



industriales  
etsii

Escuela Técnica  
Superior  
de Ingeniería  
Industrial

# UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Industrial

## ESTUDIO Y CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES ESTRUCTURALES PARA DRONES

**TRABAJO FIN DE GRADO**

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS  
INDUSTRIALES



Universidad  
Politécnica  
de Cartagena

**Autor: Jorge Martínez Martínez-Carrasco**

Director: Isidoro José Martínez Mateo

Cartagena, 04 de Octubre de 2020



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Significado de la palabra drone.....	1
Ilustración 2. Aparición de los primeros drones.....	2
Ilustración 3. The Queen Bee.....	5
Ilustración 4. Radioplane Shelduck en una exhibición.....	8
Ilustración 5. Chásis de un dron.....	12
Ilustración 6. Motor de un dron.....	14
Ilustración 7. Hélices de un dron.....	16
Ilustración 8. Brújula electrónica de un dron.....	18
Ilustración 9. Tren de aterrizaje de un dron.....	18
Ilustración 10. Sistema de grabación de un dron.....	19
Ilustración 11. Ejemplo de la curva tensión-deformación.....	30
Ilustración 12. Parámetros del ensayo de dureza Vickers.....	33
Ilustración 1. Flujos de energía en la producción de gránulos de PET.....	52
Ilustración 14. Espuma polimérica flexible (VLD).....	67
Ilustración 15. Espuma polimérica flexible (LD).....	67
Ilustración 16. Espuma polimérica flexible (MD).....	67
Ilustración 17. Espuma polimérica rígida (LD).....	68
Ilustración 18. Espuma polimérica rígida (MD).....	68
Ilustración 19. Espuma polimérica rígida (HD).....	68
Ilustración 20. Madera de balsa.....	73
Ilustración 21. Corcho.....	73
Ilustración 22. Espuma metálica.....	76
Ilustración 23. Fibra de carbono.....	89
Ilustración 24. Fibra de aramida (Kevlar 49).....	90
Ilustración 25. Fibra de vidrio.....	90
Ilustración 26. Polímero reforzado con fibra de carbono.....	95
Ilustración 27. Compuesto de carburo aluminio/silicio.....	95
Ilustración 2. Aleaciones del magnesio forjado.....	100
Ilustración 29. Aleaciones de aluminio forjado endurecidas por envejecimiento.....	101
Ilustración 30. Nanotubos de carbono.....	107
Ilustración 31. Grafeno.....	107

## ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Precio según tipo de material.....	22
Gráfica 2. Densidad según tipo de material.....	23
Gráfica 3. Fecha de primer uso según tipo de material.....	25
Gráfica 4. Relación tensión-deformación.....	25
Gráfica 5. Módulo de Young según tipo de material.....	27
Gráfica 6. Módulo de elasticidad transversal según tipo de material.....	27
Gráfica 7. Módulo de compresibilidad según tipo de material.....	28
Gráfica 8. Coeficiente de Poisson según tipo de material.....	28
Gráfica 9. Límite elástico según tipo de material.....	31
Gráfica 10. Tensión de rotura según tipo de material.....	31
Gráfica 11. Esfuerzo de compresión según tipo de material.....	32
Gráfica 12. Deformación según tipo de material.....	32
Gráfica 13. Dureza Vickers según tipo de material.....	34
Gráfica 14. Resistencia a la fractura según tipo de material.....	35
Gráfica 15. Tensión de rotura en función de los ciclos de fatiga.....	35
Gráfica 16. Resistencia a la fatiga a los $10^7$ ciclos según el tipo de material.....	36
Gráfica 17. Coeficiente de pérdida mecánica según tipo de material.....	37
Gráfica 18. Diferencia de potencia en función de la temperatura.....	38
Gráfica 19. Punto de fusión según tipo de material.....	38
Gráfica 20. Temperatura de transición vítrea según tipo de material.....	39
Gráfica 21. Temperatura de operación máxima según tipo de material.....	40
Gráfica 22. Temperatura de operación mínima según tipo de material.....	41
Gráfica 23. Conductividad térmica según tipo de material.....	42
Gráfica 24. Energía aportada por kilogramo en función de la temperatura.....	43
Gráfica 25. Calor específico según tipo de material.....	43
Gráfica 26. Coeficiente de expansión térmica según tipo de material.....	44
Gráfica 27. Resistividad eléctrica según tipo de material.....	45
Gráfica 28. Constante dieléctrica según tipo de material.....	46
Gráfica 29. Evolución de la tensión e intensidad en función del tiempo.....	47
Gráfica 30. Factor de disipación según tipo de material.....	47
Gráfica 31. Carga en función de la diferencia de potencial.....	48
Gráfica 32. Rigidez eléctrica según tipo de material.....	48

Gráfica 33. Procesabilidad en función de los tipos de metales.....	50
Gráfica 34. Moldeabilidad según tipo de material.....	51
Gráfica 35. Colabilidad según tipo de material.....	51
Gráfica 36. Soldabilidad según tipo de material.....	52
Gráfica 37. Energía gris según tipo de material.....	53
Gráfica 38. Huella de carbono según tipo de material.....	54
Gráfica 39. Relación precio densidad de los materiales a estudiar (I).....	57
Gráfica 40. Relación precio densidad de los materiales a estudiar (II).....	69
Gráfica 41. Relación precio densidad de los materiales a estudiar (III).....	74
Gráfica 42. Relación precio densidad de los materiales a estudiar (IV).....	76
Gráfica 43. Relación precio densidad de los materiales a estudiar (V).....	77
Gráfica 44. Materiales que pasan las especificaciones fijadas para drones civiles profesionales de alta gama (I).....	79
Gráfica 45. Materiales que pasan las especificaciones fijadas para drones civiles profesionales de alta gama (II).....	80
Gráfica 46. Materiales que pasan las especificaciones fijadas para drones civiles profesionales de alta gama (III).....	90
Gráfica 47. Materiales que pasan las especificaciones fijadas para drones civiles profesionales de alta gama (IV).....	96
Gráfica 48. Materiales que pasan las especificaciones fijadas para drones militares.....	102

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades de la espuma polimérica flexible (VLD).....	59
Tabla 2. Propiedades de la espuma polimérica flexible (LD).....	60
Tabla 3. Propiedades de la espuma polimérica flexible (MD).....	62
Tabla 4. Propiedades de la espuma polimérica rígida (LD).....	63
Tabla 5. Propiedades de la espuma polimérica rígida (MD).....	65
Tabla 6. Propiedades de la espuma polimérica rígida (HD).....	66
Tabla 7. Propiedades de la madera de balsa.....	71
Tabla 8. Propiedades del corcho.....	73
Tabla 9. Propiedades de la espuma metálica.....	76
Tabla 10. Propiedades de la fibra de carbono (HS CARBON).....	82
Tabla 11. Propiedades de la fibra de carbono (HM CARBON).....	84
Tabla 12. Propiedades de la fibra de aramida (Kevlar 49).....	86
Tabla 13. Propiedades de la fibra de vidrio (C-glass).....	88
Tabla 14. Propiedades de la fibra de vidrio (E-glass).....	89
Tabla 15. Propiedades del polímero reforzado con fibra de carbono (isotrópico).....	93
Tabla 16. Propiedades del compuesto de carburo aluminio/silicio.....	95
Tabla 17. Propiedades de las aleaciones de magnesio forjado.....	98
Tabla 18. Propiedades de las aleaciones de aluminio forjado endurecidas por envejecimiento.....	100
Tabla 19. Propiedades de los nanotubos de carbono.....	104
Tabla 20. Propiedades del grafeno.....	106

# ÍNDICE

Índice de ilustraciones.....	i
Índice de gráficas.....	ii
Índice de tablas.....	iv
1. Definición e historia de los drones	
1.1 ¿Qué es un dron? Origen.....	1
1.2 Historia de los drones.....	2
1.2.1 Los primeros drones.....	2
1.2.2 Primera guerra mundial.....	3
1.2.3 Entreguerras.....	4
1.2.4 Segunda Guerra Mundial.....	5
1.2.5 Guerra Fría.....	8
2. Partes de un dron	
2.1 Chasis.....	12
2.2 Motor.....	13
2.3 Hélices.....	15
2.4 Sensores.....	17
2.5 GPS y brújula.....	18
2.6 Tren de aterrizaje.....	18
2.7 Sistema de grabación.....	19
2.8 Emisor y receptor RC. Placa de vuelo.....	19
3. Propiedades de los materiales	
3.1 Precio.....	21
3.2 Densidad.....	22
3.3 Fecha de primer uso.....	24
3.4 Módulo de Young.....	25
3.5 Límite elástico, tensión de rotura, esfuerzo de compresión y deformación.....	29
3.6 Dureza Vickers.....	33
3.7 Resistencia a la fractura.....	34
3.8 Resistencia a la fatiga a los $10^7$ ciclos.....	35
3.9 Coeficiente de pérdida mecánica.....	36
3.10 Temperatura de fusión y temperatura de transición vítrea.....	37

3.11	Temperatura de operación máxima y mínima.....	39
3.12	Conductividad térmica.....	41
3.13	Calor específico.....	42
3.14	Coeficiente de expansión térmica.....	43
3.15	Resistividad eléctrica.....	45
3.16	Constante dieléctrica.....	46
3.17	Factor de disipación.....	47
3.18	Rigidez eléctrica.....	48
3.19	Transparencia.....	49
3.20	Material de riesgo crítico.....	49
3.21	Procesabilidad.....	49
3.22	Energía gris.....	52
3.23	Huella de carbono.....	53
3.24	Reciclabilidad.....	54
3.25	Inflamabilidad.....	55
4.	Selección de los materiales	
4.1	Drones civiles ultraeconómicos.....	56
4.2	Drones civiles profesionales de alta gama.....	78
4.3	Drones militares.....	101
5.	Conclusiones.....	108
6.	Fuentes.....	110



# 1. DEFINICIÓN E HISTORIA DE LOS DRONES

## 1.1 ¿Qué es un dron? Origen [1] [2]

Llamamos dron a todo vehículo aéreo que es controlado de forma remota, en definitiva, es un vehículo aéreo no tripulado (VANT). Otras siglas por la que se conoce a este tipo de vehículos son las siguientes que provienen del inglés:

- UAV (Unmanned Aerial Vehicle)
- RPAS (Remotely Piloted Aircraft System)

Hay más acrónimos que pueden ser utilizados como RPV, SPA, UMA o UAS, aunque son menos comunes.

La palabra dron, al igual que muchas palabras de nuestro vocabulario, tiene origen anglosajón. En inglés, la palabra «drone» significa zumbido. Otro significado de la palabra es zángano, que como podemos deducir guarda gran relación con el significado previamente indicado. El término zángano se utiliza para referirse a la abeja macho cuya principal función es fecundar a la abeja reina diferenciándose de las abejas trabajadoras ya que estas últimas son las encargadas de recolectar el polen.



Ilustración 3. Significado de la palabra dron

Desde que se definió la palabra zángano, esta palabra ha sido comúnmente utilizada desde el siglo XVI hasta la actualidad para referirse a personas que son reacias a trabajar y evitan hacerlo siempre que pueden. Las primeras referencias que se hicieron a la palabra dron en este contexto datan del año 1935 cuando el oficial estadounidense William H. Standley le ordenó a su comandante Delmer Fahney diseñar un vehículo parecido a la nueva aeronave británica. Esta aeronave era revolucionaria debido a que contaba por control remoto y el oficial relacionó la palabra «drone» con el nombre del nuevo vehículo no tripulado de la Marina Real Británica, el DH 82B Queen Bee.

Se empezó a utilizar con asiduidad para referirse a los drones a partir de una publicación de la revista estadounidense «Popular Science» a finales de 1946 que dice lo siguiente:

*“Los drones, tal y como se llaman las naves manejadas por radio control tienen muchas aplicaciones, civiles y militares. Algún día guiarán desde naves nodrizas enormes flotas de larga distancia y transportarán cargas a través de continentes y océanos. Drones de larga distancia armados con bombas atómicas volarán y bombardearán sus objetivos a la perfección”*

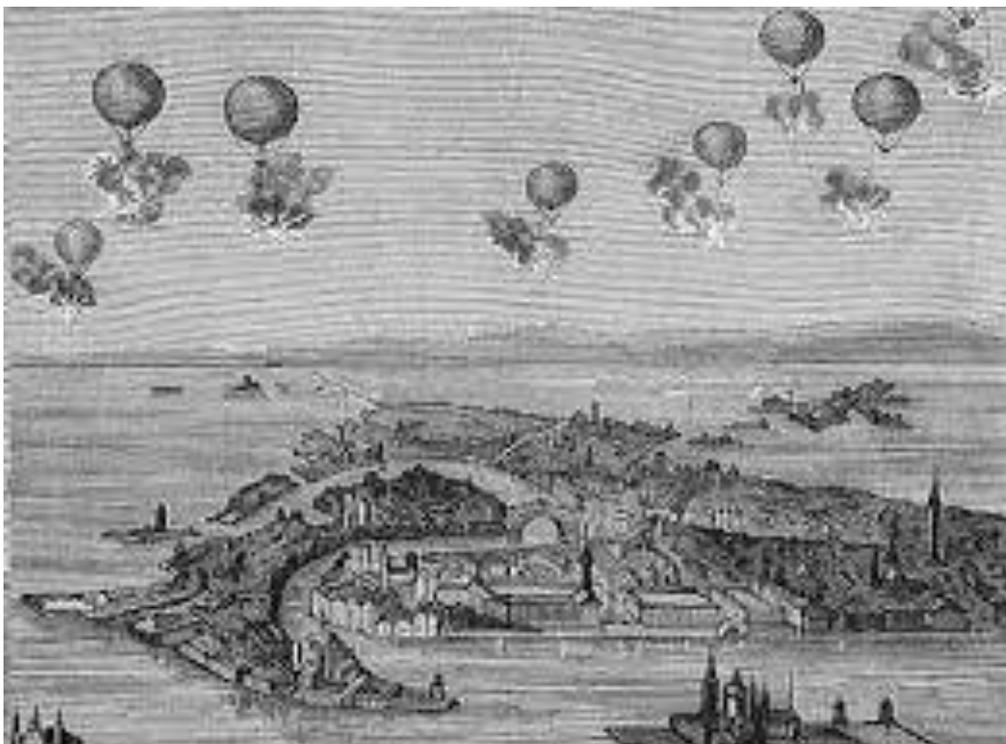
## **1.2 Historia de los drones**

### **1.2.1 Primeros drones [3]**

La idea de los UAV viene de lejos. Teniendo en cuenta de que un dron es un vehículo aéreo no tripulado, el primer uso de estos vehículos data del año 1849. A finales del siglo XVIII, más concretamente en el año 1797 Napoleón conquistó la República de Venecia y la cedió a Austria ese mismo año.

En 1848, en un año en el que hubo varias revueltas en el continente europeo, Daniele Manin lideró una revuelta contra el gobierno austríaco volviendo a proclamar la República de Venecia.

El gobierno austríaco tomó medidas y bloqueó a Venecia causando desastres sociales y económicos. Pese a tomar estas medidas, los austríacos no consiguieron acercarse lo suficiente como para atacar la ciudad para poder recuperarla debido a la localización y estructura de la ciudad que le proporcionaba excelentes defensas costeras.



*Ilustración 4. Aparición de los primeros drones*

La dificultad de ataque por parte del gobierno austríaco dio lugar a la preparación y ejecución del primer bombardeo de la historia. En julio de 1849, los austríacos llevaron a cabo un ataque nunca antes visto. Lanzaron cinco globos de 23 pies de diámetro cada uno con 5 bombas que debían de ser encendidas mediante electromagnetismo, utilizando un cable conductor que estaba conectado a una batería en tierra. Aunque no se sabe ciertamente cual fue la cantidad de globos que fueron utilizados realmente en la operación, ésta

se llevó a cabo. El ataque no fue del todo fructífero, sin embargo, Venecia se rindió ante Austria en agosto de ese mismo año.

En la guerra de Secesión estadounidense (1861-1865) también se utilizaron dispositivos incendiarios hacia el ejército confederado por parte de las tropas unionistas.

Aunque podemos pensar que estos globos no encajan con la idea que tenemos de los drones hoy en día, fueron ellos los que abrieron paso a la innovación y desarrollo en este campo.

### **1.2.2 Primera Guerra Mundial [6] [7] [10]**

El principal uso de drones durante este periodo era para vigilancia aérea de otros países gracias a la realización de fotografías aéreas para seguir los movimientos del enemigo generando mapas de situación. En esta etapa mientras que la aviación no tripulada se estancaba debido a la falta de desarrollo tecnológico, se hacían grandes avances en la aviación convencional.

El primer paso en el desarrollo de la tecnología de control remoto en aviación fue dado por Elmer Ambrose Sperry, que diseñó un giroestabilizador para un avión en 1909, aunque era demasiado pesado y no rendía como se esperaba. Dos años más tarde, junto con Glenn Hammond Curtiss, mejoró su invento haciéndolo mucho más ligero y rediseñándolo con servomotores para poder controlar el avión en los tres ejes.

En el año 1915, se produjo una unión entre Peter Cooper Hewitt y Elmer Ambrose Sperry para fusionar las ideas del giroestabilizador con algunas de las ideas del famoso inventor Nikola Tesla. Su trabajo acabó el año siguiente cuando se produjo la primera demostración del sistema que diseñaron para un avión convencional, el Hewitt-Sperry Automatic Airplane al que todavía le faltaba desarrollo para poder ser manejado por control remoto íntegramente. En 1917 el proyecto fue financiado por la US Navy que les proporcionó aviones para poder seguir desarrollando este revolucionario invento. A finales de ese mismo año la compañía Curtiss Aeroplane and Motor Company diseñó células de vuelo para torpedos aéreos no tripulados.

En el año 1918 tuvo lugar el primer vuelo de un UAV con éxito. El vehículo era un dispositivo biplano no tripulado de madera que podía transportar más de un centenar de kilogramos de carga explosiva impulsado por un motor Ford. No se cuenta este logro como el más determinante en los drones de la Primera Guerra Mundial ya que el sistema era muy primitivo, ya que tenía que realizar cálculos conociendo parámetros como la distancia exacta al objetivo o el viento.

Sin duda el hecho clave en el desarrollo de los drones en esta etapa se realizó en noviembre de 1918, un mes antes del final de la Primera Guerra Mundial. En este año se inventó y desarrolló con éxito el conocido como “bicho de Kettering”. Este torpedo aéreo creado por el inventor estadounidense Charles Kettering era un biplano que podía volar hasta 80 km. Este vehículo aéreo era usado como misil aéreo, ya que transportaba cerca de 82 kg de explosivos y cuando el biplano se aproximaba al objetivo, el motor se apagaba haciendo que este cayese sobre el objetivo.

Aunque estos dispositivos no fueron desarrollados con éxito con fin militar para la Primer Guerra Mundial, sí que supusieron el comienzo de una nueva tecnología, que tendrá mayor influencia en la Segunda Guerra Mundial.

### **1.2.3 Entreguerras [7] [8] [9]**

En la década de 1920 los ejércitos de distintos países desarrollaron y testaron varios buques que eran dirigidos por control remoto con fines militares. Fue en esta época cuando los británicos empezaron a desarrollar aparatos aéreos no tripulados para la destrucción de los zepelines alemanes.

En septiembre del año 1925 rescataron los estudios de Archibald Low sobre las técnicas de radiocontrol y las centraron en la obtención de un nuevo modelo de dron. La Royal Navy consiguió desarrollar un avión monoplano llamado LARNYX. Éste tenía una autonomía de 480 km transportando un cargamento militar de 114 kg impulsado por un motor de 200 CV Armstrong-Siddley Lynx. Utilizaban la teoría de Archibald Low para controlar el avión por radio durante los primeros momentos del vuelo, pero después era capaz de seguir un plan de vuelo específico. Tan sólo se construyeron una docena de estos aviones y cinco de ellos fueron probados en el desierto de Irak repletos de cargamento. Estos principios desarrollados por el pionero en aviación británico también fueron usados en la construcción de otro biplano llamado Ruston Proctor AT.

Como hemos visto anteriormente, en esta época fue diseñado el famoso “The Queen Bee”. Fue diseñado por el gobierno británico como un avión manejado mediante radiocontrol de bajo coste. Fue desarrollado a partir del biplano Fairey Queen y en circunstancias normales era controlado remotamente



Ilustración 5. The Queen Bee

desde un barco. “The Queen Bee” fue volado con tripulación por primera vez con tripulación en Hatfield en 1935, mientras que su primer vuelo sin piloto (controlado remotamente) fue meses después ese mismo año en Farnborough. Fueron construidas 412 unidades entre 1933 y 1943, siendo hidroaviones 360 de ellos.

También fueron construidos 380 unidades operadas por el Fleet Air Arm y el Royal Air Force. Este modelo rebautizado DH82A Tiger Moth se usó en la Marina británica como un avión-blanco desde 1934 hasta 1943.

#### 1.2.4 Segunda Guerra Mundial [4] [7] [11] [12] [13] [14] [15]

Durante esta época tan convulsa las principales potencias mundiales impulsaron su desarrollo en tecnologías de control remoto para introducirlas en la aviación con fines militares.

Como hemos comentado en el apartado anterior, Reino Unido se dedicó al uso y la fabricación de “The Queen Bee” que principalmente utilizaron tanto la Marina como el Ejército. Durante la Segunda Guerra Mundial estos blancos fueron utilizados para el entrenamiento de las fuerzas de artillería de ambos ejércitos.

Una gran potencia en el desarrollo de UAV fue Alemania que trabajó fuertemente en el desarrollo de misiles crucero durante esta época. Una de las grandes bazas de la Alemania nazi fue el desarrollo de misiles cruceros, entre los que destaca el Fieseler Fi 103 o V1. Esta arma también conocida como “Arma de venganza 1” fue desarrollada por el fabricante alemán de aviones Gerhard Fieseler Werke con el objetivo de infligir daño tras las líneas enemigas. Este misil estaba guiado por un piloto automático basado en un compás giromagnético.

Estaba basado en un sistema barométrico que regulaba la velocidad y la altura, además de un anemómetro que se utilizaba para estimar la distancia. Este fue el primer misil crucero equipado con un motor pulsorreactor. En cuanto a las dimensiones del misil, se conoce que tenía una longitud de 7,9 metros, un peso de 2.180 kilogramos y una velocidad de unos 630 kilómetros por hora. Este sistema fue utilizado principalmente entre 1944 y 1945 en los que se estiman que se fabricaron más de 30.000 unidades, casi todos contruidos por esclavos de los campos de concentración. El V1 era lanzado primero desde unas plataformas elevadas ubicadas en zonas costeras, aunque después también eran soltados por las aviaciones. Se estima que fueron lanzadas entre 12.000 y 20.000 unidades contra el oeste de Alemania, Francia y Países Bajos con el objetivo de alcanzar a Inglaterra y Bélgica. Desde junio hasta agosto del año 1944 fueron disparados alrededor de 9000 misiles V1 sobre Reino Unido y Francia, aunque tan sólo 2419 lograron bombardear con éxito los respectivos objetivos ya que muchos de ellos no llegaron por la acción de la Fuerza Aérea Británica.

Ante la baja tasa de éxito que tenían estos primeros misiles crucero se empezaron a desarrollar modelos derivados de éste. De esta forma nació el V2, diseñado por Bon Braun, era una versión mejorada del anterior modelo que alcanzaba velocidades supersónicas y era imposible de desviar por los cazas. Para que los enemigos no pudiesen detectar sus bases de lanzamiento, se mejoró este misil para que pudiese ser lanzado desde rampas móviles. La gran mayoría de estas bombas fueron lanzadas desde las costas francesas con el objetivo de bombardear Londres para disminuir la moral de los ingleses.

