ⓘ	* 14	- 16,4	MPa
Impact & fracture properties				
Fracture toughness	ⓘ	* 1	- 2	MPa.m ^{0.5}
Toughness (G)	ⓘ	0,0562	- 0,19	kJ/m ²

Primary production energy, CO2 and water

Embodied energy, primary production	①	* 228	- 251	MJ/kg
CO2 footprint, primary production	①	* 17,1	- 18,9	kg/kg
Water usage	①	* 7,03	- 7,77	l/kg

Processing energy, CO2 footprint & water

Advanced composite molding energy	①	* 10	- 22	MJ/kg
Advanced composite molding CO2	①	* 1,5	- 1,65	kg/kg
Advanced composite molding water	①	* 22,3	- 33,5	l/kg

Recycling and end of life

Recycle	①	✗		
Recycle fraction in current supply	①	0,1		%
Downcycle	①	✓		
Combust for energy recovery	①	✗		
Landfill	①	✓		
Biodegrade	①	✗		

PE foam (cross-linked, closed cell, 0.050)

Physical properties				
Density	①	47	- 53	kg/m ³
Relative density	①	0,048	- 0,054	
Cell type	①	Closed-cell		
Cells/volume	①	* 0,1	- 1	/mm ³
Anisotropy ratio	①	* 1	- 1,5	
Mechanical properties				
Young's modulus	①	* 0,001	- 0,0015	GPa
Specific stiffness	①	* 0,0199	- 0,0303	MN.m/kg
Yield strength (elastic limit)	①	0,035	- 0,04	MPa
Tensile strength	①	0,24	- 0,28	MPa
Specific strength	①	* 0,686	- 0,819	kN.m/kg
Elongation	①	49	- 53	% strain
Compressive modulus	①	* 0,0178	- 0,0201	GPa
Compressive strength	①	* 0,035	- 0,04	MPa
Compressive stress @ 25% strain	①	0,067	- 0,073	MPa
Compressive stress @ 50% strain	①	0,13	- 0,15	MPa
Flexural modulus	①	0,001	- 0,0015	GPa
Flexural strength (modulus of rupture)	①	* 0,035	- 0,04	MPa
Shear modulus	①	* 4e-4	- 7e-4	GPa
Shear strength	①	0,0175	- 0,02	MPa
Bulk modulus	①	* 0,001	- 0,0015	GPa
Poisson's ratio	①	* 0,24	- 0,28	
Shape factor	①	2,2		
Hardness - Vickers	①	* 0,0035	- 0,004	HV
Elastic stored energy (springs)	①	* 0,452	- 0,722	kJ/m ³
Fatigue strength at 10 ⁷ cycles	①	* 0,2	- 0,25	MPa
Densification strain	①	* 0,85	- 0,89	

Impact & fracture properties

Fracture toughness	ⓘ	* 0,022	- 0,027	MPa.m ^{0.5}
Toughness (G)	ⓘ	* 0,37	- 0,636	kJ/m ²

Primary production energy, CO2 and water

Embodied energy, primary production	ⓘ	* 88,4	- 97,5	MJ/kg
CO2 footprint, primary production	ⓘ	* 3,05	- 3,36	kg/kg
Water usage	ⓘ	* 216	- 239	l/kg

Processing energy, CO2 footprint & water

Polymer extrusion energy	ⓘ	* 5,39	- 5,94	MJ/kg
Polymer extrusion CO2	ⓘ	* 0,431	- 0,476	kg/kg
Polymer extrusion water	ⓘ	* 4,64	- 6,97	l/kg
Polymer molding energy	ⓘ	* 13,7	- 15,1	MJ/kg
Polymer molding CO2	ⓘ	* 1,09	- 1,21	kg/kg
Polymer molding water	ⓘ	* 10,5	- 15,7	l/kg
Coarse machining energy (per unit wt removed)	ⓘ	* 0,482	- 0,533	MJ/kg
Coarse machining CO2 (per unit wt removed)	ⓘ	* 0,0362	- 0,04	kg/kg
Fine machining energy (per unit wt removed)	ⓘ	* 0,546	- 0,604	MJ/kg
Fine machining CO2 (per unit wt removed)	ⓘ	* 0,041	- 0,0453	kg/kg
Grinding energy (per unit wt removed)	ⓘ	* 0,617	- 0,682	MJ/kg
Grinding CO2 (per unit wt removed)	ⓘ	* 0,0463	- 0,0512	kg/kg