Estados Unidos también se une a esta lista de países que dedicaron recursos y tiempo en desarrollar la tecnología de control remoto para implementar en sus aviaciones. Fue durante la Segunda Guerra Mundial cuando la compañía Radioplane Company desarrolló los primeros drones producidos en masa por los Estados Unidos. Este dron responde al nombre de Radioplane OQ-2 y fue el blanco aéreo no tripulado más usado por las fuerzas militares como entrenamiento durante este periodo. Esta aeronave apareció en el año 1939 y fueron fabricadas aproximadamente 15.000 unidades bajo la autorización de las United States Army Air Forces (USAAF), aunque algunas de ellas fueron compradas por la United States Navy (USN). La empresa produjo su prototipo

RP-1 (Radioplane Model 1) para una demostración ante el ejército norteamericano para intentar venderles esta nave como herramienta de entrenamiento para los tiradores encargados de evitar los ataques enemigos mediante misiles. Eran requeridos muchos especialistas para realizar esta ardua y complicada tarea, por lo que el gobierno americano pensó que esto sería bueno para que los tiradores mejoraran su precisión a la hora de derribar misiles guiados por control remoto. En el año 1938 salió la versión mejorada de la compañía comprada por Walter Righter, el RP-2. Este diseño evolucionó como el RP-3 y el RP-4 bajo la dirección de la United States Army. La forma final del RP-4 fue la que la Army eligió comprar, convirtiéndose finalmente como el primer modelo de UAV americano. Mientras que los tres primeros eran prototipos, el RP-4 si llegó a fabricarse, llegando al medio centenar de unidades construidas. Aunque el RP-4 fue el dron más determinante para el futuro de los UAV en los Estados Unidos, luego llegaron modelos mejorados de este como los siguientes:

- RP-5 (OQ-2): Versión mejorada del RP-4. Construidas 3865 unidades.
- OQ-3: Versión mejorada del OQ-2. Construidas 9400 unidades.
- OQ-5: Modelo complementario de dron. No construido.
- OQ-7: Variación del OQ-3. No producido en masa.
- OQ-13: Variación del OQ-3 de uso marítimo.
- RP-8 (OQ-14): Versión mejorada del OQ-3. Construidas 5200 unidades.

En esta época también uno de los primeros torpedos volantes guiados por control remoto, el conocido Interstate BQ-4/TDR(TDN). Este avión era bastante simple ya que utilizaba dos motores de bajo rendimiento con pistones Lycoming O-435-2. Tenía un rango de alcance de unos 685 kilómetros y alcanzaba una velocidad de unos 225 kilómetros por hora. Contaba con una cabina muy simple que estaba tripulada por un piloto para vuelos de prueba en los que pudiese ser necesaria su ayuda. Este piloto solo se encargaría de controlar el avión desde dentro en caso de fallo del control remoto o para aterrizar el artefacto. En misiones operacionales el avión se desprendía del tren de aterrizaje y era carga con hasta 900 kg de explosivos. Lo más revolucionario de este artefacto era que el vehículo llevaba instalada en la parte delante una cámara que le permitía al piloto ver las imágenes en un monitor y así controlar el dispositivo a distancia. Esta aeronave fue utilizada principalmente contra barcos japoneses en el

Pacífico en el año 1944. En septiembre y octubre de ese mismo año se usaron 46 drones de este tipo contra los enemigos, dando en el objetivo 18 de ellos. La Armada tenía la intención de fabricar hasta 2000 drones de este tipo, pero el retraso causado por los problemas técnicos y por la poca prioridad que le dieron a su fabricación hizo que al final solo se fabricasen 300 unidades

### 1.2.5 Guerra Fría [7] [16] [17] [18]

Esta fue una época en la que se impulsó el desarrollo de drones debido a la necesidad de espiar al enemigo. El accidente de Francis Gary Powers durante un vuelo espía, mientras sobrevolaba territorio perteneciente a la Unión Soviética para tomar fotografías aéreas, provocó un cambio de estrategia. Se creó un programa secreto destinado a desarrollar aeronaves no tripuladas que pudiesen realizar fotografías del territorio enemigo.



Ilustración 6. Radioplane Shelduck en una exhibición

Tras la Segunda Guerra Mundial, la compañía Radioplane, posteriormente Northrop empezó a desarrollar con éxito una serie de vehículos aéreos no tripulados llamados “Shelduck” y “Falconer”

El “Shelduck”, que pertenecía a la familia de los drones BTT de Radioplane, era uno de los modelos más avanzados. Mantenía la configuración de otros modelos, aunque tenía una tecnología más desarrollada que estos. Además de tener un mayor tamaño, también estaban impulsado por un motor más potente (bóxer McCulloch 4 tiempos). Lo más característico era un sistema de mejora de radar basado en reflectores de radar, que no eran utilizados ya que interferían con las señales de control.

Otra variante de la familia de aeronaves BTT de Radioplane fue el “MQM-57 Falconer”, mencionado anteriormente. Este modelo fue construido para el reconocimiento del campo de batalla. Su primer vuelo se produjo en el año 1955. Este modelo era muy similar físicamente al “Shelduck” aunque se apreciaban ciertas diferencias en el fuselaje, ya que el de este último era más grande y robusto. Tenía un sistema de piloto automático respaldado por radiocontrol y

podía transportar cámaras con las que se podrían llevar a cabo las misiones de espionaje. También solía portar bengalas que iluminasen en caso de una misión de reconocimiento nocturno. El equipamiento era cargado en la parte posterior, entre las alas. Aunque solo tenía una resistencia de poco más de media hora haciendo un uso limitado de él, fueron construidos más de 1.500 unidades y fue usada por una gran cantidad de fuerzas militares de todo el mundo. Hubo también muchos modelos derivados de los BTT, aunque no tuvieron mucho impacto en la historia de los drones.

A finales de los años cincuenta, además del Falconer, la US Army adquirió otro dron de reconocimiento, el "MQM-58 Overseer". Tenía una configuración similar al "Falconer", aunque presentaba una gran diferencia en la cola, ya que era en forma de "V" y el doble de pesada. No fue fabricado en grandes cantidades.

Fueron construidos más de 73.000 drones BTT y fue usado por las fuerzas militares de más de 18 naciones.

En este periodo se produjo un gran desarrollo de la industria que llevó al desarrollo exitoso de los motores a reacción, lo que permitió la fabricación de drones más rápidos y con más alcance. Un ejemplo de esto es el famoso "Ryan Firebee". El programa de diseño de este dron fue comenzado en los años 50 por la empresa "Ryan Aeronautics". Debido al interés de espionaje que tenía el bando estadounidense, estos drones fueron equipados con cámaras que les permitían realizar misiones de reconocimiento en territorio enemigo. Estas aeronaves eran capaces de volar a grandes alturas siendo dirigidas por control remoto desde tierra sin ningún problema. Esta nave también podía ser controlada desde otra aeronave tripulada que viajase cerca suya. Este tipo de UAV eran muy útiles ya que tenían un tamaño más reducido que los aviones convencionales y por lo tanto eran más difíciles de detectar y derribar. También eran muy recomendables para evitar problemas diplomáticos ya que no podían capturar al piloto y tampoco se sabía del origen de estos drones. El "Ryan Firebee" podía ser lanzado desde tierra con un motor cohete y desde el aire mediante un avión tripulado. La recuperación de este dron de reconocimiento se hacía mediante el despliegue de un paracaídas que le permitía aterrizar sin sufrir daños. Las fotografías de reconocimiento realizadas eran reveladas a su vuelta a la base. Este modelo fue mejorado año tras año debido a su gran éxito durante

la guerra fría. Se tiene el conocimiento de que algunos de estos drones siguen en activo con algunas mejoras como la velocidad supersónica y mejoras en los sistemas de navegación basadas en el Sistema de Posicionamiento Global (GPS) y otros sensores avanzados.

Otro diseño importante de la época fue el BQM-74 Chukar fabricado por la empresa Northrop como muchos de los drones nombrados anteriormente. Este dron tuvo hasta tres modelos distintos a los que se le añadían pequeñas mejoras que aumentaban su rendimiento. Al igual que sus predecesores, esta aeronave era manejada por control remoto y era recuperable. Era un dron subsónico propulsado por un motor turboreactor Williams J400 que lanzaba mediante un lanzador terrestre. Alcanzaba velocidades que tenían un Mach cercano a la unidad y llegaban a altitudes de hasta 12 kilómetros. Era mucho más pequeño y ligero que el "Ryan Firebee".

Si hablamos de drones que cambiaron la historia sería justo hablar del Gyrodyne QH-50 DASH cuyo primer vuelo data del año 1959. Este vehículo fue el primer vehículo aéreo no tripulado construido con ala rotatoria. Este dron fue construido específicamente para atacar a embarcaciones enemigas. La introducción de los submarinos nucleares soviéticos a principios de la década de 1960 creó la necesidad de fabricar un helicóptero que pudiese ser utilizado para soltar bombas sobre los objetivos en mitad del océano. Era un helicóptero de tamaño reducido ya que contaba con una longitud de 6,1 metros y tenía un peso en vacío de 530 kilogramos. La mayoría de los lanzamientos del QH-50 consistieron en patrullas antisubmarinas con torpedos, aunque algunas de las naves se usaron posteriormente en la Guerra de Vietnam para detectar disparos navales. Fueron construidas 758 unidades, y fueron principalmente usadas por la Marina de los Estados Unidos y por el ejército japonés.



## 2. PARTES DE UN DRON

Como sabemos, el término dron es muy abierto. Esto hace que haya muchos tipos de drones, habiendo grandes diferencias entre ellos. Aunque el término UAV hace referencia solo a los vehículos aéreos, hoy en día, se suelen incluir en la categoría de drones a aquellos que se desplazan por otros medios como la superficie terrestre o el agua. Aunque tienen una fisonomía distinta las partes fundamentales de estos vehículos suelen ser las mismas. En esta descripción nos centraremos en las partes que tienen los drones aéreos que están presentes en nuestro día a día y que se han convertido en una parte fundamental de nuestra seguridad y nuestro ocio.

### 2.1 Chasis [19] [20]

Es el cuerpo o esqueleto del dron; en él van a estar insertados el resto de los componentes. Es una de las partes más importantes de nuestro vehículo ya que influye en otras características del dron. Por ejemplo, si tenemos un chasis muy grande, el peso del dron será mayor, por lo que tendremos que instalar un motor más potente con alas o hélices más grandes que puedan con este peso para mantener las mismas características de vuelo.

La forma del chasis se debe adecuar siempre al tipo de dron ofreciendo la menor resistencia posible. En los drones aéreos tendrá una forma distinta



*Ilustración 7. Chasis de un dron*

según el número de rotores que tenga la nave, ya que el dron puede ser cuadricóptero, hexacóptero, octacóptero, etc. La forma del chasis para los drones terrestres será distinta a la de los aéreos ya que habría que sustituir las hélices de la parte superior por ruedas en la parte inferior. Respecto a los drones marítimos habría que variar la forma del chasis ya que habría que ubicar las hélices de forma que empujen el vehículo de forma más horizontal para vencer mejor la resistencia del agua.

Desde la fabricación de los primeros drones, el chasis ha estado fabricado con aleaciones ligeras de aluminio, manganeso y titanio. Debido al gran avance estos últimos años en el campo de la Ciencia de los Materiales se han fabricado de materiales compuestos como fibra de vidrio, fibra de carbono y plástico. A estos compuestos se les suele añadir poliéster o kevlar para aumentar su rigidez y resistencia.

Debemos tener en cuenta los siguientes factores a la hora de seleccionar nuestro material para la fabricación del vehículo:

- La extensión que debe de tener este para poder albergar los elementos internos del dron.
- La rigidez estructural de la forma que hayamos decidido aplicar a nuestro dron.
- Las características aerodinámicas que reduzcan lo máximo posible la resistencia que el medio nos oponga ya sea aire, agua o cualquier otro fluido.

La selección de los materiales estructurales para los drones es un proceso mucho más complejo que lo descrito anteriormente. Este proceso lo describiremos más detalladamente en los siguientes apartados ya que es el objeto principal de nuestro estudio.

## **2.2 Motor** [19] [20] [21] [22] [23] [24]

El motor del dron es la parte encargada de hacer que el dron funcione; este proporciona la fuerza que hacen girar hélices. El proceso de funcionamiento es muy sencillo: el motor transforma la energía eléctrica en movimiento circular que se transmite a las hélices haciendo que estas giren. El giro de las hélices realizará una fuerza de empuje ascendente haciendo que el dron se eleve alzando el vuelo. El movimiento de estas hélices también será el que hará posible que nuestro dron se mantenga estable en el vuelo ya que equilibrará la fuerza que ejerce la gravedad sobre la aeronave. Cuando el dron se queda en una posición fija durante el vuelo será porque el sumatorio de fuerzas que actúan sobre el es igual a nulo:  $\Sigma F=0$ .

En la fabricación de los drones modernos el tipo de motores más utilizados son los motores eléctricos. El funcionamiento de este tipo de motores se basa

en las fuerzas de atracción y repulsión producidas entre un imán y una bobina por la que hacemos circular energía eléctrica. El desarrollo de los motores



Ilustración 8. Motor de un dron

eléctricos empezó gracias al descubrimiento del científico Hans Christian Oersted, que observó que al ubicar una espira (por la que hacíamos circular una corriente eléctrica) alrededor de una brújula, ésta se movía. Esto permitió establecer una relación

entre el campo magnético y el campo eléctrico ya que en este caso interactuaban dos elementos: la corriente eléctrica que circulaba por la bobina y el imán giratorio que se encontraba unido a la aguja. Esto nos llevó a establecer que la espira se comportaba como un imán al conducir corriente eléctrica, creando un campo magnético a su alrededor. Los resultados obtenidos por este científico supusieron la creación del “primer motor eléctrico” al poder girar la aguja de la brújula aplicando la corriente eléctrica.

La principal clasificación de los motores se hace según la corriente aplicada, por lo tanto, los motores pueden ser de corriente continua (DC) o de corriente alterna (AC). Se diferencian también en la forma de generar el par de movimiento. La velocidad es también un elemento diferenciador ya que en los DC se controla variando la frecuencia del motor, mientras que en los AC esto se realiza mediante la variación de la corriente aplicada.

Las diferencias entre ambos hacen que cada uno tenga unas características propias que benefician al dispositivo al que se aplican según su uso:

- Motores AC: Son robustos y con una gran vida útil. Requieren de poco mantenimiento para su funcionamiento óptimo. Son bastante económicos ya que tienen un consumo muy bajo en su arranque. Son fáciles de diseñar y construir.
- Motores DC: Tiene un par de arranque bastante alto. Son fáciles de instalar incluso en sistemas móviles. Se puede variar su velocidad de giro variando la tensión de alimentación. Son precisos y rápidos, lo que permite realizar las funciones de arranque, parada, aceleración y cambio de sentido de una forma muy eficaz.

El tipo de motor más utilizado para los drones suelen ser los motores eléctricos de corriente continua, por las ventajas descritas anteriormente, aunque estos motores también pueden ser de dos tipos:

- Con escobillas (Brushed): Poseen un armazón rotativo que funciona como un electroimán de dos polos. Está conectado a un interruptor rotativo y ayuda a revertir la dirección de la corriente para medio ciclo, para que los polos puedan ser empujados contra los imanes permanentes conectados fuera del motor. Son bastante sencillos y fáciles de controlar. Son más pesado que los Brushless debido al peso de las escobillas. Son más económicos, aunque también hay que tener en cuenta el desgaste de las escobillas que pueden generar gastos adicionales.
- Sin escobillas (Brushless): Su característica principal es que no poseen los cepillos que si tenían los motores anteriores. Su funcionamiento se basa en la inversión del imán permanente con los cambios de polaridad magnética. Es posible controlar sus movimientos con un control dedicado y mecanismos de ajuste de velocidad. Tiene un ciclo de vidas mayor que el motor con escobillas. Son más costosos que los anteriores. Tienen más potencia, más precisión y eficiencia que los motores con escobilla ya que consiguen una mayor duración de la batería. Poseen también un mayor rango de las velocidades de giro y menos interferencias electromagnéticas.

La elección del tipo de motor dependerá del tipo de dron o el uso que se le vaya a dar. Si queremos diseñar un dron que demanda altas velocidades de rotación para mantener el vuelo sería más recomendable el uso de los motores Brushless. Otro parámetro a tener en cuenta será la distancia de los vuelos, ya que si el tiempo de vuelo es corto podemos usar sin problema un motor Brushed ya que cumpliría perfectamente la función a un precio más económico.

### **2.3 Hélices** [19] [20] [24]

Las hélices de un dron son la parte permite crear la fuerza vertical necesaria para su movimiento. Consiste en un conjunto de álabes que giran alrededor de un eje que realiza un movimiento de rotación provocado por el motor. Estas hélices se encargan de la mayoría de los movimientos del dron

como el de ascenso, descenso, estabilización en una posición elevada y cambio de dirección en el plano horizontal. El tipo de movimiento de se desee hacer y su velocidad dependerán de la variación de la frecuencia de giro que proporcione el motor al eje. La variación del plano sobre el que el eje es perpendicular nos permitirá alternar entre un movimiento completamente vertical y otros que nos permitan también un avance horizontal.

La colocación de las hélices en el dron variará según el tipo de vehículo que sea, por ejemplo, si es aéreo o marítimo. En el caso de un dron aéreo las hélices suelen ser colocadas de forma que el eje sea perpendicular al plano horizontal lo que provocará un ascenso casi inmediato. Para un dron marino la colocación de las hélices será completamente distinta, ya que el sumatorio de las fuerzas de flotación y gravedad será nulo. Al cumplirse esto no es necesaria la colocación del eje perpendicularmente a la superficie debido a que solo necesitaremos un movimiento horizontal que nos ayude a mover la embarcación en las diferentes direcciones del plano. Si tenemos un dron marino que queremos habilitar con movimientos submarinos sería necesario realizar un estudio más detallado, parecido al de los drones aéreos. En este caso deberíamos dotar de movilidad sobre el plano al eje que gira la hélice para alternar los movimientos horizontales y verticales, además de hacer una modificación y un estudio adicional para analizar la flotabilidad de este.



*Ilustración 9. Hélices de un dron*

Dependiendo del peso, forma y demás parámetros de nuestro dron debemos seleccionar el tipo de hélice que es más apropiada para el

funcionamiento deseado. Un ejemplo de esto, podría ser el número de aspas que tendrán nuestras hélices. Por temas económicos, los drones recreativos suelen ser de dos aspas, aunque los profesionales suelen tener tres, ya que mejoran bastante la estabilidad del dron, aunque consumen mayor energía. El material elegido para su fabricación es también muy importante ya que tiene que cumplir ciertos criterios de rugosidad y densidad para obtener un giro óptimo.

## **2.4 Sensores [19] [20]**

Una de las partes fundamentales de los drones son los sensores que lleva incorporados. El dron incorpora un automatismo, formado por un conjunto de elementos físicos que son los sensores, actuadores y el sistema de control. Los sensores son aquellos elementos que permiten al sistema información de los que está sucediendo en el proceso. A continuación, vamos a comentar los sensores más comunes que pueden presentarse en un dron:

- Sensor capacitivo: se podría añadir un sensor de este tipo al dron con el fin de detectar los objetos metálicos y no metálicos que se encuentren a su alrededor, con el fin de que cuando se aproximen demasiado a estos, se detenga su movimiento para evitar la colisión.
- Transductores de velocidad: se podrían incluir un sensor que te dijese la velocidad a la que vuela el dron, para que el piloto tenga una idea de cómo está la situación de vuelo.
- Termopar: con un pequeño termopar introducido en el dron podríamos conocer en todo momento a que temperatura se encuentra este con el fin de evitar daños significativos provocados por el exceso de temperatura.
- Acelerómetro: este sensor se encarga de medir la aceleración dinámica (en el eje horizontal), además de la aceleración estática (en el eje vertical). Sirven también para determinar la posición y orientación del dron durante el vuelo.
- Altímetro: este sensor es el encargado de estabilizar el dron a una altura automáticamente. Esto es muy útil cuando quieres realizar grabaciones con el dron y necesitas cierta estabilidad. También permite que puedas girar y mover el dron a tu antojo sin que se pierda la altura.

- Giroscopio: se encarga de medir los ángulos de ubicación del dron cuando este se encuentra en el aire. Este giroscopio suele situarse en la misma unidad que el acelerómetro.

## 2.5 GPS y brújula [19] [20]

El GPS tiene múltiples funciones en un dron aparte de las que todo el mundo conocemos sobre estos dispositivos. Pueden añadir datos de ubicación en la telemetría, datos de velocidad, datos de altitud, etc. Los drones de alta gama suelen disponer de un GPS que les permite la realización de vuelos programados. Esto es algo que cada vez veremos más y que se utilizarán para muchas tareas cotidianas como entregas por correo. El GPS también puede darte información como longitud, latitud, elevación y las condiciones climáticas en cualquier lugar. La función probablemente más importante del GPS en un dron es la vuelta al punto de partida: cuando un dron sobrevuela espacio aéreo restringido, se le acaba la batería o sufre cualquier otro tipo de inconveniente, vuelve automáticamente al punto de despegue para evitar cualquier daño por la desconexión y su posterior caída.



Ilustración 10. Brújula electrónica de un dron

La brújula nos permitirá siempre conocer dónde está el norte. También te permitirá la realización de los vuelos “headless”, en los que no importa hacia donde este orientado tu dron, ya que cuando lo hagas avanzar este irá hacia tu dirección en ambos sentidos.

## 2.6 Tren de aterrizaje [19] [20]

La mayoría de los drones poseen un tren de aterrizaje en su parte inferior con el objetivo de no dañar su superficie en los aterrizajes. Uno de los principales problemas es que los trenes de aterrizaje suelen salir en las imágenes que capturan los drones, por eso en los últimos años se ha



Ilustración 11. Tren de aterrizaje de un dron

generalizado el concepto de trenes de aterrizaje portátiles. Este tipo de trenes hace que no se estropee la imagen obtenida cuando se hacen grabaciones 360°.

Los aterrizajes de los drones suelen ser bastante bruscos, por lo que veo imprescindible la presencia de estos trenes de aterrizaje con el objetivo de evitar daños innecesarios.

## **2.7 Sistema de grabación** [19] [20]

Dentro de este apartado, el primer elemento que encontraremos será la propia cámara, que deberá ser de una gran calidad para poder apreciar los detalles de las grabaciones propias de un dron de alta gama.

También nos encontramos con el transmisor de vídeo que es el que se encarga de enviar las imágenes que está capturando el dron a un dispositivo con pantalla que será observado in situ por el piloto. De esta forma tendrá una mejor experiencia de vuelo y podrá asegurarse de que está grabando de forma correcta.



*Ilustración 12. Sistema de grabación de un dron*

El gimbal es otra parte fundamental en el sistema de grabación del dron, ya que es la pieza que se encarga de unir la cámara al chasis. Es tan importante debido a que normalmente está dotado de movilidad para cambiar el ángulo de visión de la cámara. Puede ser manipulado por el piloto desde tierra.

## **2.8 Emisor y receptor RC. Placa de vuelo** [19] [20]

Este sistema de emisor-receptor es el encargado de transmitirle al dron el movimiento que el piloto desea que haga, desde realizar un movimiento aéreo hasta empezar una grabación. Sirve de nexo entre el hombre y la máquina. Los canales que se requieren para que se pueda volar el dron, dependen del número de motores que tenga. Es conveniente tener un canal más que te permita cambiar el modo de vuelo.

La emisora es la parte que se encuentra en tierra, cuando emitimos una acción, esta llega al receptor que se encuentra en el dron. El receptor transmite

esta orden a la placa de vuelo. La placa de vuelo es la encargada de procesar las acciones. Es la computadora encargada de realizar todos los movimientos del dron: controla las velocidades de los motores, orientación de las cámaras, controla los giroscopios, etc. La placa de vuelo puede tener incorporada un autopiloto, que le permite al piloto programar vuelos sin tener que supervisarlos.



### 3. PROPIEDADES DE LOS MATERIALES [C]

A la hora de seleccionar un material, tenemos que determinar que propiedades tiene y si son apropiadas para el uso que le queremos dar. En nuestro caso, elegiremos que propiedades son las más importantes para nuestro dron según el tipo que sea. A continuación, comentaremos los parámetros más importantes que debemos tener en cuenta para la selección del material idóneo para nuestro dron, aunque será en apartados posteriores dónde comentaremos cuáles de estas propiedades serán más realmente importantes.

#### 3.1 Precio

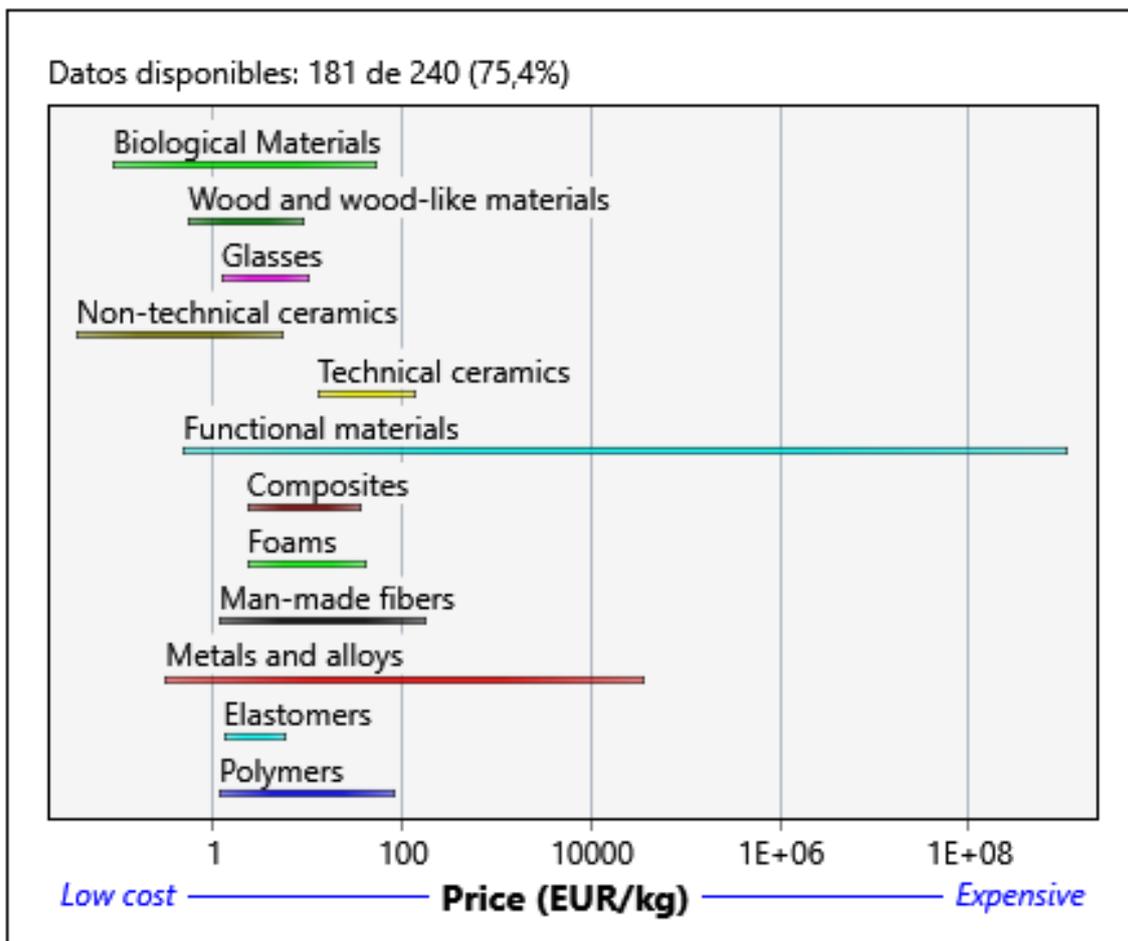
Propiedades como el módulo, la resistencia o la conductividad no cambian con el tiempo. Sin embargo, el precio de los materiales sí que cambia, causándonos un problema. La oferta, la escasez, la especulación y la inflación contribuyen a las considerables fluctuaciones en el coste por kilogramo de una mercancía como el cobre o la plata. Además, hay tres niveles de precios: fabricante, distribuidor y minorista. Los vendedores individuales tienen su propio esquema de precios; sus precios dependen de cuánto desea comprar y de si tiene o no el estado de cliente favorito. Para tener un control de los precios de los materiales se pueden consultar varias páginas web.

Es uno de los factores más importantes a tener en cuenta a la hora de fabricar cualquier tipo de producto. El precio del material es el que limitará la calidad del producto y las cantidades que se fabriquen. Tenemos que tomarla en cuenta desde el principio, ya que nos permitirá saber que materiales son seleccionables en función al presupuesto que se tenga destinado a la fabricación del producto.

El precio de un material se expresa en \$ / kg, aunque para adaptarlo a nuestras unidades monetarias, el programa da la opción de dar el precio de cada material en € / kg. Cuando un material proporciona una función de relleno de espacio, como a menudo lo hacen los polímeros, el concreto, la espuma aislante y similares, es relevante el precio por unidad de volumen €/ m<sup>3</sup>, no por unidad de peso, € / kg. Aún más generalmente, el precio por unidad de función es la medida adecuada.

La mayoría de los materiales básicos (vidrio, acero, aluminio y los polímeros comunes) cuestan entre 0,5 y 2 \$/kg. Debido a que tienen bajas

densidades, el coste / m<sup>3</sup> de los polímeros comerciales es menor que el de los metales.



Gráfica 1. Precio según tipo de material

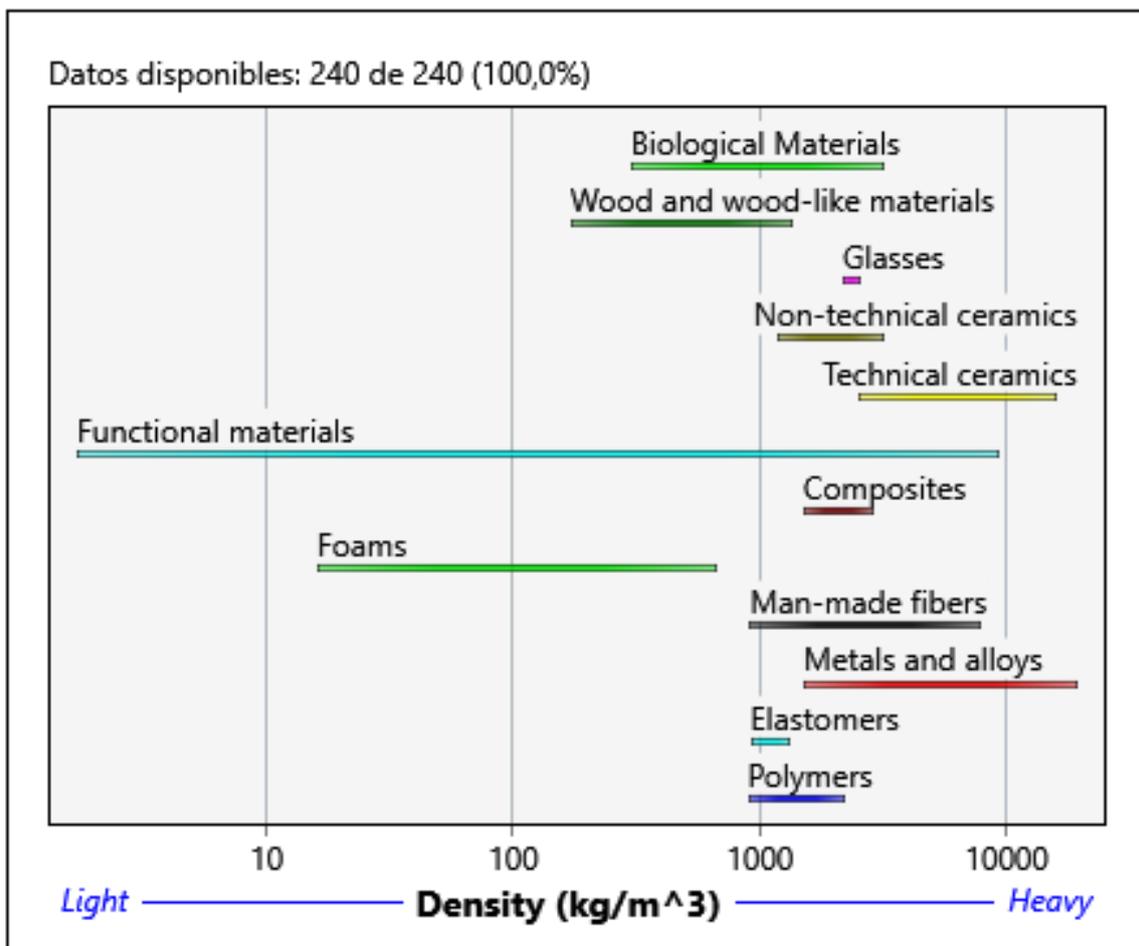
### 3.2 Densidad

La densidad es masa por unidad de volumen. Se mide en kg/m<sup>3</sup>. La densidad de una muestra con una forma regular se puede determinar utilizando balances de masa de precisión y mediciones precisas de las dimensiones (para dar el volumen), pero esta no es la mejor manera. Mejor es el método de "doble pesaje": la muestra se pesa en el aire y cuando se sumerge completamente en un líquido de densidad conocida. Cuando se sumerge, siente una fuerza ascendente igual al peso del líquido que desplaza, lo que se conoce como el principio de Arquímedes.

Esta propiedad es la más importante a la hora de la selección de los materiales para la fabricación de drones, ya que tiene que ser lo suficientemente ligero para que puede moverse en el medio elegido. De la densidad de este

depende el resto de los elementos que debemos elegir para el dron. Por poner un ejemplo, a mayor densidad del material debemos elegir un motor que transmita mayor potencia al eje y seleccionar unas hélices de un tamaño mayor.

La densidad está determinada principalmente por el peso atómico, no por el tamaño del átomo, y está influenciada en menor grado por la forma en que se empaquetan los átomos. Los metales son densos porque están hechos de átomos pesados, empaquetados densamente juntos. Los polímeros tienen bajas densidades porque están hechos principalmente de átomos de carbono ligero e hidrógeno en empaques amorfos o semicristalinos de baja densidad. Los materiales cerámicos, en su mayor parte, tiene densidades más bajas que los metales porque contienen átomos ligeros de O, N, C o Si. Incluso los átomos más ligeros, empaquetados de la manera más abierta, dan sólidos con una densidad de alrededor de  $1000 \text{ kg/m}^3$ , la misma que la del agua. Los materiales



Gráfica 2. Densidad según tipo de material

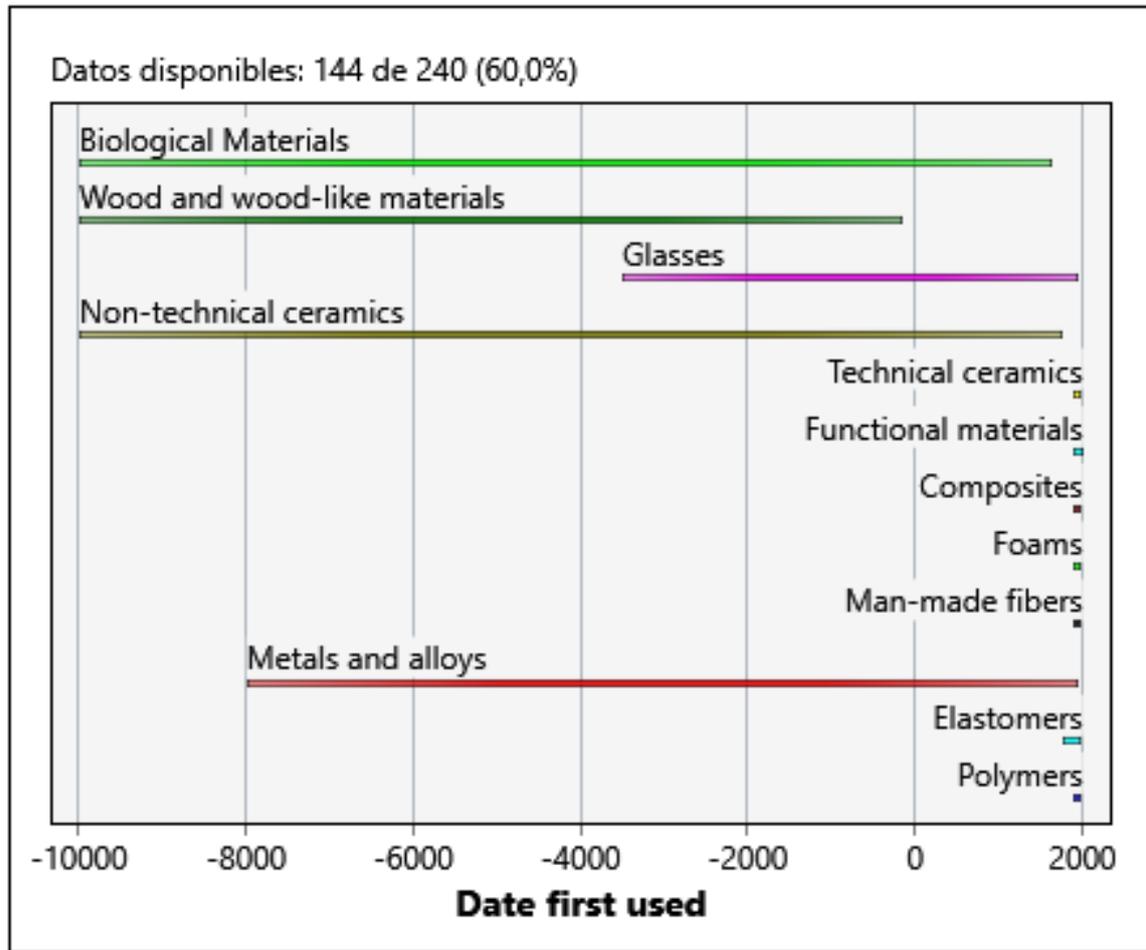
### **3.3 Fecha del primer uso**

Esta es la fecha en que el material sirvió por primera vez para un propósito útil como la fabricación de abrigo, implementos, herramientas, armas, comunicación u ornamentación. (No es la fecha del descubrimiento, que a veces es anterior a la aplicación útil por algunas décadas). Las fechas con signos negativos son de la era antes de Cristo, mientras que las son positivas son la de la era actual, después de Cristo.

Asignar una fecha para 'Primer uso' no siempre es fácil. El papel se establece en el primer uso conocido de papiro en Egipto (3500 a. C.) aunque la industria papelera asigna una fecha mucho más tardía a la primera producción de papel a base de pulpa de madera. El vidrio se establece en la fecha de los primeros objetos de vidrio de Mesopotamia (3400 a. C.). El hierro fundido gris se establece en la fecha de los primeros artefactos chinos de hierro fundido (513 a. C.), aunque no estuvo disponible en Europa hasta aproximadamente 1400 d. C.; el hierro fundido nodular 'dúctil' llegó mucho más tarde (1950 d. C.). El acero se establece en 200 a. C., registrando el uso de hierro reforzado con un porcentaje de 0,1 a 2% de carbono, nuevamente en China, en lugar en el punto de la Revolución Industrial (1858 d. C.) cuando el proceso Bessemer podría descarburar el hierro fundido con alto contenido de carbono para producir en masa acero.

La fecha del primer uso nos puede dar información muy importante. Los materiales que fueron usados por primera vez hace varios siglos tienen normalmente peores propiedades mecánicas que los elementos que se empezaron a usar y crear en los últimos 50 años. Los materiales creados en los últimos años son el resultado del estudio de los materiales más antiguos, a los que se le aplican técnicas modernas para mejorar sus propiedades formando así nuevos materiales más útiles para los procesos industriales.

En el siguiente gráfico mostraremos en que rango temporal se descubrieron los materiales que utilizamos actualmente en la industria.

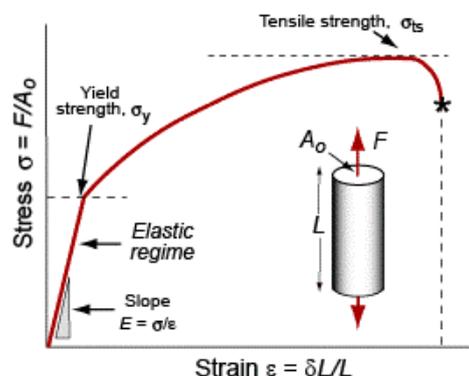


Gráfica 3. Fecha de primer uso según tipo de material

### 3.4 Módulo de Young, de elasticidad transversal, de compresibilidad y coeficiente de Poisson

El módulo de Young es una constante numérica, llamada así por el físico y médico inglés del siglo XVIII Thomas Young y completado años más tarde por Euler, que describe las propiedades elásticas de un sólido sometido a tensión o compresión en una sola dirección, como en el caso de una barra de metal que después de ser estirada o comprimida longitudinalmente vuelve a su longitud original.

En la figura de la derecha se muestra una curva típica de tensión-deformación por



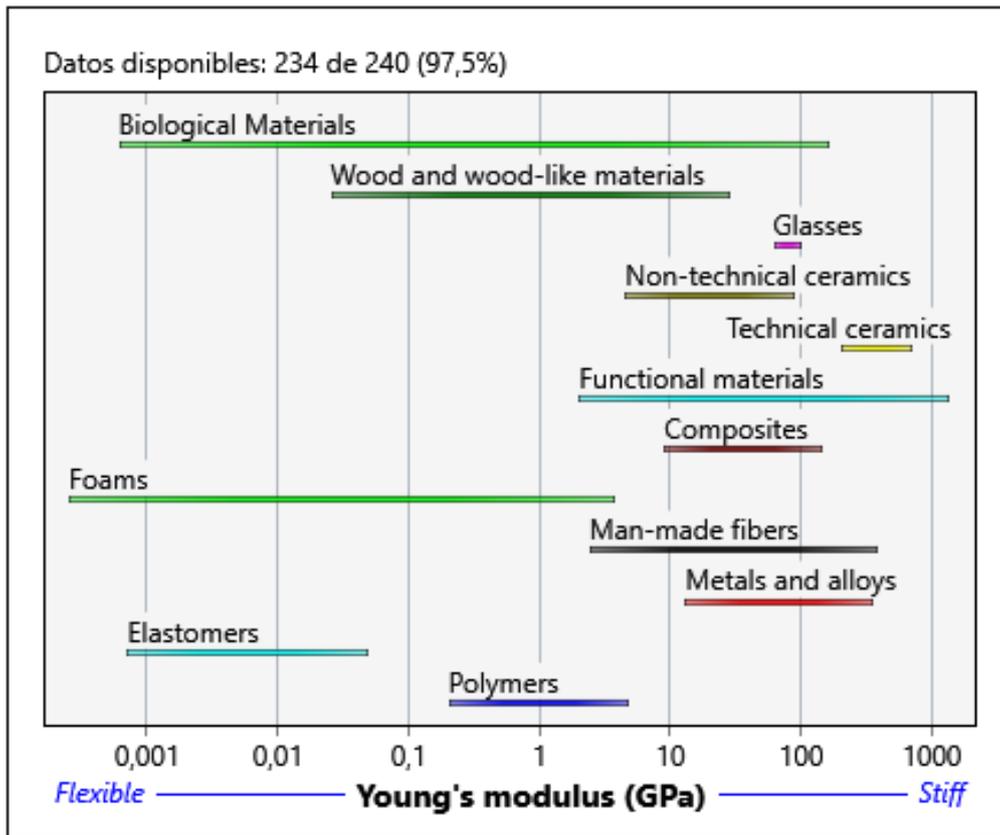
Gráfica 4. Relación tensión-deformación

tracción. La parte inicial, hasta el límite elástico, es lineal (ley de Hooke), y es elástica, lo que significa que la deformación es recuperable: el material vuelve a su forma original cuando se deja de aplicar la tensión. Las tensiones por encima del límite elástico provocan deformación o fractura permanentes.

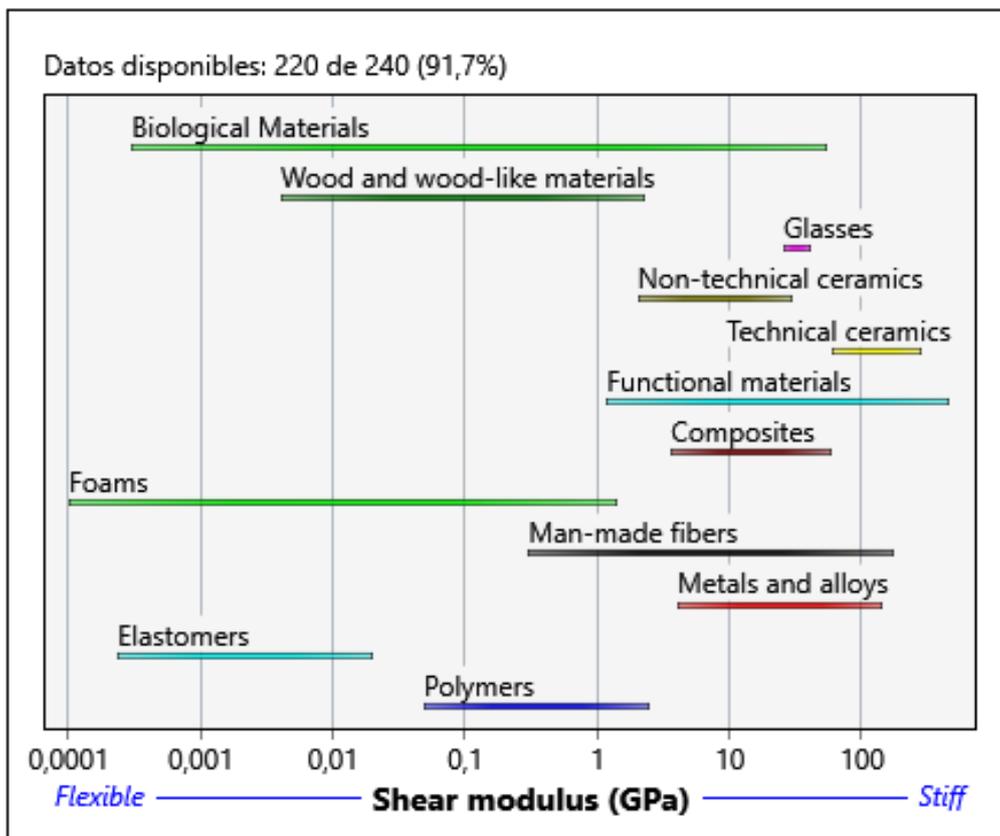
Dentro del régimen elástico la deformación es proporcional a la tensión, aunque esta se pueda aplicar en más de una forma. Igual que usamos el módulo de Young cuando se aplica una tensión de tracción, utilizaremos el módulo de elasticidad transversal cuando haya esfuerzos cortantes o el módulo de compresibilidad cuando se aplica una presión que deforma el volumen de un objeto. Estos tres parámetros tienen las mismas unidades, Pascales (Pa), aunque normalmente es más cómodo el uso de Giga Pascales (GPa).

Estos tres parámetros están relacionados, aunque para relacionarlos necesitamos el coeficiente de Poisson. Cuando se estira en una dirección, un material generalmente se contrae en las otras dos direcciones. El coeficiente de Poisson es la negativa de la relación entre la deformación transversal y la deformación axial cuando se aplica una carga de tracción.

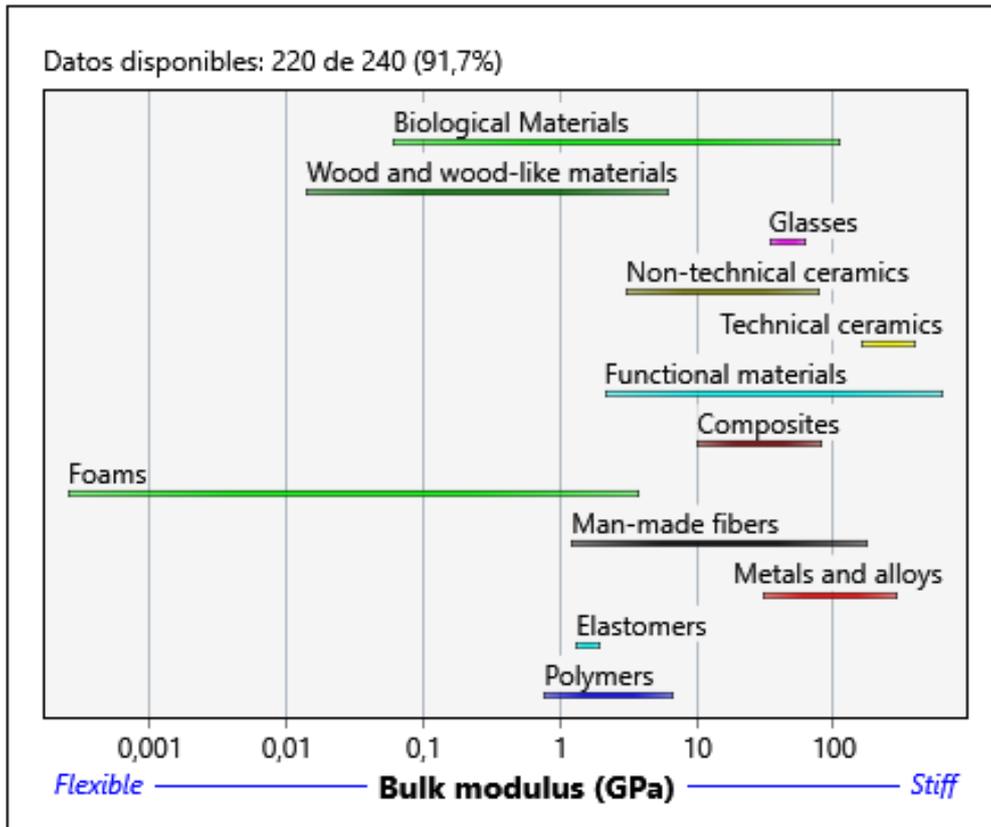
Es importante conocer estos parámetros para ver cómo se va a comportar nuestro material ante las distintas fuerzas a las que se va a ver sometido.