Recycling and end of life

Recycle	ⓘ	✗		
Recycle fraction in current supply	ⓘ	0,1		%
Downcycle	ⓘ	✓		
Combust for energy recovery	ⓘ	✓		
Heat of combustion (net)	ⓘ	* 43,9	- 46,1	MJ/kg
Combustion CO2	ⓘ	* 3,06	- 3,22	kg/kg
Landfill	ⓘ	✓		
Biodegrade	ⓘ	✗		

Recycle mark



Panel tipo sándwich (Cara 1mm carbono / Núcleo 37mm PE)

Physical properties				
Density	i	132	- 138	kg/m ³
Mechanical properties				
Young's modulus	i	4,62	- 5,13	GPa
Yield strength (elastic limit)	i	23,6	- 28,2	MPa
Notes	Modo de fallo esperado = Ceden las caras			
Flexural modulus	i	0,00623	- 0,0109	GPa
Notes	Contribución debido a la cizalladura del núcleo = 99,94 %			
Flexural strength (modulus of rupture)	i	0,449	- 0,487	MPa
Notes	Modo de fallo esperado = Fallo del núcleo			
Primary production energy, CO2 and water				
Embodied energy, primary production	i	403	- 452	MJ/kg
CO2 footprint, primary production	i	27,8	- 31,1	kg/kg

ANEXO III: PALA DE PÁDEL REGLAMENTARIA

LA PALA

Se jugará con una pala reglamentaria de pádel por lo que la misma deberá ajustarse a cuanto se indica a continuación.

La pala se compone de dos partes: cabeza y puño.

- Puño: largo máximo: 20 cm, ancho máximo (de cada una de las horquillas, sin considerar el espacio vacío entre ellas): 50 mm, grosor máximo: 50 mm.

- Cabeza: largo: variable. El largo de la cabeza más el largo del puño no puede exceder de 45,5 cm, ancho máximo: 26 cm, grosor máximo: 38 mm.

El largo del total de la pala, cabeza más puño, no podrá exceder de 45,5 centímetros.

Al realizar el control de las medidas de la pala se permitirá una tolerancia en el grosor de la misma del 2,5 %.

La superficie destinada al golpeo estará perforada por un número no limitado de agujeros cilíndricos de 9 a 13 mm de diámetro cada uno en toda la zona central. Dentro de esa misma superficie podrá considerarse una zona periférica de 4 centímetros medidos desde el borde exterior de la pala, en donde los agujeros podrán tener otra forma o tamaño, siempre y cuando no afecten a la esencia del juego.

La superficie destinada al golpeo, igual en sus dos caras, podrá ser lisa o rugosa.

La pala estará libre de objetos adheridos y otros dispositivos, que no sean aquellos utilizados sólo y específicamente para limitar o prevenir deterioros, vibraciones y distribuir el peso. Cualquier objeto o dispositivo debe ser razonables en medidas y colocación para tales propósitos. La pala no puede ser motivo de distracción o molestia para los demás jugadores por lo que no podrá tener elementos reflectantes o sonoros que de cualquier modo alteren o puedan alterar el normal desarrollo del juego.

Deberá tener un cordón o correa no elástica de sujeción a la muñeca como protección contra accidentes. Su uso será obligatorio. Este cordón deberá tener una longitud máxima de 35 centímetros.

La pala debe estar libre de cualquier tipo de dispositivo que pueda comunicar, avisar o dar instrucciones de cualquier tipo al jugador, ya sea de forma visible o audible, durante el transcurso de un partido