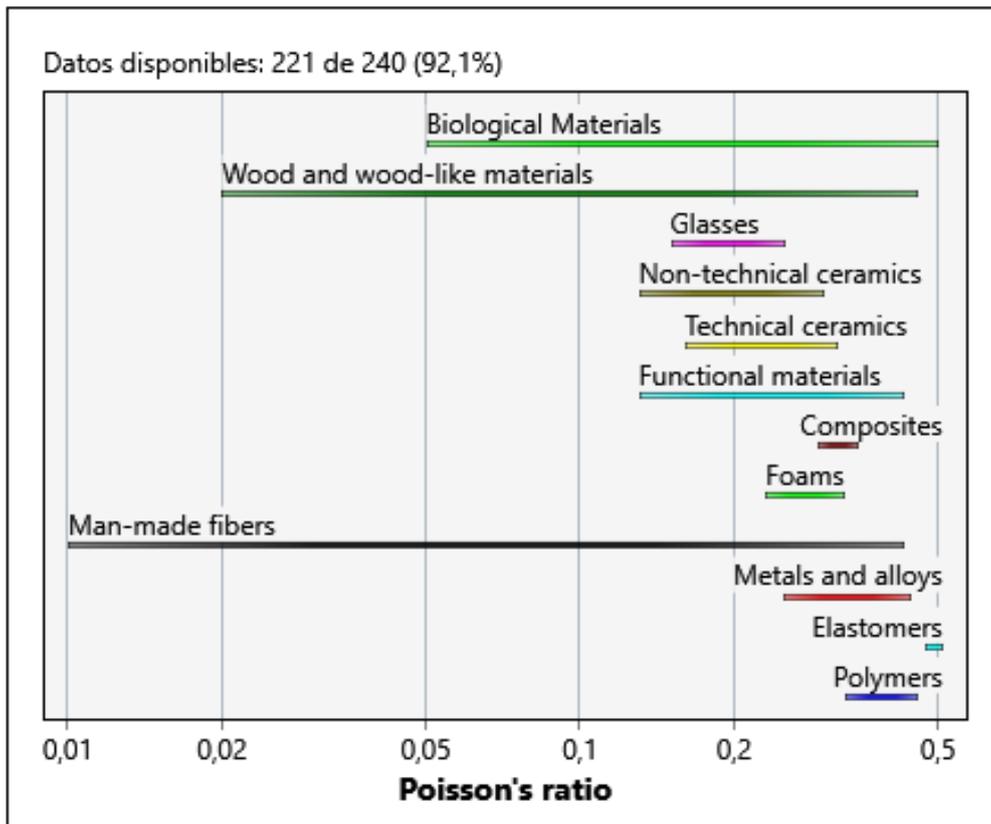
Gráfica 5. Módulo de Young según tipo de material



Gráfica 6. Módulo de elasticidad transversal según tipo de material



Gráfica 7. Módulo de compresibilidad según tipo de material



Gráfica 8. Coeficiente de Poisson según tipo de material

### **3.5 Límite elástico, tensión de rotura, esfuerzo de compresión y deformación**

Estos parámetros son realmente importantes ya que nos da datos sobre las fuerzas y presiones que pueden soportar los materiales a estudiar.

El primero que vamos a analizar es el límite elástico, que se podría decir que es el último punto de la recta en el que se encuentra en el régimen elástico. Una definición más concreta de este parámetro es que es la tensión máxima que puede soportar un material elástico sin sufrir deformaciones permanentes. Esto significa que todas las tensiones por debajo de esta provocarán una deformación en el material pero que en ningún caso será permanente, ya que siempre volverá a su estado original.

Si nosotros queremos fabricar un dron de altísima calidad sería conveniente que tenga un módulo de Young alto (significaría que las deformaciones no permanentes serían pequeñas), aunque es muchísimo más importante que tenga un límite elástico alto, ya que esto hará que tenga cambios permanentes en nuestro diseño y puede acabar en ruptura. Que las dos fuesen muy altas sería idóneo, pero como se ha comentado antes, daremos preferencia en la selección a un límite elástico alto. Los materiales funcionales y las fibras fabricadas por los humanos son los materiales que pueden llegar a tener un límite elástico más alto, hecho que tendremos en cuenta para seleccionar el material.

El siguiente parámetro que deberemos tener en cuenta es la tensión de rotura. La tensión de rotura es el punto más alto de la curva de tensión-deformación en un ensayo de tracción. Este punto se alcanza después del límite elástico. Cuando las deformaciones son permanentes se llega a un punto en el que el material no puede deformarse más y acaba en ruptura. Este es un parámetro importantísimo a la hora de ver la resistencia a la fractura que tiene un material ante estos esfuerzos de tracción. Al igual que el límite elástico los materiales que dominan en este apartado son los funcionales y las fibras de mano de obra.

La resistencia a la compresión se refiere a la capacidad de cierto material o elemento estructural para soportar cargas que reducen el tamaño de ese

material o elemento estructural cuando se aplica. Se aplica una fuerza en la parte superior e inferior de una muestra de prueba, hasta que la muestra se fractura o se deforma.

Los materiales como el hormigón y las rocas a menudo se evalúan mediante una prueba de resistencia a la compresión y, en estos casos, se produce fractura.

También se puede probar la resistencia a la compresión de materiales como el acero, y en el caso de materiales dúctiles, la deformación tiende a ocurrir. Inicialmente, un material dúctil acomodará la carga aplicada ajustando su estructura interna. Para metales dúctiles, la resistencia a la tracción suele ser el indicador preferido para la medición y la comparación. Esto se debe a que la tensión de tracción mide las fuerzas necesarias para separar un material.

Los líderes en este campo seguirán siendo los materiales funcionales, seguidos muy de cerca por las cerámicas técnicas.

Por último, comentaremos la deformación. Esta se refiere al cambio de forma o tamaño producido por uno o varios esfuerzos sobre el material. Esta deformación se produce desde que se aplica un esfuerzo inicial al material, hasta que este se fractura. Esta deformación la mediremos en porcentaje relacionando la longitud inicial del material con la longitud final tras la deformación.

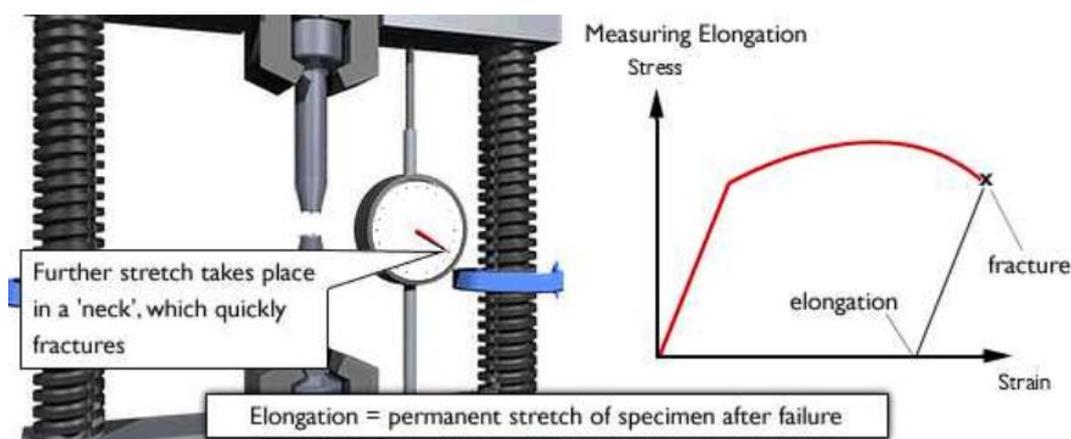
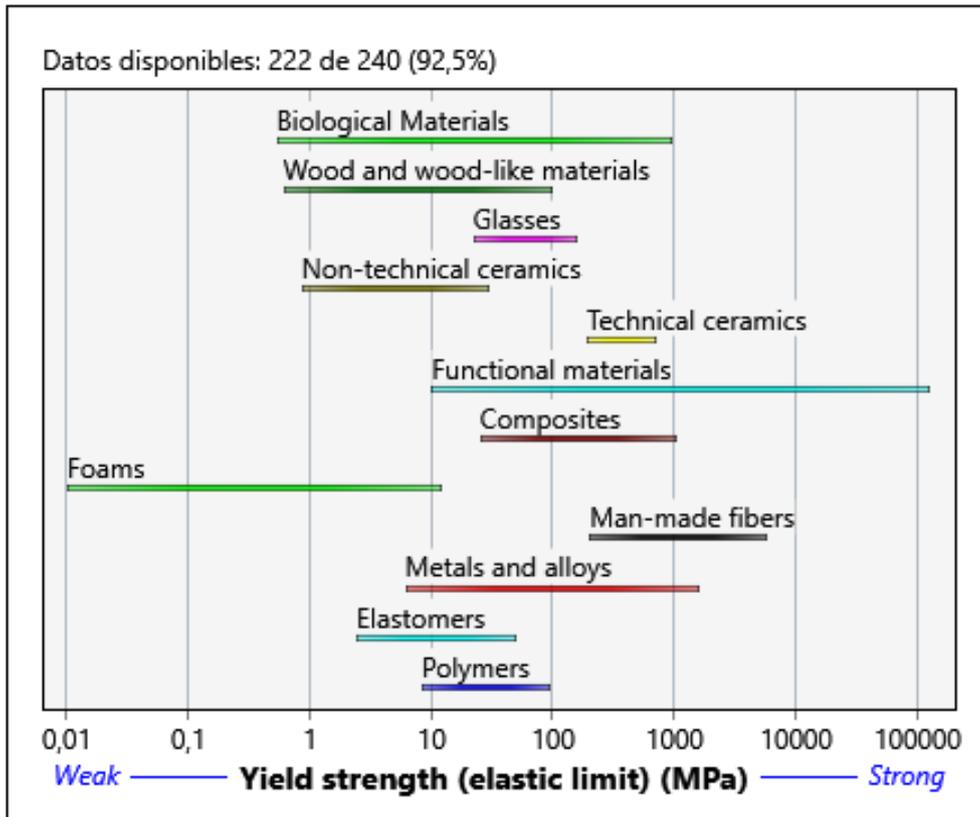
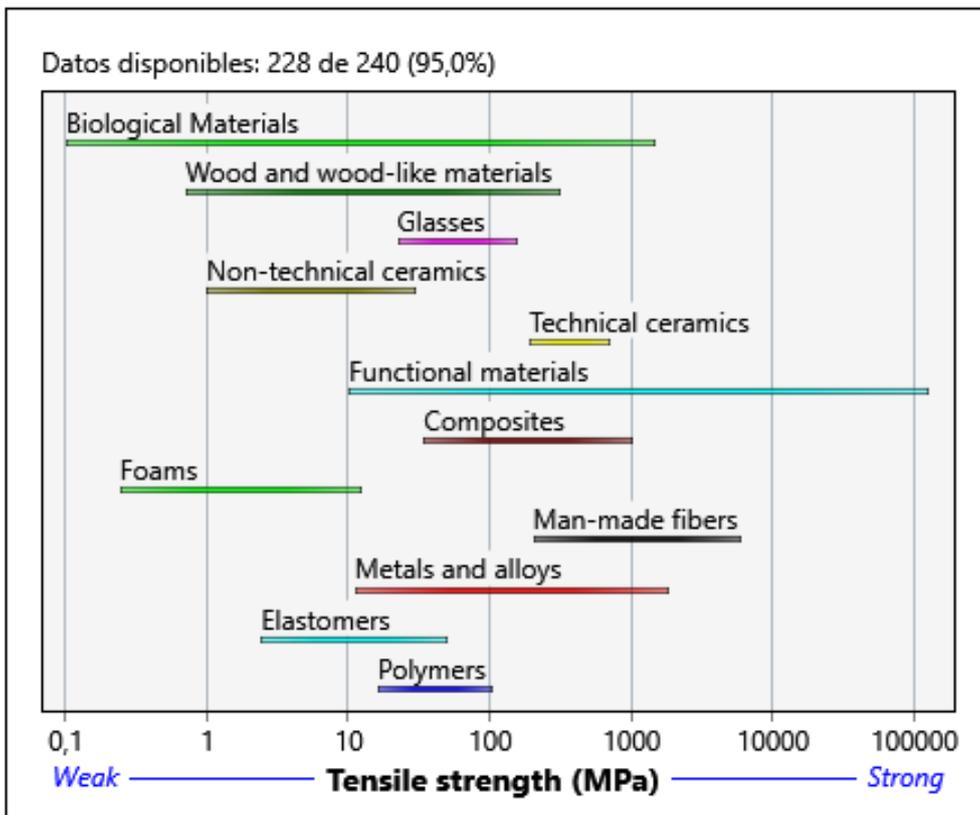


Ilustración 13. Ejemplo de la curva tensión-deformación

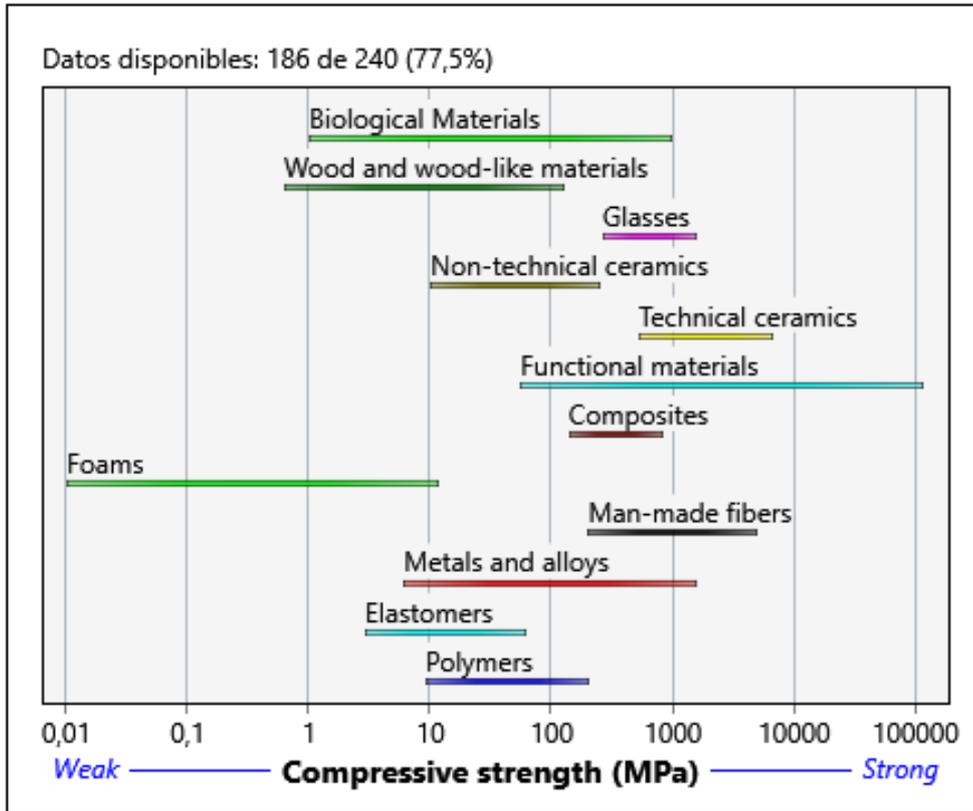
En este apartado, podemos afirmar con total seguridad, que los elementos que más deformación permiten son los elastómeros con una gran diferencia respecto a los demás. En segundo y tercer lugar, encontramos a los polímeros y a los materiales funcionales respectivamente.



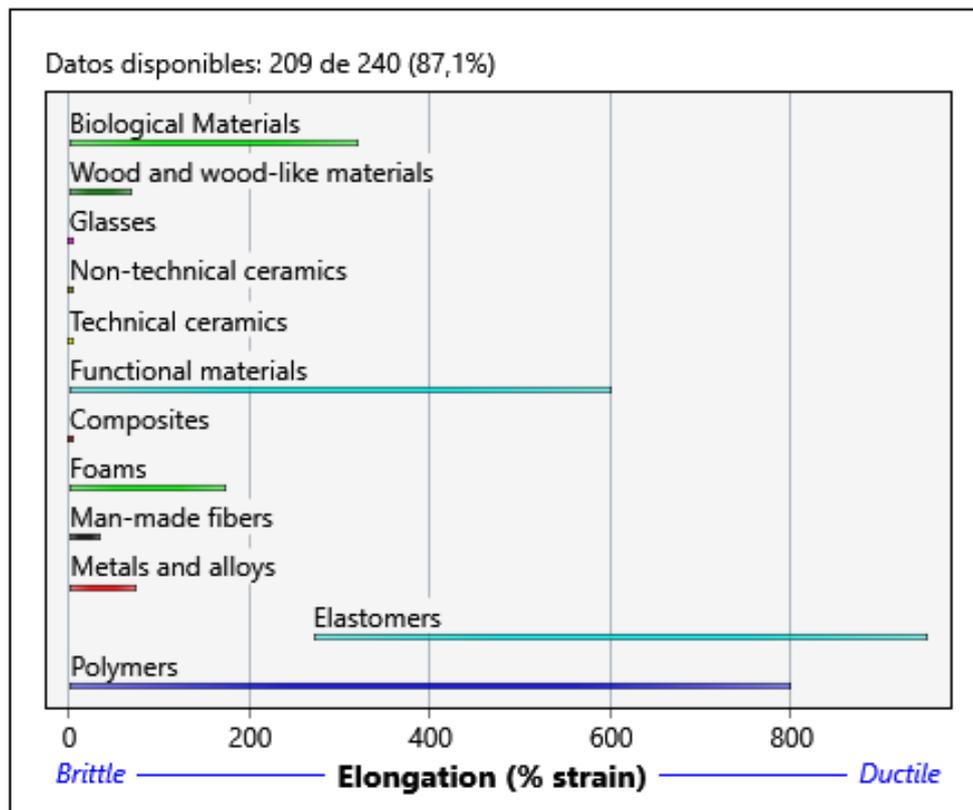
Gráfica 9. Límite elástico según tipo de material



Gráfica 10. Tensión de rotura según tipo de material



Gráfica 11. Esfuerzo de compresión según tipo de material



Gráfica 12. Deformación según tipo de material

### 3.6 Dureza Vickers

El método de prueba de dureza de Vickers consiste en utilizar un diamante como “penetrador”, aplicando una fuerza que puede variar entre 1 y 1000 N normalmente. Este diamante utilizado es muy específico, ya que debe tener forma de pirámide de base cuadrada y con un ángulo de  $136^\circ$  entre sus caras opuestas. Se suele aplicar la carga completa durante un tiempo de entre 10 y 15 segundos.

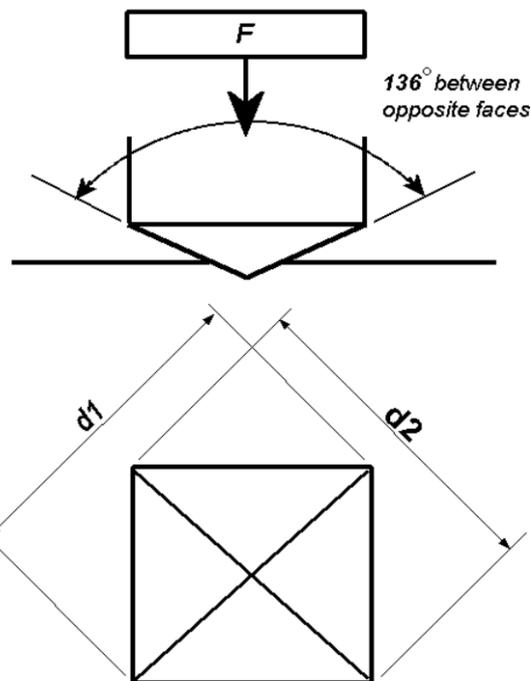
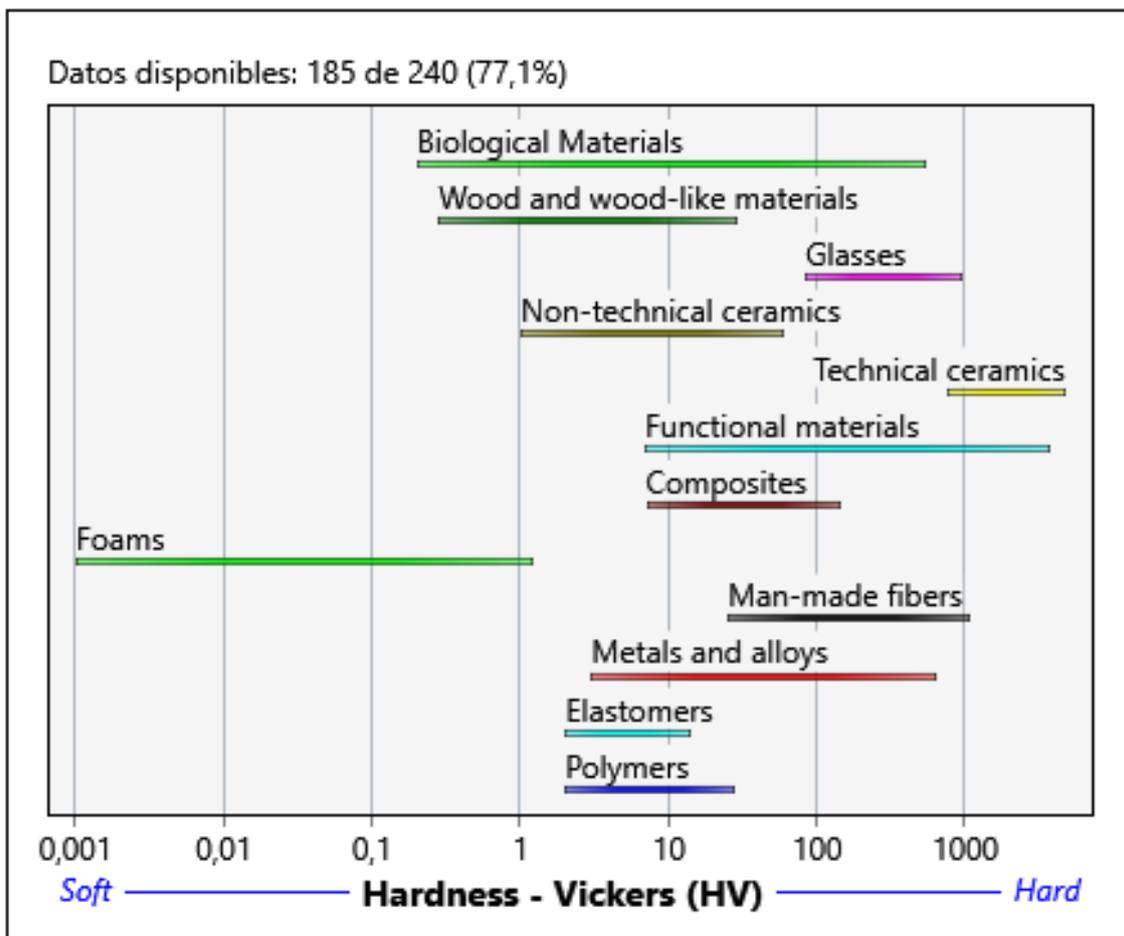


Ilustración 14. Parámetros del ensayo de dureza Vickers

La dureza se obtiene al relacionar la fuerza aplicada, con el ángulo de  $136^\circ$  y la media aritmética de las diagonales del cuadrado generado por la penetración del diamante en el material. Esta escala está pensada de tal forma que cuanto más duro sea el material, menos penetrará en la superficie y por lo tanto sus diagonales serán menores. Al ser las diagonales inversamente proporcionales a la dureza, esta será mayor cuanto menos penetre el diamante en la superficie (como es lógico).

Este factor es importante a la hora de seleccionar un material para fabricar el dron, ya que en el aire o en la superficie terrestre podría encontrarse con algún objeto que podría dañar la estructura del dispositivo e incluso derribarlo. En drones marinos también se tendrán en cuenta ya que puede chocar con alguna roca y que la ruptura superficial de la carcasa permita entrar el agua al interior y hundir nuestro vehículo.

Como veremos a continuación, las cerámicas técnicas, materiales funcionales y las fibras fabricadas por el hombre son las que mejor dureza Vickers tienen. De esta forma estamos comprobando que estas tres categorías de materiales son las que mejores propiedades mecánicas tienen, y por lo tanto las tendremos en cuenta más adelante en la selección de los materiales.

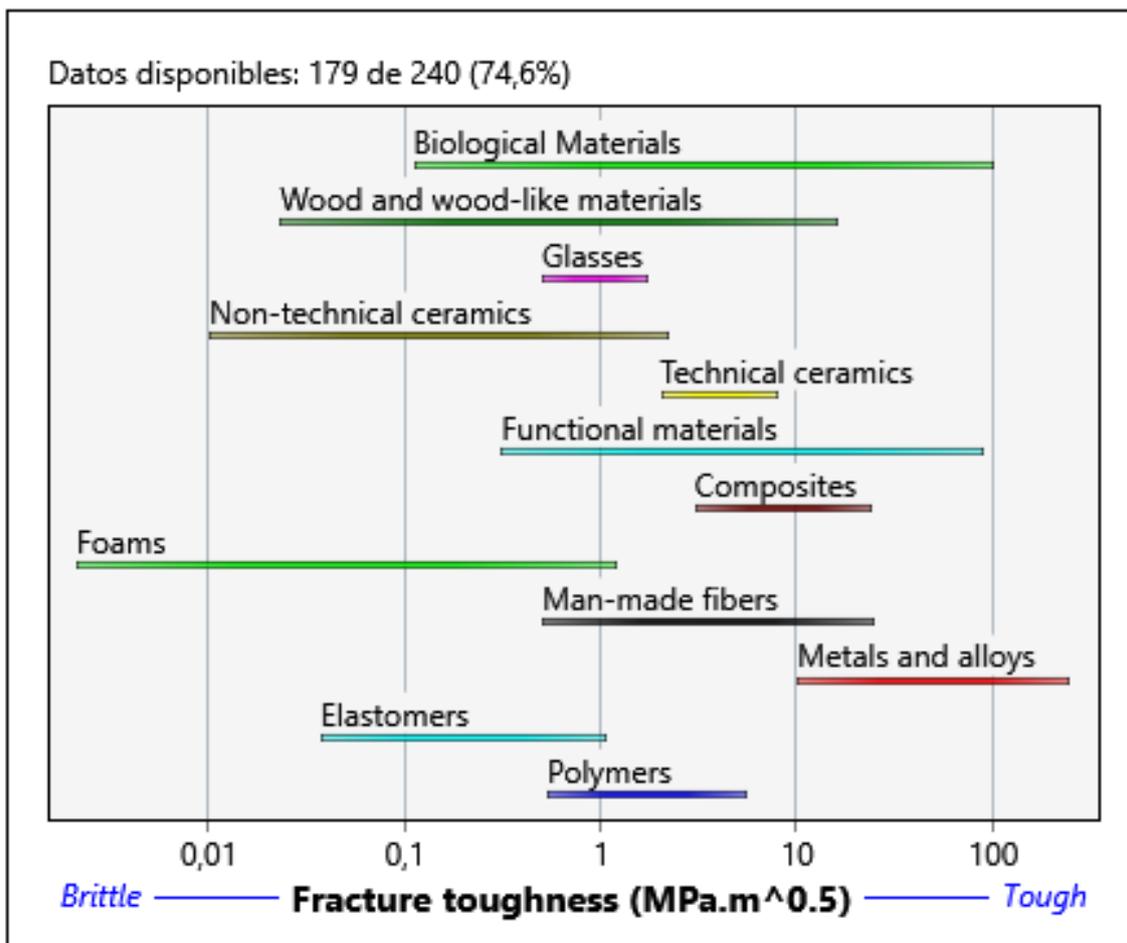


Gráfica 13. Dureza Vickers según tipo de material

### 3.7 Resistencia a la fractura

La resistencia a la fractura, (unidades:  $\text{MPa m}^{1/2}$  o  $\text{MN / m}^{1/2}$ ) mide la resistencia de un material a la propagación de una grieta. Se mide cargando una muestra que contiene una grieta de longitud introducida  $2c$  o una grieta de longitud superficial  $c$ , registrando el esfuerzo de tracción o la carga de flexión a la que la grieta se propaga repentinamente.

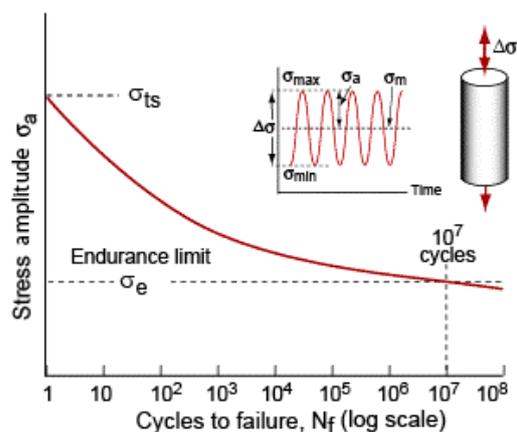
La propagación de las grietas en un material es de vital importancia para ciertas actividades, ya que pueden acabar con una fractura completa del material haciendo que nuestro dron quede inutilizado por completo. Aunque es muy importante no le daremos la misma relevancia que le daremos a la tensión de rotura o la dureza.



Gráfica 14. Resistencia a la fractura según tipo de material

### 3.8 Resistencia a la fatiga a los 10<sup>7</sup> ciclos

Cuando los materiales se ven sometidos a ensayos de fatiga o actividades que produzcan fatiga sobre el material es posible que se produzca una rotura de este con una tensión inferior a la tensión de rotura que se tendría antes del ensayo. Para dar una muestra de cómo actúa la fatiga sobre el material se fija un número de ciclos elevado (en este caso 10<sup>7</sup> ciclos) y se comprueba cual sería la tensión necesaria para que la pieza se rompiera tras los ciclos de fatiga.

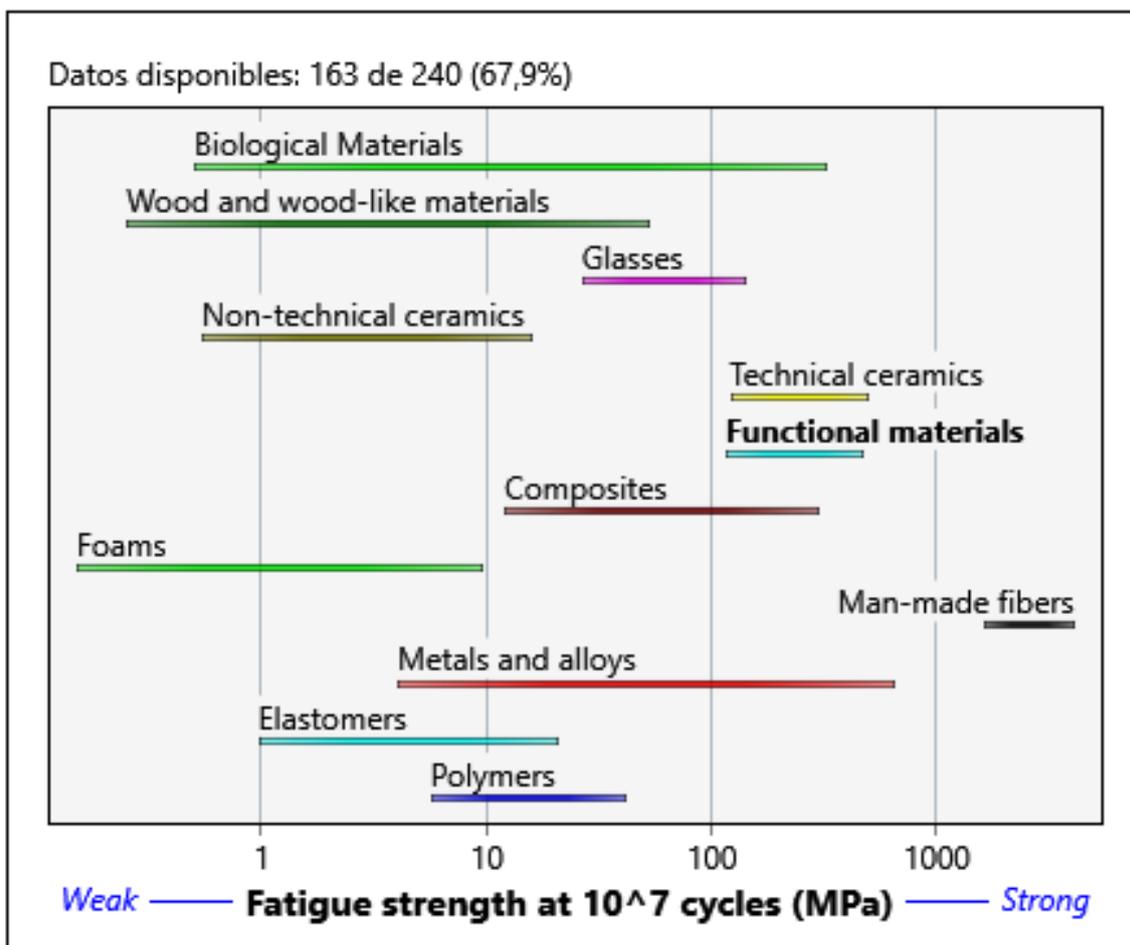


Gráfica 15. Tensión de rotura en función de los ciclos de fatiga

Este valor nos puede servir para definir que material sería mejor para la fabricación de un dron con una vida útil elevada. Los drones se ven sometidos a

muchas oscilaciones provocadas por los vientos que provocarán una fatiga en él. Tras muchos vuelos esta fatiga podría derivar en una rotura a partir de determinados ciclos.

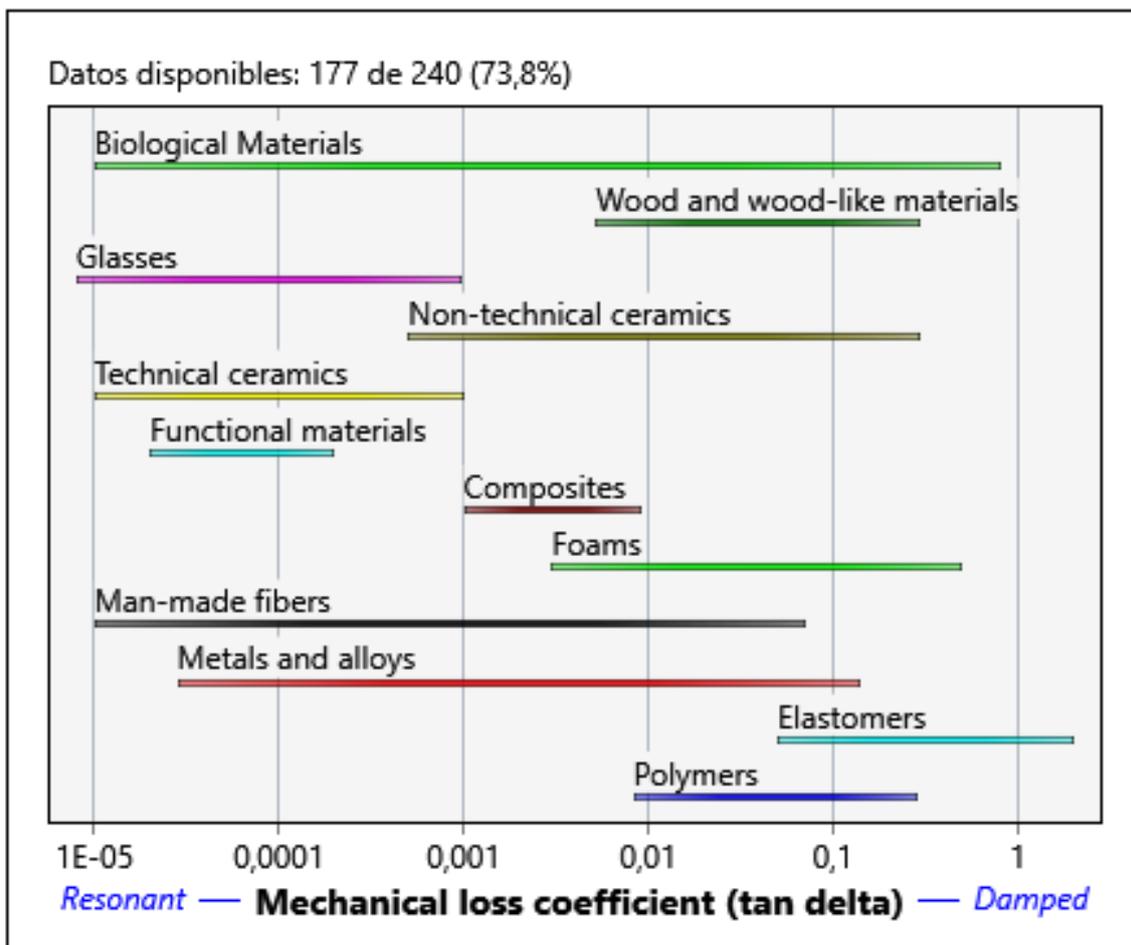
Comprobamos en la siguiente gráfica, que las fibras de mano de obra tienen un excelente comportamiento ante la fatiga, por lo tanto estos materiales siguen ganando enteros para fabricación de los drones de alta gama.



Gráfica 16. Resistencia a la fatiga a los  $10^7$  ciclos según tipo de material

### 3.9 Coeficiente de pérdida mecánica (tan delta)

El coeficiente de pérdida mecánica mide el grado en el cual un material disipa una energía vibracional. Si un material está cargado elásticamente, este almacenará una energía elástica por unidad de volumen. Si se aplica una carga y luego se quita esta carga, se disipará una energía que podremos relacionar con el coeficiente de pérdida mecánica.



Gráfica 17. Coeficiente de pérdida mecánica según tipo de material

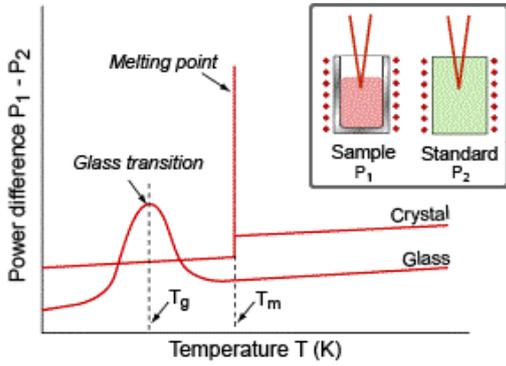
### 3.10 Temperatura de fusión y temperatura de transición vítrea

Dos temperaturas, la temperatura de fusión y la temperatura de transición vítrea son fundamentales porque se relacionan directamente con la resistencia de los enlaces en el sólido. Los sólidos cristalinos tienen un punto de fusión fuerte, mientras que los sólidos no cristalinos no. La temperatura del vidrio caracteriza la transición del sólido al líquido muy viscoso.

Medir el punto de fusión es bastante sencillo: simplemente hay que calentar el sólido hasta que se derrita y luego registrar la temperatura. Este método funciona, pero no es tan preciso como nos gustaría debido a los gradientes de temperatura, y no funciona para la temperatura de transición vítrea porque es un cambio gradual.

Todas las temperaturas de transición de fase se miden escaneando la calorimetría diferencial. La muestra de prueba y un material calibrado estándar se calientan en cámaras aisladas. La temperatura de cada uno se controla y la

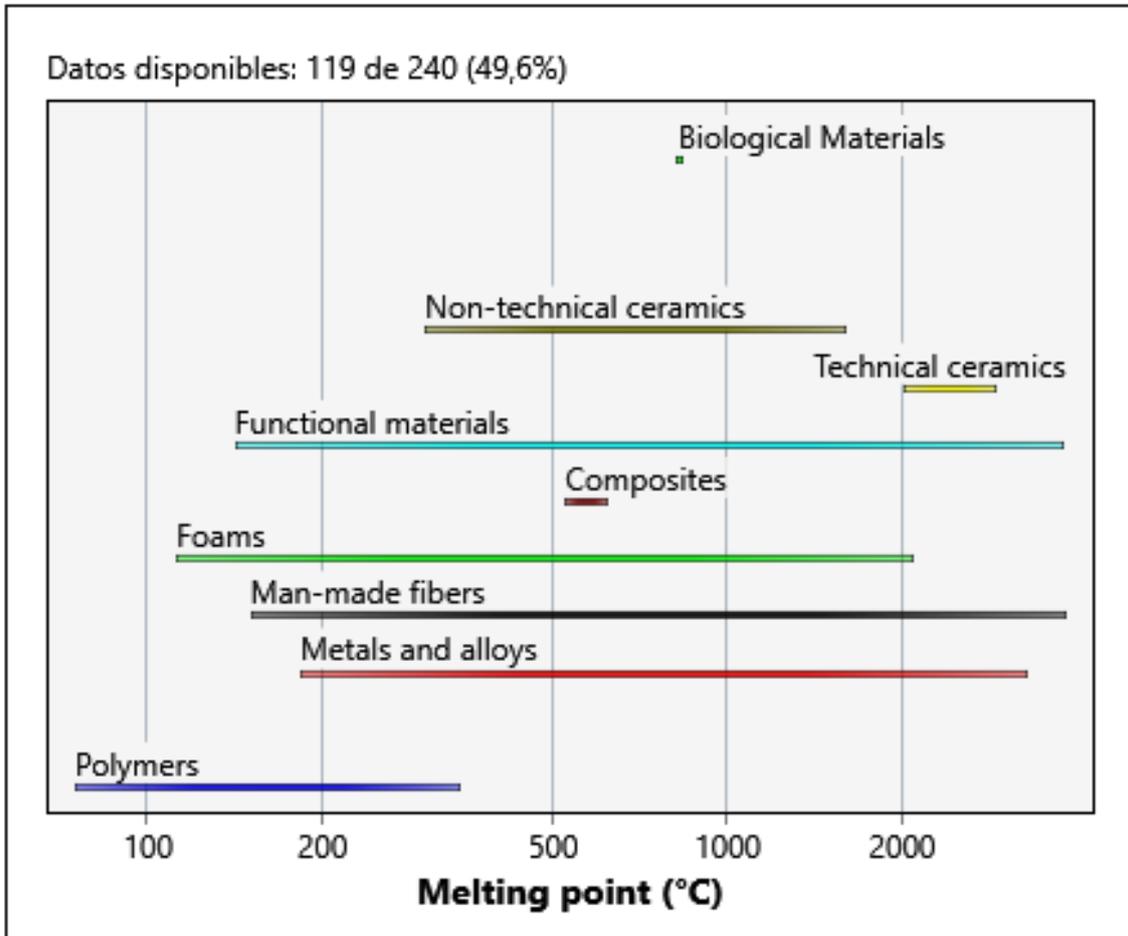
potencia de la muestra se ajusta, utilizando un circuito de retroalimentación, de modo que su temperatura se mantenga igual que la del estándar, al que



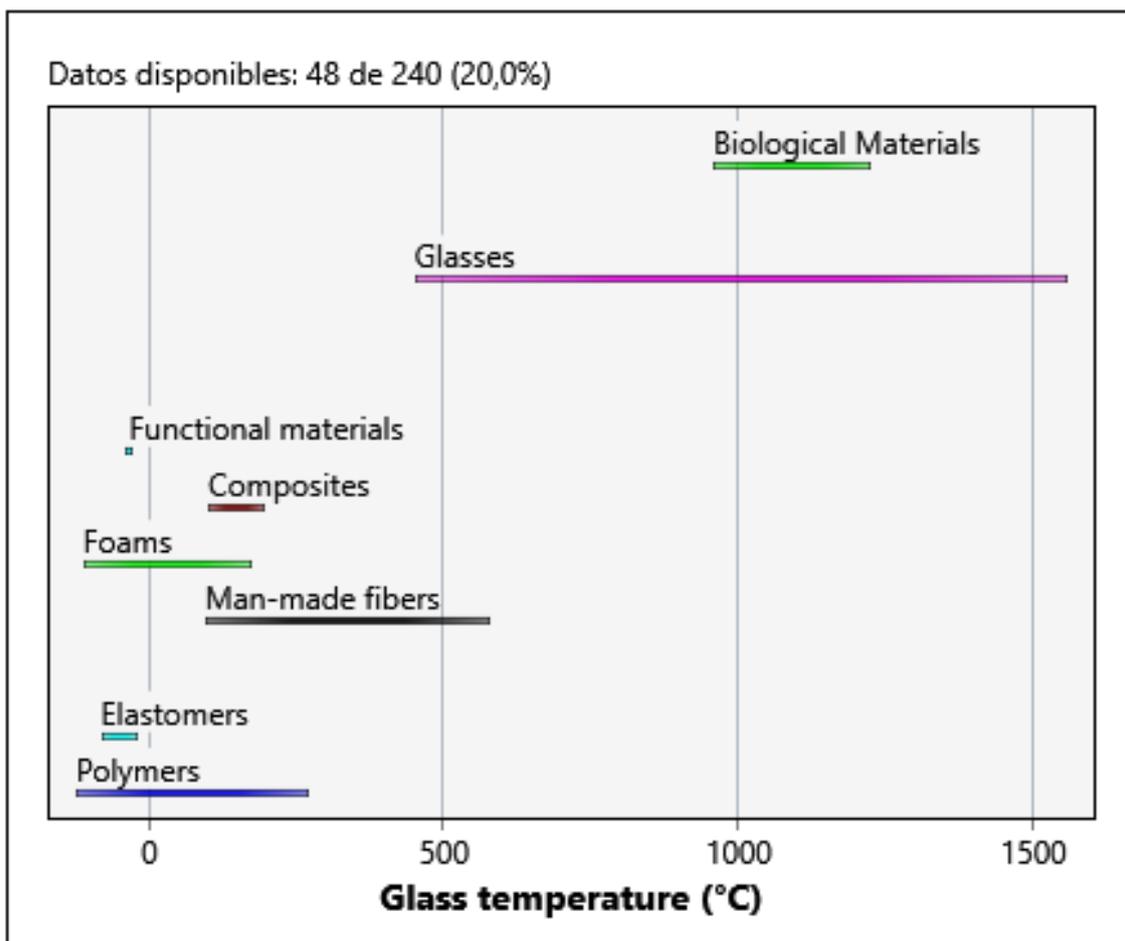
Gráfica 18. Diferencia de potencia en función de la temperatura

corresponde la potencia. Cuando la muestra se derrite o pasa por su transición vítrea, se absorbe un calor latente y eso significa que se debe bombear más energía a la muestra a la temperatura a la que ocurre. El trazado contra la temperatura, como se muestra en la figura, identifica las transiciones. Se utiliza el mismo equipo para medir el calor latente y el calor específico.

específico.



Gráfica 19. Punto de fusión según tipo de material



Gráfica 20. Temperatura de transición vítrea según tipo de material

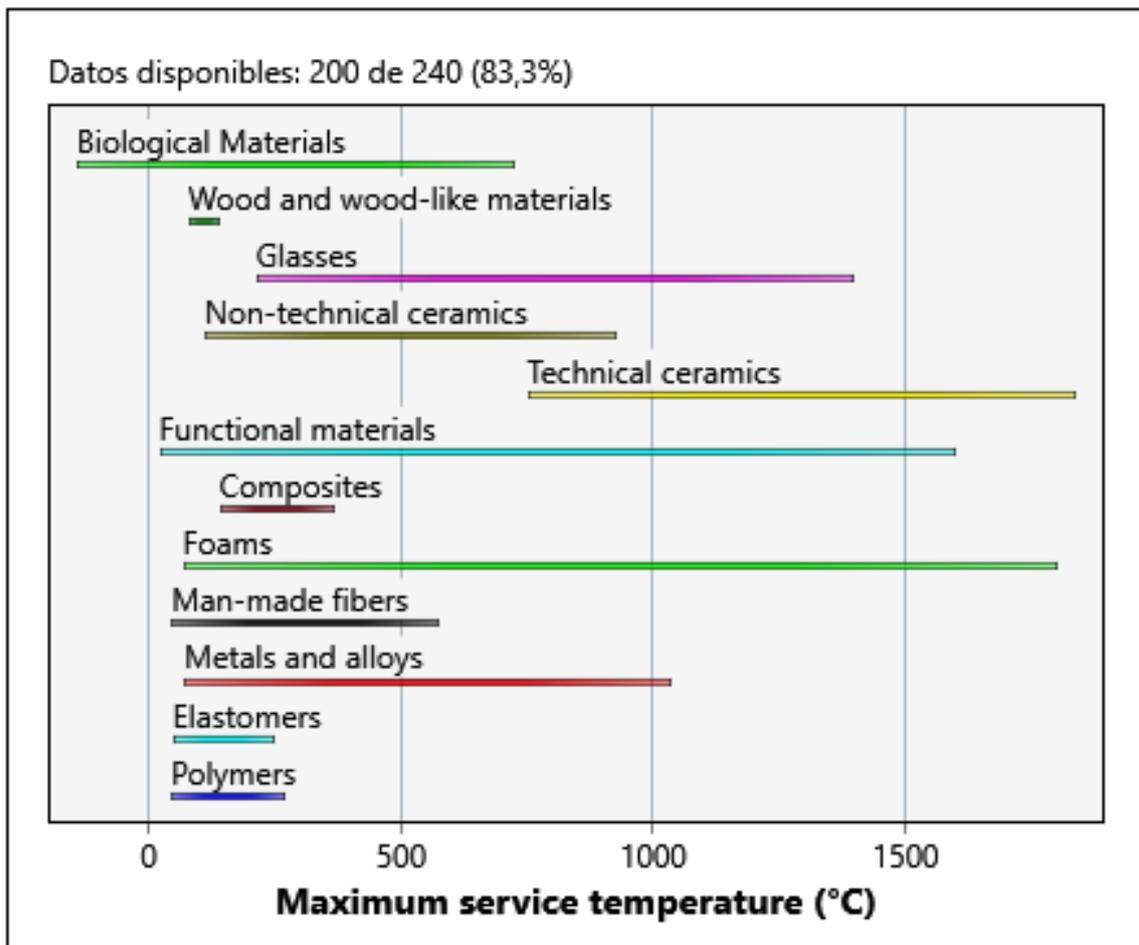
### 3.11 Temperatura de operación máxima y mínima

Es útil, en esta rama de la ingeniería, definir dos temperaturas empíricas: las temperaturas máximas y mínimas de operación. El primero nos dice la temperatura más alta a la que el material puede usarse razonablemente sin oxidación, cambio químico o desviación excesiva o que la "deformación" se convierta en un problema (la temperatura de uso continuo o CUT es una medida similar). El segundo es la temperatura por debajo de la cual el material se vuelve frágil o inseguro de usar. Estos son empíricos, y no hay definiciones universalmente aceptadas.

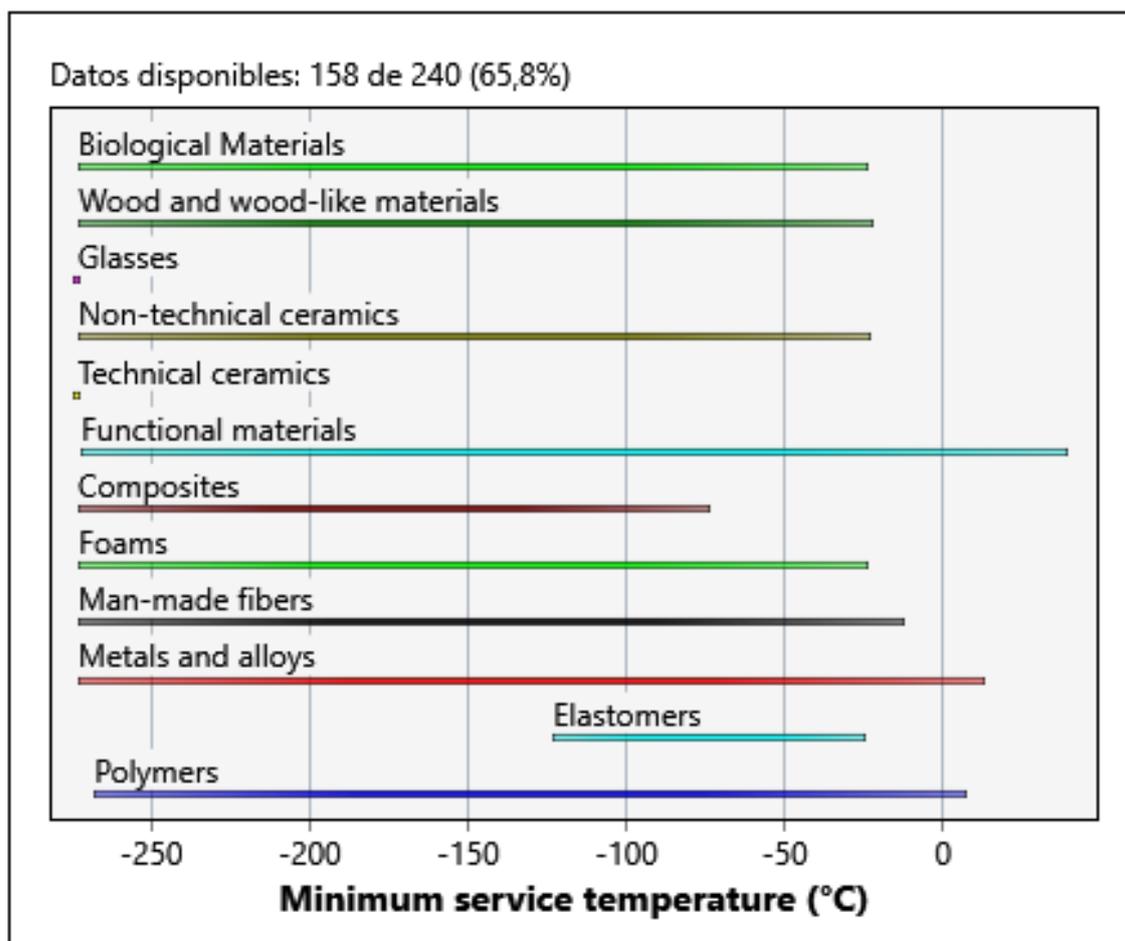
Para los polímeros, la temperatura importante es a partir de la cual el material comienza a ablandarse. Para la mayoría de los polímeros, una temperatura alta significa "cualquier temperatura superior a 135°C", pero algunos, como el PTFE (Teflón), pueden usarse a temperaturas considerablemente más altas. Se utilizan varias pruebas para evaluar la

temperatura a la que se puede usar un polímero. El índice térmico relativo (RTI) y la temperatura de uso continuo (CUT) son medidas de durabilidad a largo plazo. La temperatura de ablandamiento de Vicat (VST) y la temperatura de desviación de calor (HDT), son pruebas a corto plazo que miden solo la temperatura a la cual la desviación bajo carga se vuelve significativa. Son útiles para la clasificación, pero ninguno nos dice nada fundamental sobre el material.

La temperatura mínima de servicio para los aceros es la temperatura de transición de dúctil a frágil. Para los elastómeros es la temperatura de transición vítrea la que toma importancia; por debajo de esta dejan de ser elásticos y se vuelven duros y, a menudo, quebradizos.



Gráfica 21. Temperatura de operación máxima según tipo de material



Gráfica 22. Temperatura de operación mínima según tipo de material

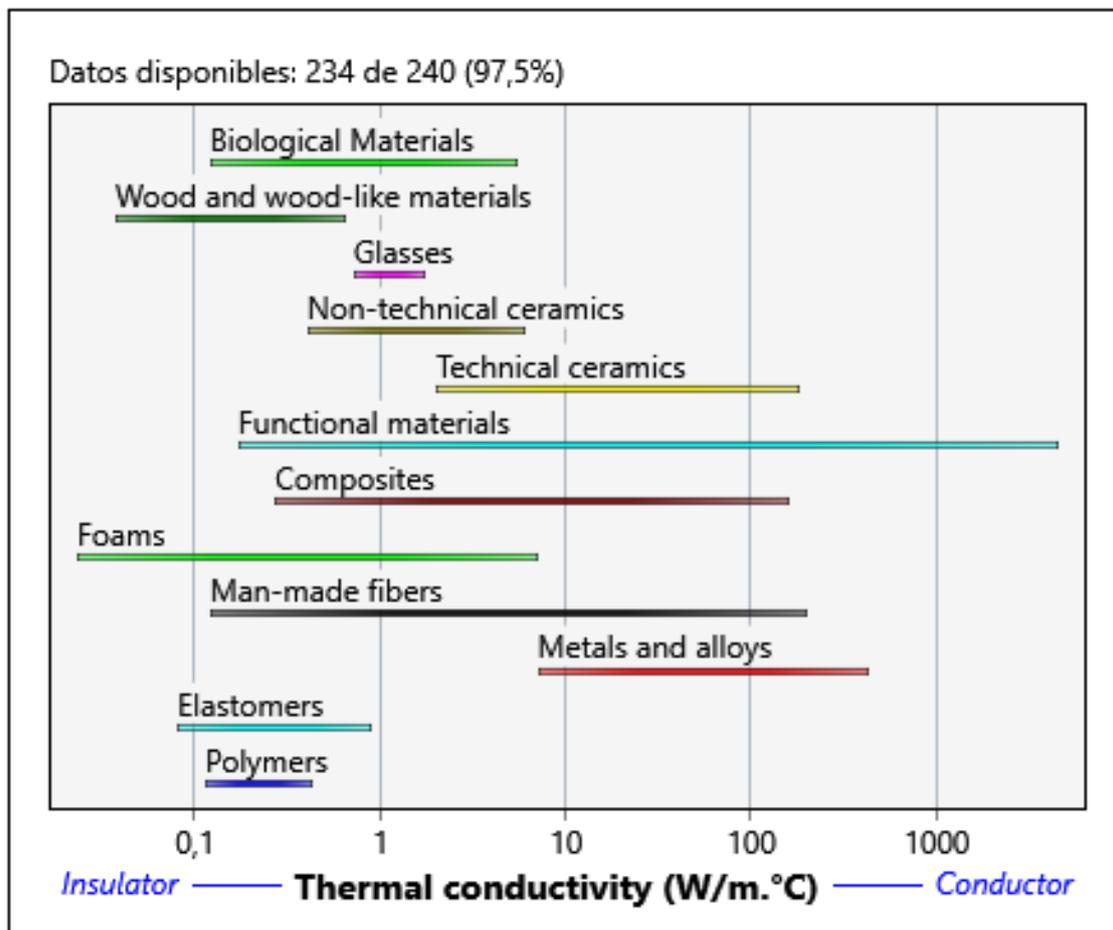
### 3.12 Conductividad térmica

Este parámetro es muy importante, ya que es una propiedad física que poseen los materiales y mide la capacidad de conducir calor de estos. Desde un punto de vista más científico, se puede decir que es la capacidad que tienen las sustancias de transmitir la energía cinética que tienen sus moléculas a otras próximas. Su inversa es la resistividad térmica.

Cuanto mayor sea la conductividad térmica de un material, mejor conductor térmico será, y cuanto menor sea esta, mejor aislante térmico será el material en cuestión. La conductividad térmica suele ser bastante alta en metales, mientras que en los polímeros es bastante más baja. Destaca también la excesivamente baja conductividad térmica de algunos materiales, como la fibra de vidrio, que será considerada como un aislante térmico.

Este mecanismo de transferencia de calor se presenta en todos los estados físicos, aunque predomina en los materiales sólidos. Para medir esta

propiedad en los materiales se hace a la misma temperatura, que normalmente será a temperatura ambiente más o menos.



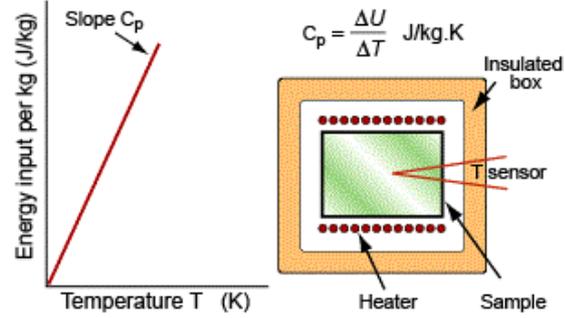
Gráfica 23. Conductividad térmica según tipo de material

### 3.13 Calor específico

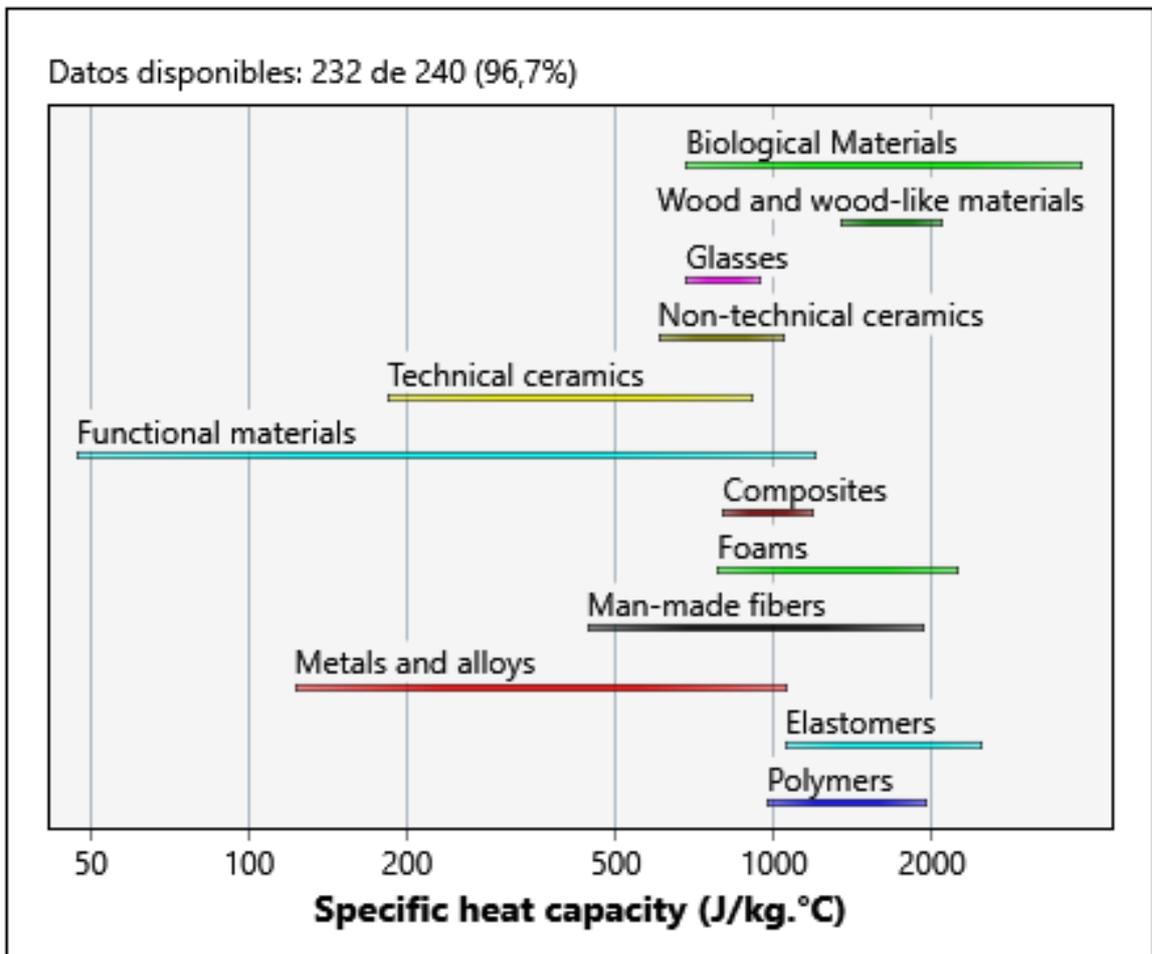
La energía es necesaria a la hora de calentar un material. La energía para calentar 1 kg por 1°C se denomina capacidad calorífica específica o calor específico, y la medición generalmente se realiza a presión constante (presión atmosférica). Sus unidades son J/kgK.

Cuando se trata de gases, es más común medir la capacidad de calor a un volumen constante, que será diferente a la medida a presión constante. Para los sólidos, la diferencia entre a volumen constante y a presión constante es tan leve que puede ignorarse, y lo haremos, simplemente llamando a la capacidad calorífica específica. Se mide mediante la técnica de calorimetría, que también es la forma estándar de medir la temperatura del vidrio. En la gráfica adjunta se muestra cómo se realiza esta medición. Una cantidad medida de energía (aquí,

energía eléctrica) se bombea a una muestra de material de masa conocida. Se mide el aumento de temperatura. La capacidad calorífica específica es la energía requerida para elevar la temperatura de un kilogramo del material en 1°C. Los calorímetros reales son mucho más complicados que esto, pero el



Gráfica 24. Energía aportada por kilogramo en función de la temperatura

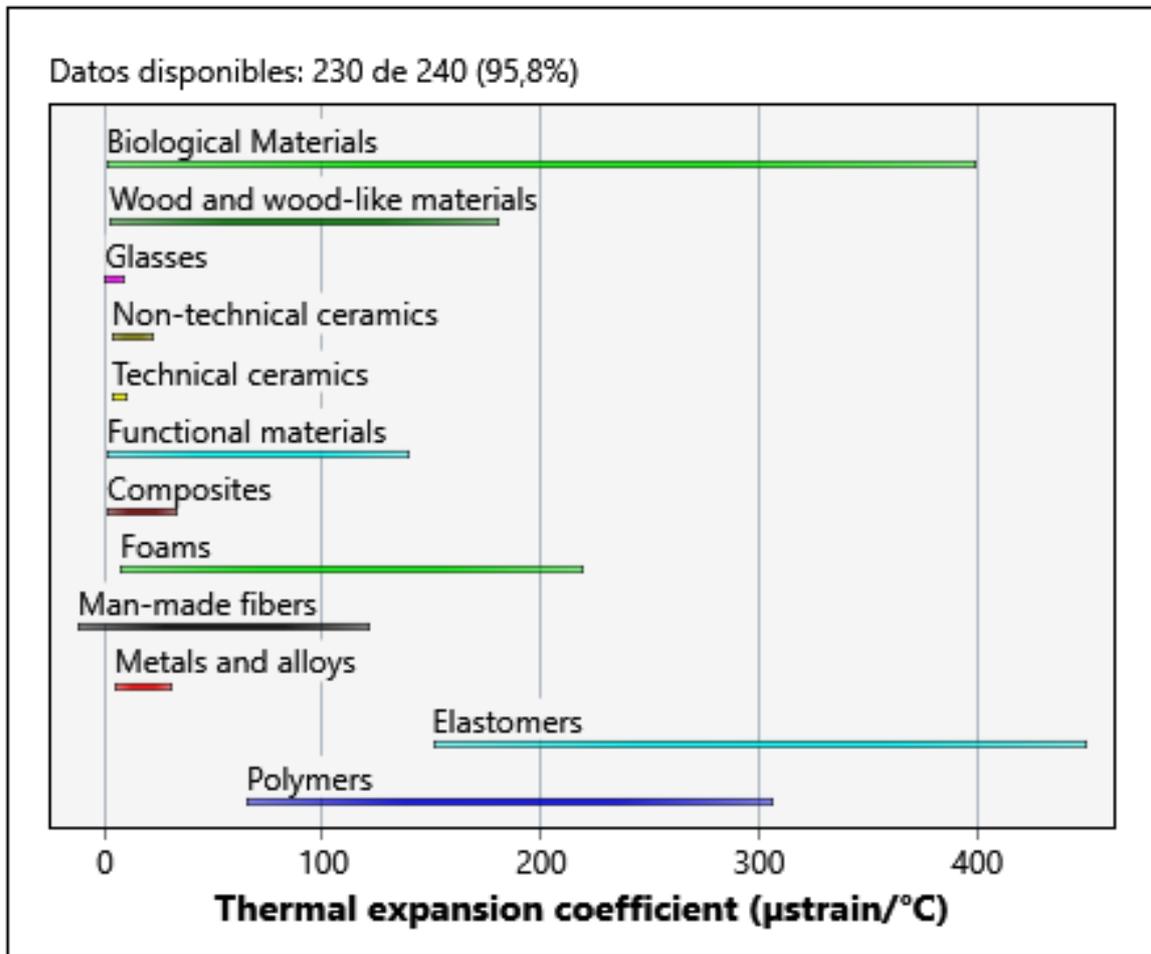


Gráfica 25. Calor específico según tipo de material

### 3.14 Coeficiente de expansión térmica

La mayoría de los materiales sufren una dilatación cuando estos son calentados. Esta relación entre la deformación que sufre el material por grado de temperatura es medida por el coeficiente de expansión térmica.

Como veremos en la gráfica que se encuentra a continuación los materiales que son más propensos a deformarse por el efecto de la temperatura son, como podíamos esperar, los materiales biológicos, los elastómeros y los polímeros.

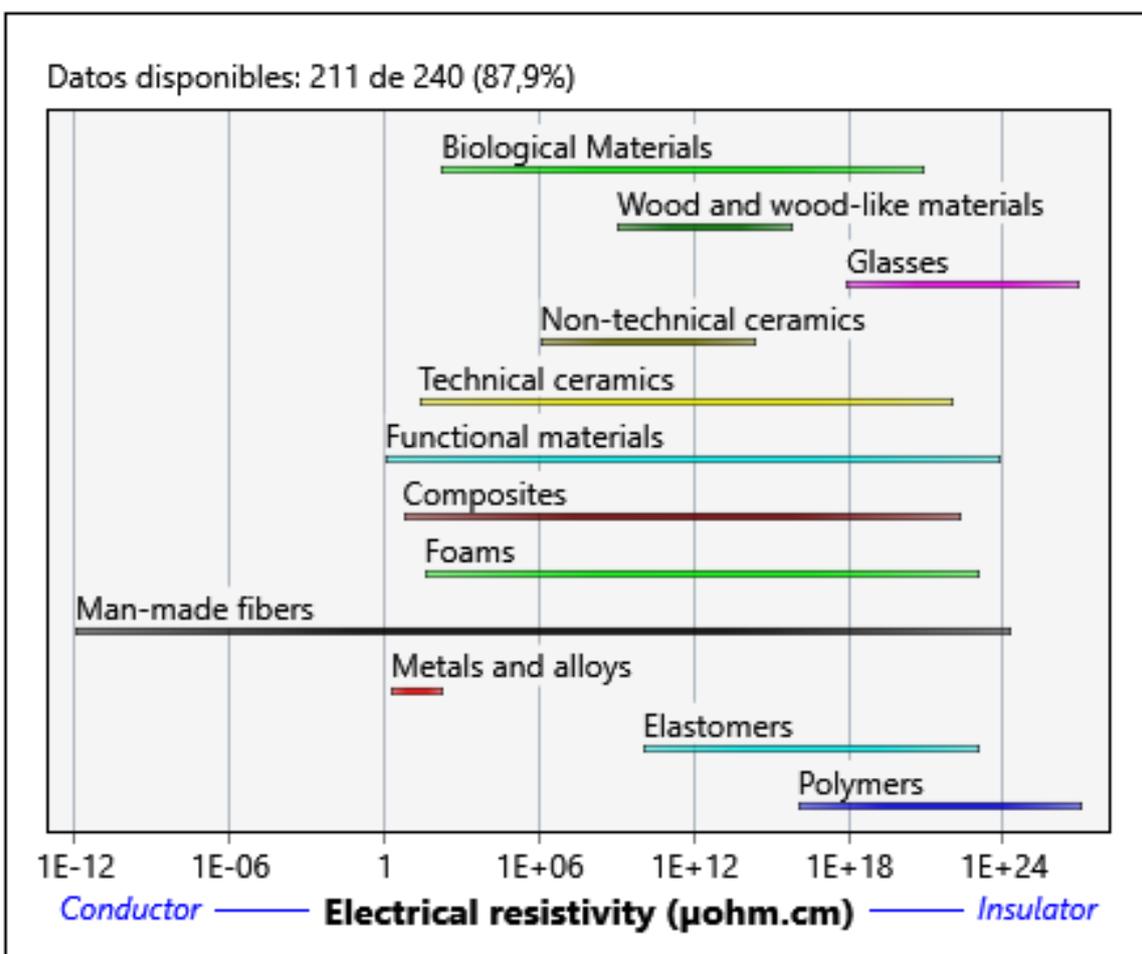


Gráfica 26. Coeficiente de expansión térmica según el tipo de material

### 3.15 Resistividad eléctrica

La resistividad eléctrica es la resistencia eléctrica específica de cada material. Este parámetro relaciona la resistencia eléctrica con la longitud y sección del material. Es muy importante el conocimiento de este valor ya que nos da una información muy relevante del comportamiento eléctrico de dicho material.

Un alto valor de resistividad eléctrica nos diría que ese material es un gran aislante eléctrico, mientras que un valor bajo de este nos indicaría que el material que estamos estudiando es un buen conductor eléctrico.

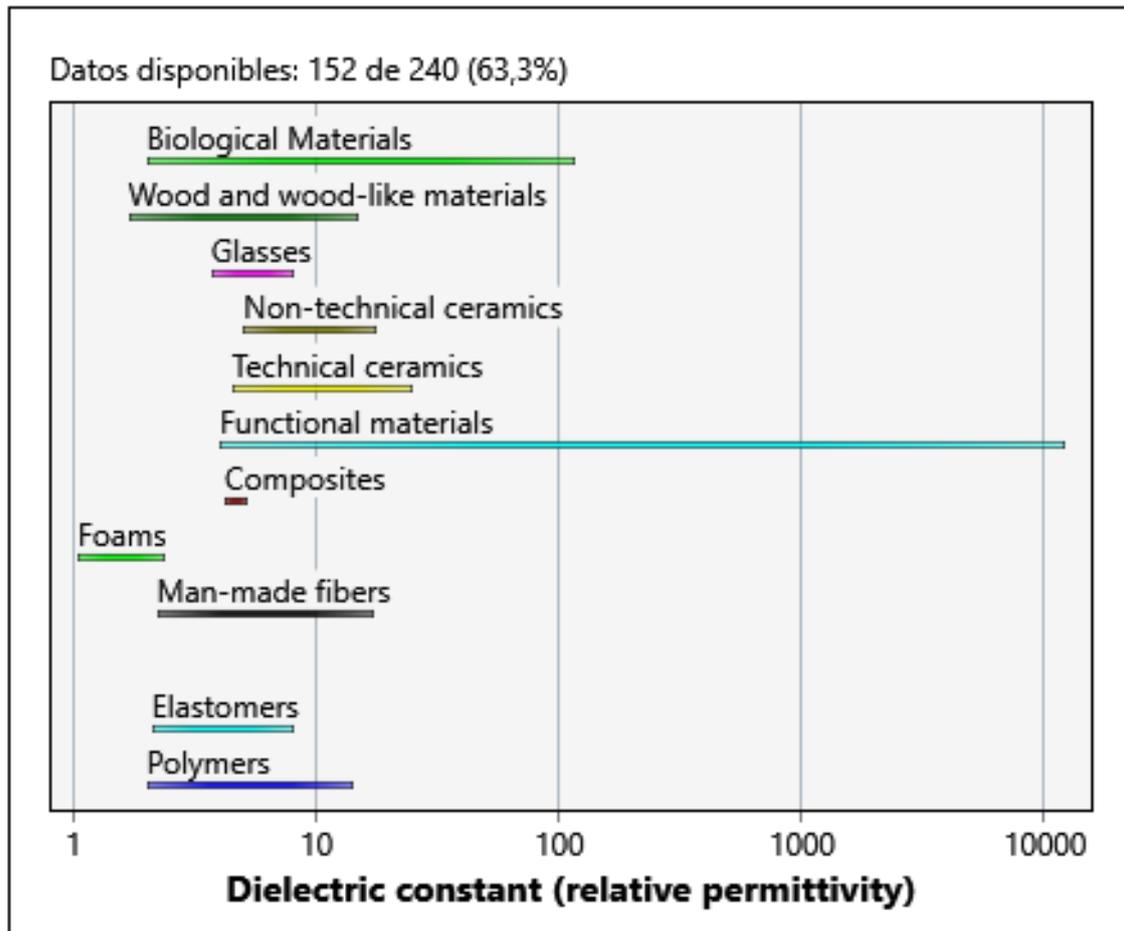


Gráfica 27. Resistividad eléctrica según tipo de material

### 3.16 Constante dieléctrica

Este parámetro está relacionado con los materiales dieléctricos. Es una propiedad macroscópica que asocia al medio dieléctrico con la permitividad relativa. Este valor es una tasa de permitividad estática relativa de un material.

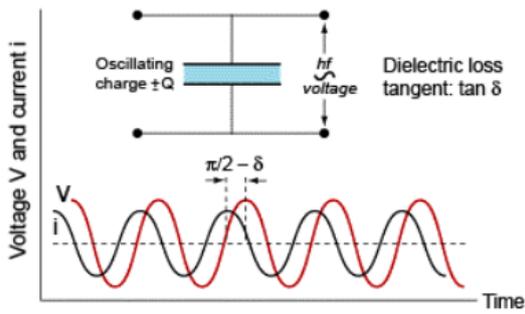
Esta propiedad hace referencia a los materiales dieléctricos, que son directamente, buenos aislantes eléctricos. Se dice que son dieléctricos cuando los no conductores están por debajo de la conocida tensión de ruptura. El efecto de esta constante se presenta en la capacidad completa de un condensador (eléctrico). Se manifiesta cuando entre las dos placas del condensador se introduce un material dieléctrico en lugar del aire y observamos como aumenta la capacidad del condensador. Además, se sabe también que el grado de polarización eléctrica del material queda definido por la constante dieléctrica.



Gráfica 28. Constante dieléctrica según el tipo de material

### 3.17 Factor de disipación

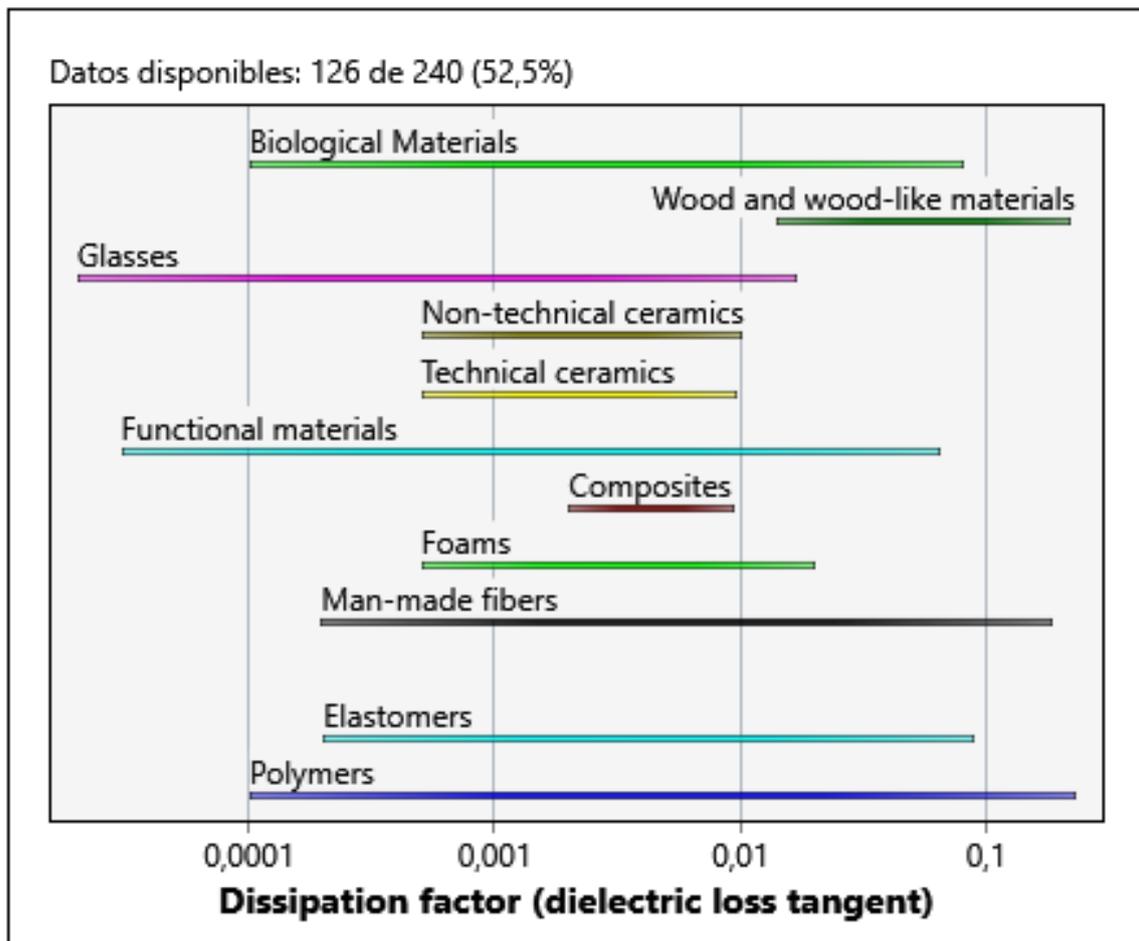
La tangente de pérdida y el factor de disipación requieren de una clara explicación. Un campo oscilante impulsa la carga hacia adelante y hacia atrás entre dos configuraciones alternativas.



Gráfica 29. Evolución de la tensión e intensidad en función del tiempo

Este movimiento de carga es como una corriente eléctrica que, si no hubiera pérdidas, estaría 90° fuera de fase con el voltaje. En dieléctricos reales, esta corriente disipa energía, tal como lo hace una corriente en una

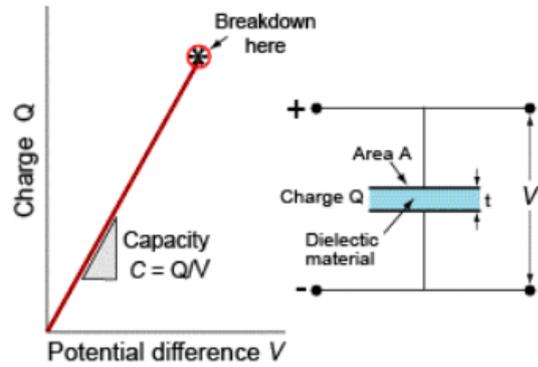
resistencia, dándole un pequeño cambio de fase. La tangente de pérdida, también llamada factor de disipación, es la tangente del ángulo de pérdida. El factor de potencia es el seno del ángulo de pérdida. Cuando el cambio de fase es pequeño, como lo es para los materiales de interés aquí, los tres son esencialmente equivalentes:



Gráfica 30. Factor de disipación según tipo de material

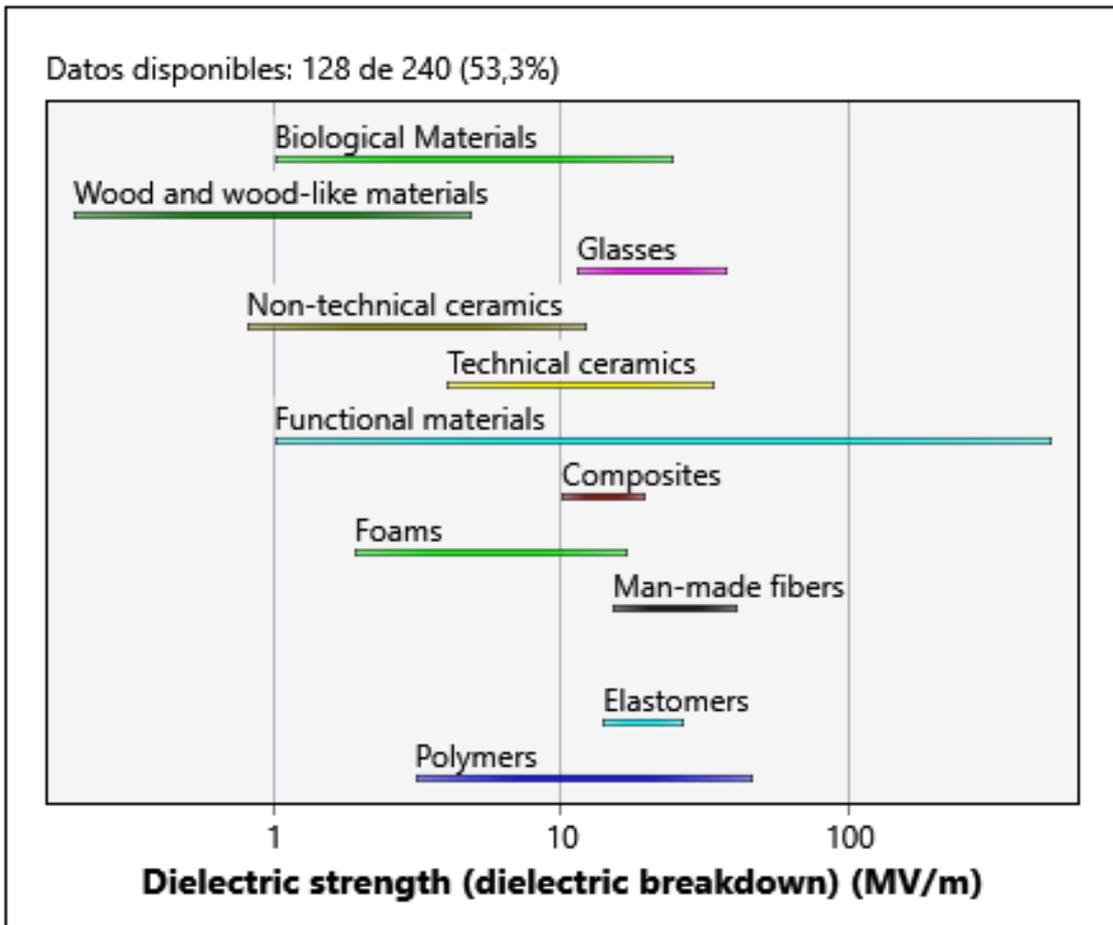
### 3.18 Rigidez eléctrica

La rigidez eléctrica (unidades: MV/m) es el gradiente de potencial eléctrico en el que se rompe un aislante y un flujo dañino de corriente como un rayo fluye a través de él. Se mide aumentando, a una velocidad uniforme, un potencial alterno de 60 Hz aplicado a través de las caras de un disco del material en la configuración tipo condensador de la Figura 1 hasta que se produce la ruptura,



Gráfica 31. Carga en función de la diferencia de potencial

típicamente en un gradiente potencial de entre 1 y 100 MV /metro. El gradiente de potencial de ruptura es una propiedad característica de un dieléctrico.



Gráfica 32. Rigidez eléctrica según tipo de material

### **3.19 Transparencia**

La transparencia es una propiedad óptica de los materiales que se puede calificar en varios grados. Se dice que un material presenta transparencia cuando deja pasar la luz que incide sobre el material con gran facilidad. Podemos hacer una clasificación bastante genérica de los materiales en función de la cantidad de luz que dejen pasar:

- Material translúcido: Es cuando el material deja pasar la luz a través de él, pero no consigues distinguir la imagen de un objeto con nitidez a través de él.
- Material opaco: Es un material que no permite que la luz pase a través de él.

Para aplicar este concepto técnicamente es necesario el estudio de la transparencia para los rayos X, rayos gamma, luz ultravioleta y radiación infrarroja.

### **3.20 Material de riesgo crítico**

Este indicador da una advertencia para algunos materiales importantes que contienen más del 5% en peso de elementos que se encuentran en la lista Crítica de la Unión Europea o en la lista Crítica de los EE. UU.

Estas listas se basan en una evaluación del riesgo de suministro de un elemento en el futuro. Este riesgo depende de los recursos naturales disponibles en el país en el que está fabricando y variará a medida que se encuentren nuevas reservas o cambien las circunstancias políticas o regulatorias.

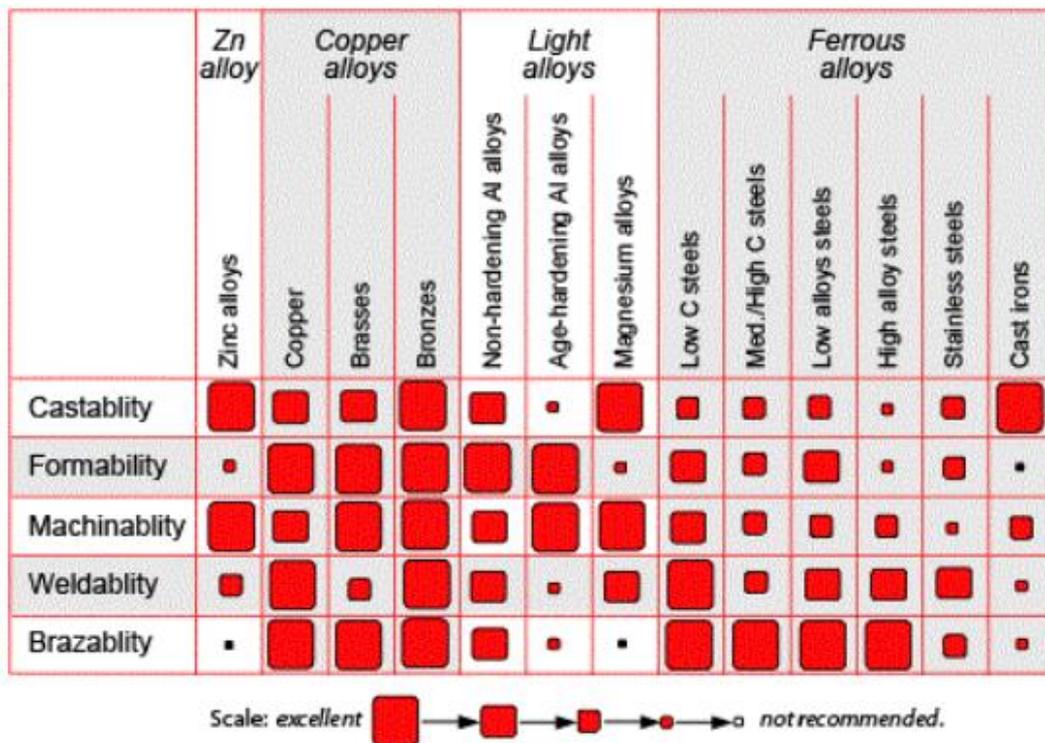
Para prototipos y bajos volúmenes de producción, esta advertencia puede no ser relevante. Pero para grandes volúmenes de producción, esta información es muy valiosa para tomar decisiones estratégicas en la selección de materiales.

### **3.21 Procesabilidad**

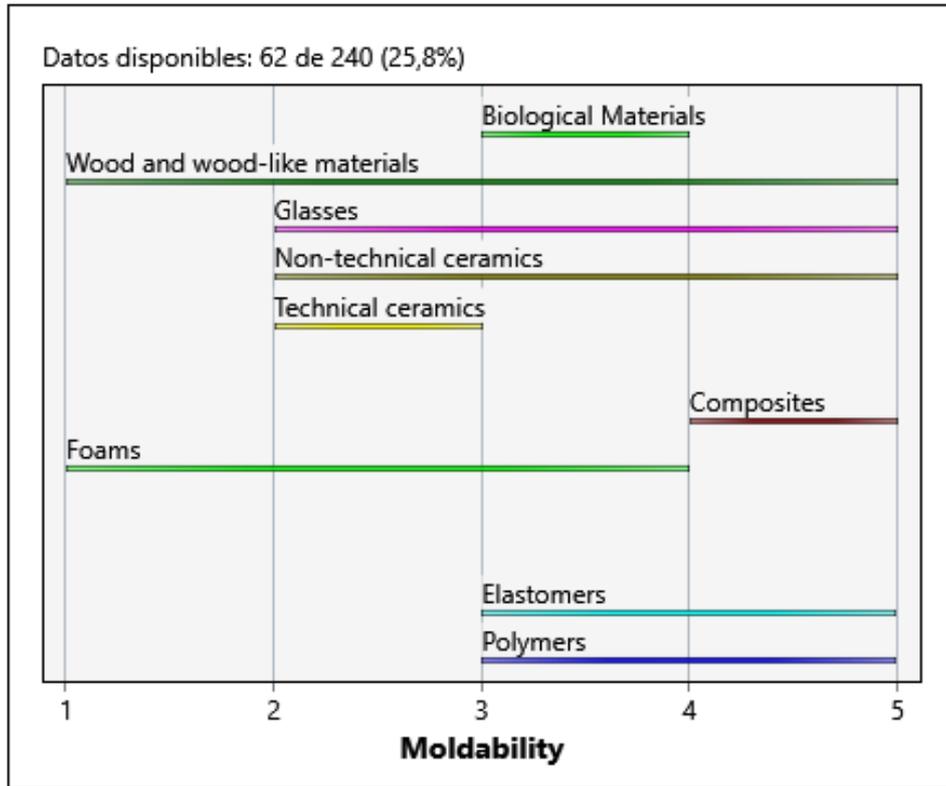
La procesabilidad describe la facilidad con la que un material se puede moldear, unir o terminar. Se caracteriza en la gráfica los seis encabezados a continuación, utilizando una escala de 1 (proceso no recomendado) a 5

(excelente procesabilidad). Las clasificaciones son empíricas, basadas en la experiencia más que en la ciencia.

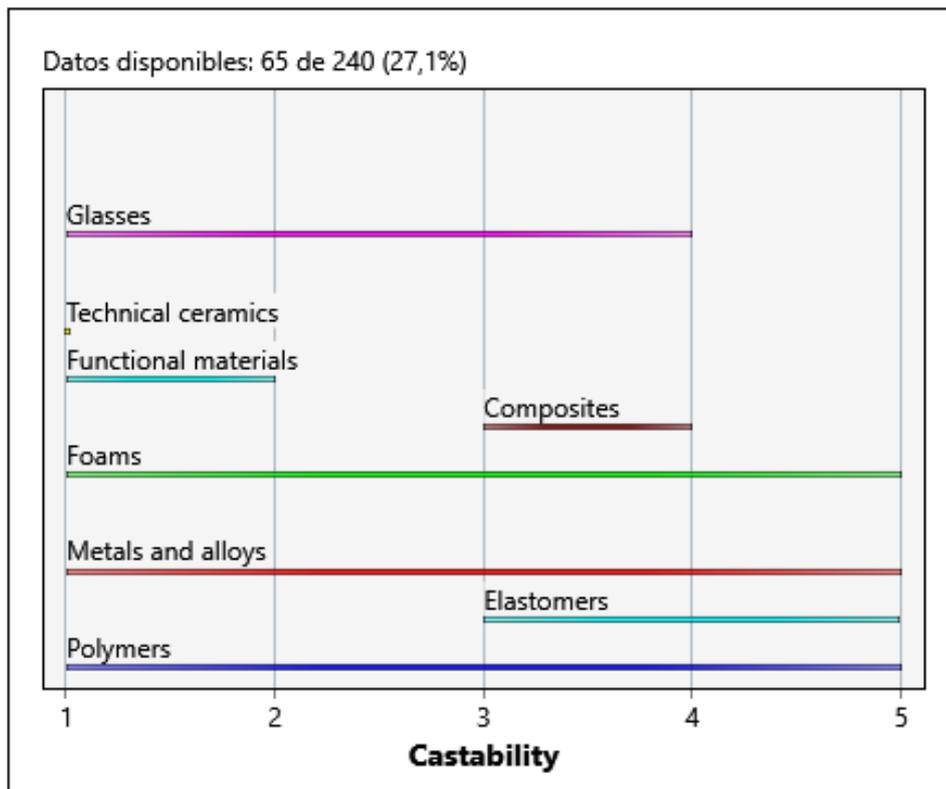
- La colabilidad se ocupa de una combinación compleja de propiedades de metal líquido y características de solidificación, como la fluidez, la contracción y la resistencia al desgarro en caliente que se necesitan para una fundición sólida y precisa.
- La moldeabilidad es la facilidad o dificultad con la que los polímeros pueden moldearse mediante procesos tales como moldeo por inyección, extrusión, moldeo por soplado, termoformado o moldeo por compresión.
- La soldabilidad describe la facilidad o dificultad con la que se puede realizar una soldadura y la calidad y solidez de la unión resultante.
- La maquinabilidad es la relativa facilidad o dificultad con la que se puede mecanizar un material. Un material tiene buena maquinabilidad si el desgaste de la herramienta y las fuerzas de corte son bajas, la velocidad de corte es alta y el acabado de la superficie es bueno
- La formabilidad describe la capacidad de la chapa metálica para deformarse para dar forma. Está limitado por lagrimeo, pandeo, arrugas o adelgazamiento excesivo. Buena formabilidad significa buena resistencia a estos modos de falla.



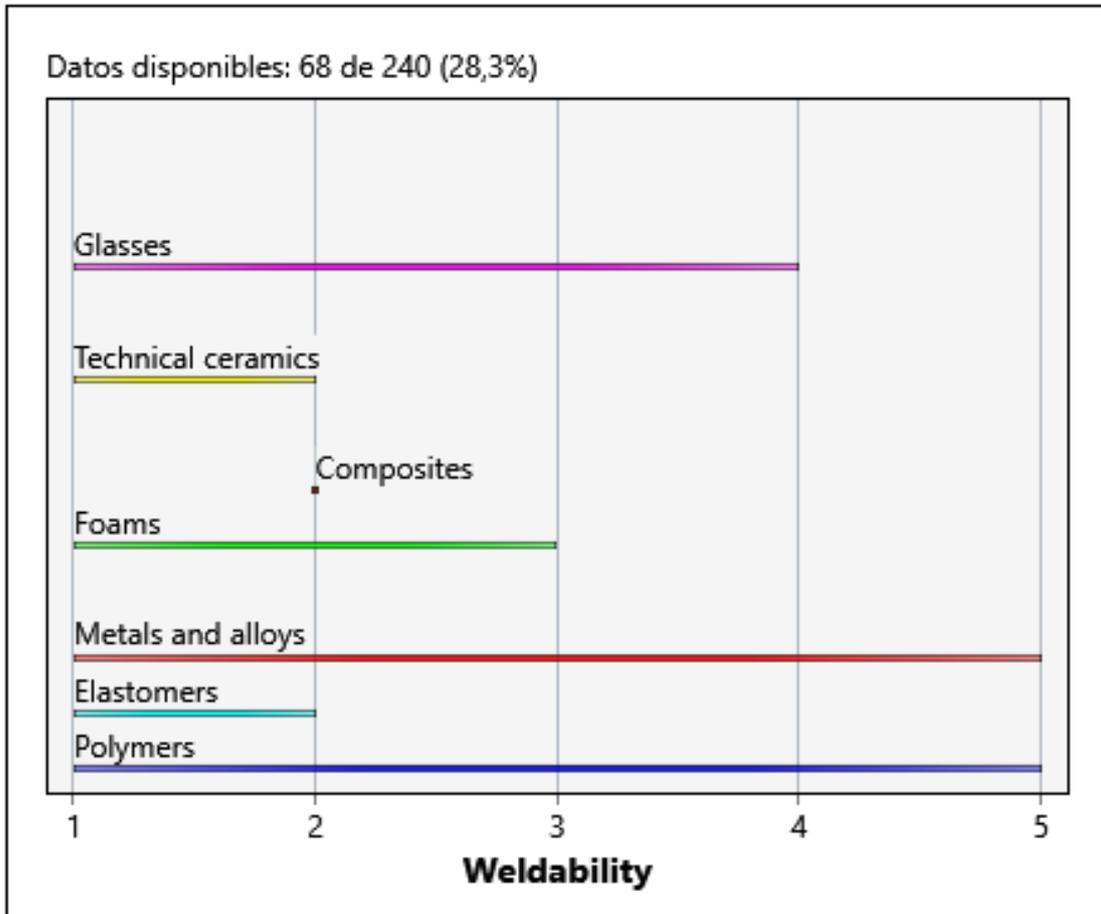
Gráfica 33. Procesabilidad en función de los tipos de metales



Gráfica 34. Moldeabilidad según tipo de material



Gráfica 35. Colabilidad según tipo de material



Gráfica 36. Soldabilidad según tipo de material

### 3.22 Energía gris

La energía gris de un material es la energía, excluyendo la de los biocombustibles, que se utiliza para fabricar 1 kg de material a partir de sus minerales y materia prima.

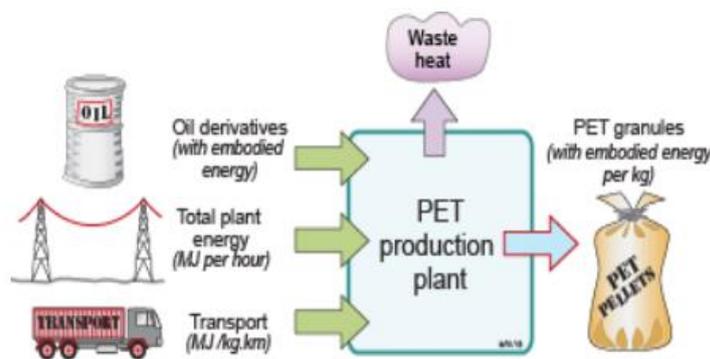
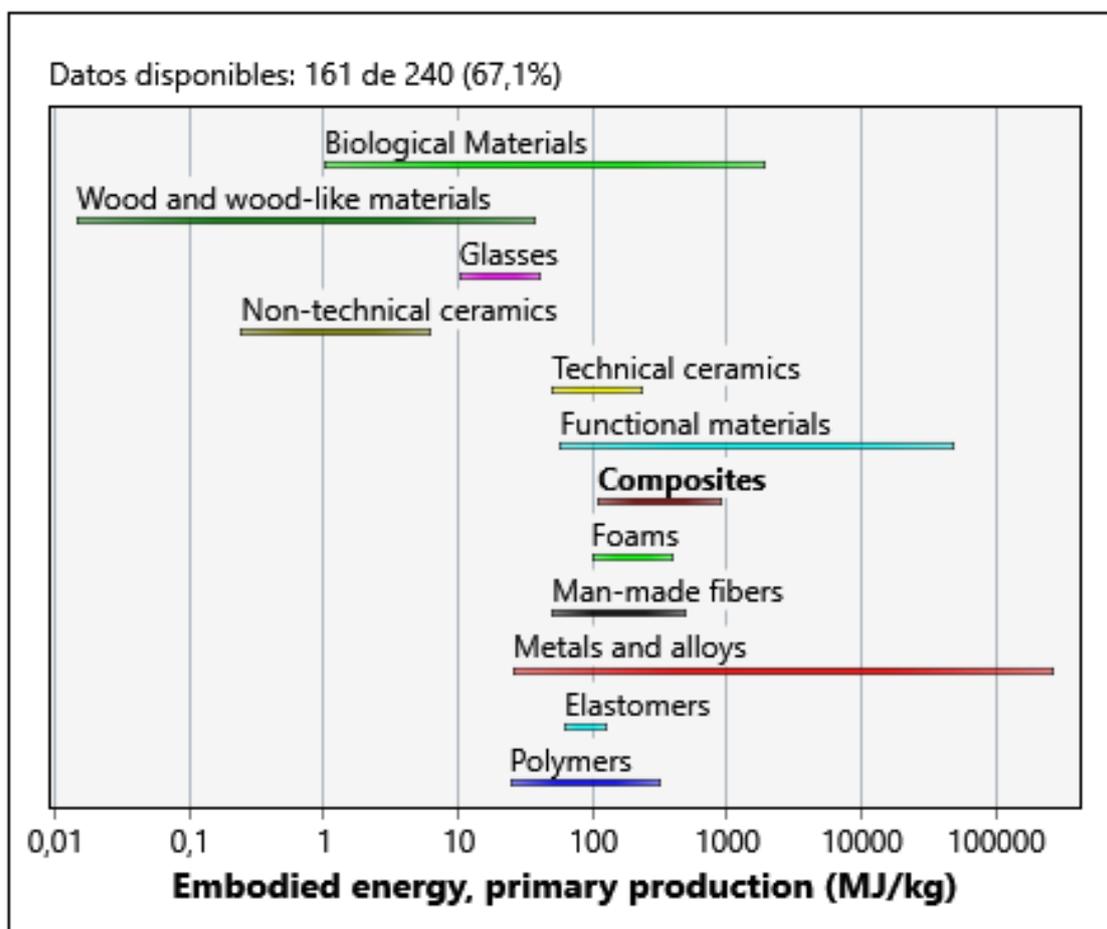


Ilustración 15. Flujos de energía en la producción de gránulos de PET

La imagen que se adjunta a continuación muestra los flujos de energía, utilizando la producción de gránulos del polímero PET como ejemplo. Aquí la materia prima primaria es el petróleo o el carbón, que contiene energía

incorporada (su valor calorífico). Las materias primas se transportan a la planta

de producción, consumiendo energía. El fraccionamiento, la polimerización de síntesis, la extrusión y el corte del PET requieren más energía, al igual que el calentamiento, la iluminación y el soporte y mantenimiento general de la planta. El aporte de energía a la planta es la suma de todos estos. Su unidad es MJ / kg. Se consume más energía cuando los gránulos de PET se procesan para hacer un producto, pero parte es potencialmente recuperable al final de la vida mediante una combustión controlada.



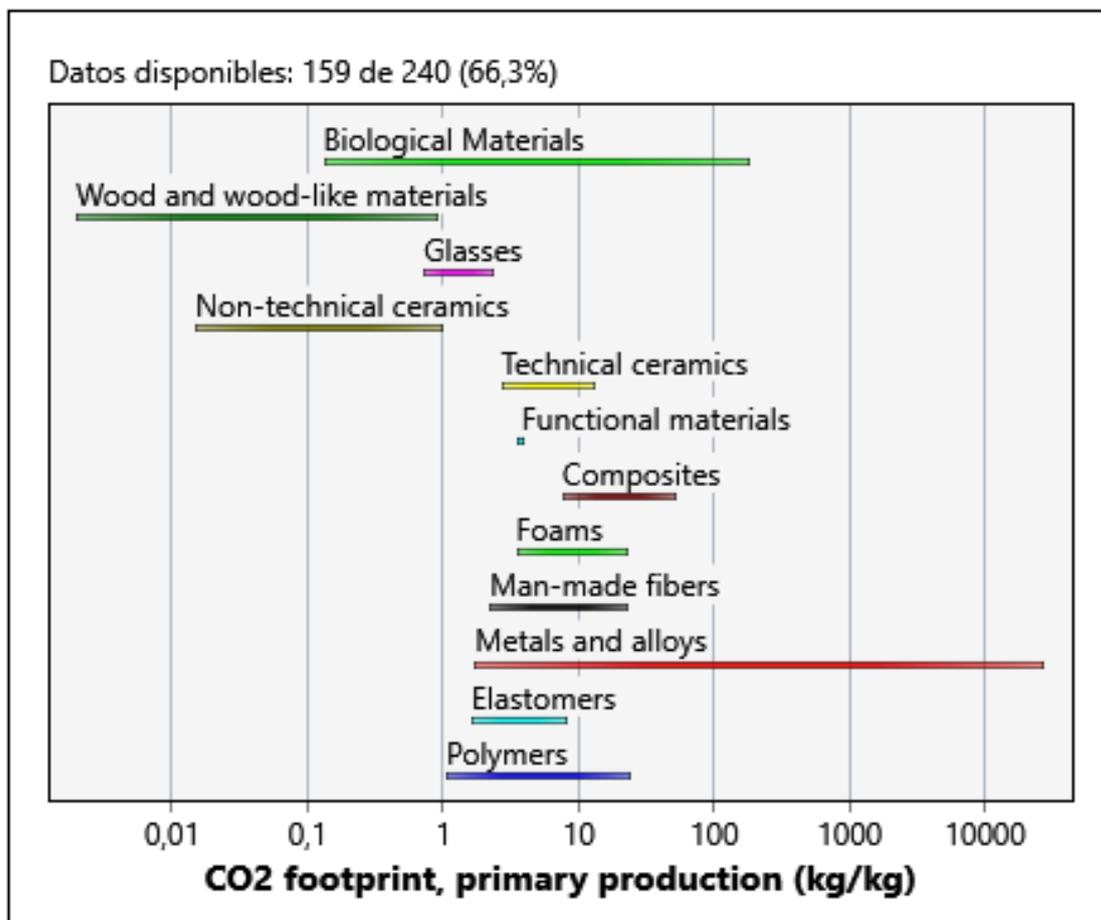
Gráfica 37. Energía gris según tipo de material

### 3.23 Huella de carbono

Ciertos gases atrapan el calor en la atmósfera de la tierra, causando el calentamiento global (el efecto "invernadero"). El CO<sub>2</sub> es el gas de efecto invernadero dominante hecho por el hombre, que se libera cada vez que se queman combustibles fósiles para calor, transporte o energía. Pero hay otros gases de efecto invernadero, emitidos en cantidades variables por esas mismas actividades; CH<sub>4</sub> (metano) y N<sub>2</sub>O (óxido nitroso) se encuentran entre ellos. Para

permitir esto, las emisiones de gases de efecto invernadero derivadas de la producción de materiales se informan en términos de dióxido de carbono equivalente (CO<sub>2</sub>e), lo que significa el peso de CO<sub>2</sub> que tiene el mismo potencial de calentamiento global que el cóctel de gases emitidos en su producción.

Su unidad es kg/kg. En el transporte y en la mayoría (pero no en todos) los procesos industriales, existe una correlación entre el consumo de energía y la emisión de CO<sub>2</sub>.



Gráfica 38. Huella de carbono según tipo de material

### 3.24 Reciclabilidad

Los materiales tienen un ciclo de vida. Se extraen y refinan, se fabrican en productos, se usan y, al final de la primera vida, se rechazan como "residuos". Pero lo que es un desperdicio para algunos mercados es un recurso para otros, creando una serie de canales alternativos por los cuales los materiales continúan fluyendo. La figura 1 presenta las opciones: la combustión para recuperación de calor, reciclar (o reducir el ciclo), rediseñar (restaurar o reacondicionar) y reutilizar.

No son fáciles de cuantificar: los dos últimos (reingeniería, reutilización) en particular, dependen de la naturaleza del costo relativo de los bienes y la mano de obra y del nivel de vida. Uno, el reciclaje, se puede analizar, al menos aproximadamente. La base de datos contiene datos para la huella energética y de carbono del reciclaje y para la fracción de material reciclado que ingresa al suministro actual.

### **3.25 Inflamabilidad**

Las altas temperaturas o llamas en presencia de oxígeno crea el riesgo de quemarse. Muchos materiales son inflamables: expuestos a una llama, se queman, aunque algunos se autoextinguen cuando se elimina la llama. La propensión a la combustión, la inflamabilidad, se mide en una escala de 4 puntos: altamente inflamable, de combustión lenta, autoextinguible y no inflamable.

El problema reside en que la mayoría de los polímeros son inflamables en condiciones ambientales si se exponen a llamas. Muchos, al arder, emiten humo tóxico. Incluso aquellos que se extinguen a sí mismos están dañados por el calor y las llamas.



## 4. SELECCIÓN DE LOS MATERIALES [C]

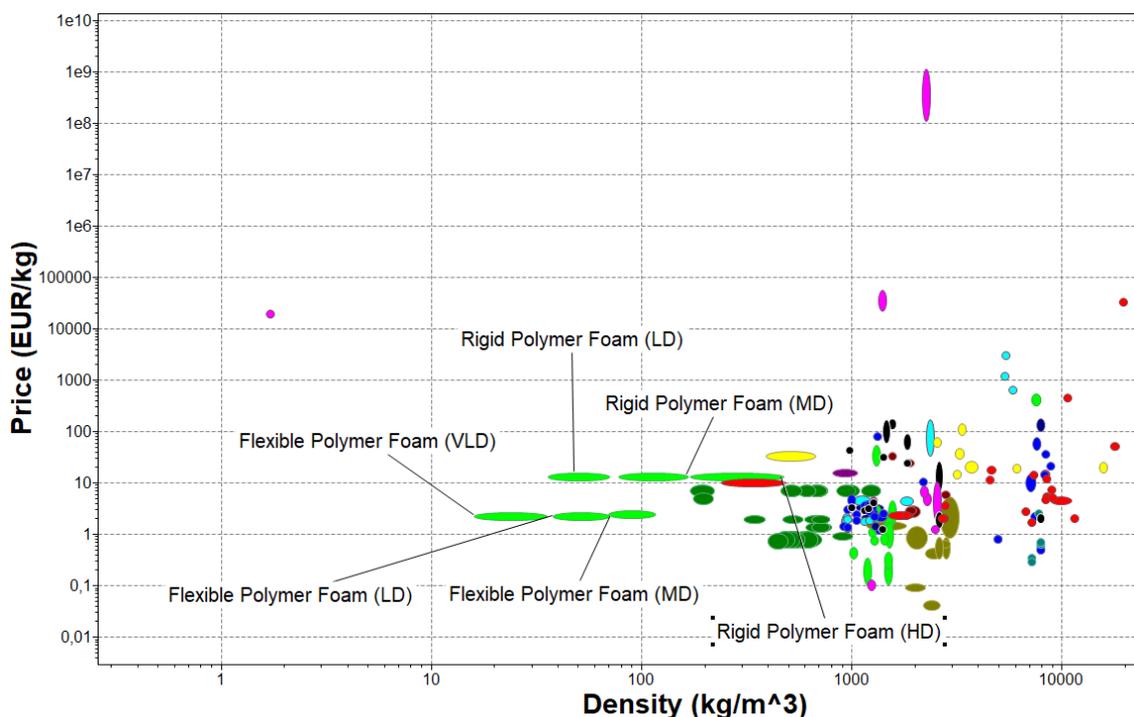
A continuación, se va a proceder a la selección de los materiales que serían óptimos para cada tipo de dron. Según el uso que se le vaya a dar al dron será más conveniente utilizar un material u otro por motivos principalmente económicos. No es lo mismo fabricar un dron para uso militar que para uso recreativo, ya que el primero debe tener unos criterios de calidad que no son necesarios en el segundo caso y que afectarían gravemente a su precio final. Para la realización de este análisis de selección de materiales, utilizaremos el software informático CES Edupack 2019, que nos proporcionará datos e información teórica sobre los materiales y sus propiedades. Plantearemos varios tipos de drones, comentando las características que tienen que cumplir:

### 4.1 Drones civiles ultra económicos

En este apartado nos centraremos en un tipo de dron muy específico. Sus propiedades más representativas serían la relativa baja calidad de sus componentes. Estos drones pueden ser utilizados por personal con poca experiencia como pueden ser aficionados a los vehículos por control remoto o incluso niños.

Al darle un uso no vital y debido a que el deseo a la hora de diseñar estos vehículos es que el coste de fabricación sea bastante reducido nos valdrá con que se cumpla una simple gráfica en la que se muestren las propiedades más importantes: densidad y precio.

Una vez conocida teoría sobre las propiedades que debemos tener en cuenta, vamos a representar una gráfica, donde se nos presentarán los materiales en función de estos dos parámetros. En el eje X tendremos la densidad, mientras que en el eje Y tendremos el precio. Como queremos un material ligero y barato tenemos que seleccionar entre los materiales que tenemos en la zona inferior izquierda de la gráfica.



Gráfica 39. Relación precio densidad de los materiales a estudiar (I)

En la gráfica podemos observar que los materiales que más se amoldan a las propiedades que deseamos para nuestro material son las llamadas “espumas poliméricas”. Cualquiera de ellas nos valdría para la construcción del chásis de nuestro dron. A continuación, vamos a comentar algunos datos sobre estas.

Las espumas de polímeros se fabrican mediante la expansión controlada y la modificación de un líquido o fundición a través de un agente de expansión. Son posibles agentes de expansión físicos, químicos o mecánicos. El material celular resultante tiene una densidad y suavidad de menor densidad que el material original en una cantidad que depende de una densidad relativa: la fracción de volumen de sólido en la espuma. La espuma flexible puede ser suave y flexible, perfectos para cojines, colchones y ropa acolchada. Al ser de uso recreativo, no nos preocupa su resistencia a impactos, ya que no va a ser destinado a misiones de gran importancia. El bajo coste de este produce nos permite que se puedan sustituir fácilmente las piezas rotas sin que haya ninguna preocupación económica.

En las siguientes tablas podemos ver los valores que toman algunos parámetros en los materiales mencionados.

ESPUMA POLIMÉRICA FLEXIBLE (VLD)			
PROPIEDAD	INTERVALO DE VALORES		UNIDADES
Densidad	16	35	Kg/m <sup>3</sup>
Precio	2,23	2,47	€/kg
Fecha primer uso	1947		
Módulo de Young	2,5·10 <sup>-4</sup>	0,001	GPa
Módulo de elasticidad transversal	1·10 <sup>-4</sup>	5·10 <sup>-4</sup>	GPa
Módulo de compresibilidad	2,5·10 <sup>-4</sup>	0,001	GPa
Coefficiente de Poisson	0,23	0,3	-
Límite elástico	0,01	0,12	MPa
Tensión de rotura	0,24	0,85	MPa
Esfuerzo de compresión	0,01	0,12	MPa
Deformación	10	35	% strain
Dureza Vickers	0,001	0,012	HV
Resistencia a la fatiga a 10 <sup>7</sup> ciclos	0,15	0,7	MPa
Resistencia a la fractura	0,005	0,02	MPa·m <sup>0,5</sup>
Coefficiente de pérdida mecánica (tan delta)	0,1	0,5	-
Punto de fusión	112	177	°C
Temperatura de transición vítrea	-113	-13,2	°C
Temperatura de operación máxima	86,9	112	°C
Temperatura de operación mínima	-73,2	-23,2	°C
Conductor o aislante térmico	Buen aislante térmico		
Conductividad térmica	0,036	0,048	W/m°C
Capacidad de calor específico	1,75·10 <sup>3</sup>	2,26·10 <sup>3</sup>	J/kg°C
Coefficiente de expansión térmica	120	220	μstrain/°C

Conductor o aislante eléctrico	Buen aislante eléctrico		
Resistividad eléctrica	10 <sup>20</sup>	10 <sup>23</sup>	μohm·cm
Constante dieléctrica	1,1	1,15	-
Factor de disipación	5·10 <sup>-4</sup>	0,003	-
Rigidez dieléctrica	4	6	MV/m
Transparencia	Opaco		
¿Material de riesgo crítico?	No		
Colabilidad	3	5	-
Moldeabilidad	1	4	-
Soldabilidad	1	-	-
Energía gris	103	114	MJ/kg
Huella de carbono	4,28	4,73	kg/kg
Reciclable	No		
Inflamabilidad	Altamente inflamable		

Tabla 1. Propiedades de la espuma polimérica flexible (VLD)

ESPUMA POLIMÉRICA FLEXIBLE (LD)			
PROPIEDAD	INTERVALO DE VALORES		UNIDADES
Densidad	38	70	Kg/m <sup>3</sup>
Precio	2,23	2,47	€/kg
Fecha primer uso	1947		
Módulo de Young	0,001	0,003	GPa
Módulo de elasticidad transversal	4·10 <sup>-4</sup>	0,002	GPa
Módulo de compresibilidad	0,001	0,003	GPa
Coefficiente de Poisson	0,23	0,33	-
Límite elástico	0,02	0,3	MPa
Tensión de rotura	0,24	2,35	MPa
Esfuerzo de compresión	0,02	0,3	MPa
Deformación	10	175	% strain
Dureza Vickers	0,002	0,03	HV

Resistencia a la fatiga a 10 <sup>7</sup> ciclos	0,2	2	MPa
Resistencia a la fractura	0,015	0,05	MPa·m <sup>0,5</sup>
Coefficiente de pérdida mecánica (tan delta)	0,1	0,5	-
Punto de fusión	112	177	°C
Temperatura de transición vítrea	-113	-13,2	°C
Temperatura de operación máxima	82,9	112	°C
Temperatura de operación mínima	-73,2	-23,2	°C
Conductor o aislante térmico	Buen aislante térmico		
Conductividad térmica	0,04	0,059	W/m°C
Capacidad de calor específico	1,75·10 <sup>3</sup>	2,26·10 <sup>3</sup>	J/kg°C
Coefficiente de expansión térmica	115	220	μstrain/°C
Conductor o aislante eléctrico	Buen aislante eléctrico		
Resistividad eléctrica	10 <sup>20</sup>	10 <sup>23</sup>	μohm·cm
Constante dieléctrica	1,15	1,2	-
Factor de disipación	5·10 <sup>-4</sup>	0,003	-
Rigidez dieléctrica	4	7	MV/m
Transparencia	Opaco		
¿Material de riesgo crítico?	No		
Colabilidad	3	5	-
Moldeabilidad	1	4	-
Soldabilidad	1	-	-
Energía gris	103	114	MJ/kg
Huella de carbono	4,28	4,73	kg/kg
Reciclable	No		
Inflamabilidad	Altamente inflamable		

Tabla 2. Propiedades de la espuma polimérica flexible (LD)

ESPUMA POLIMÉRICA FLEXIBLE (MD)			
PROPIEDAD	INTERVALO DE VALORES		UNIDADES
Densidad	70	115	Kg/m <sup>3</sup>
Precio	2,35	2,61	€/kg
Fecha primer uso	1947		
Módulo de Young	0,004	0,012	GPa
Módulo de elasticidad transversal	0,002	0,005	GPa
Módulo de compresibilidad	0,004	0,012	GPa
Coefficiente de Poisson	0,26	0,33	-
Límite elástico	0,048	0,7	MPa
Tensión de rotura	0,43	2,95	MPa
Esfuerzo de compresión	0,048	0,7	MPa
Deformación	9	115	% strain
Dureza Vickers	0,0048	0,07	HV
Resistencia a la fatiga a 10 <sup>7</sup> ciclos	0,34	2,5	MPa
Resistencia a la fractura	0,03	0,09	MPa·m <sup>0,5</sup>
Coefficiente de pérdida mecánica (tan delta)	0,1	0,5	-
Punto de fusión	112	177	°C
Temperatura de transición vítrea	-113	-13,2	°C
Temperatura de operación máxima	82,9	112	°C
Temperatura de operación mínima	-73,2	-23,2	°C
Conductor o aislante térmico	Buen aislante térmico		
Conductividad térmica	0,041	0,078	W/m°C
Capacidad de calor específico	1,75·10 <sup>3</sup>	2,26·10 <sup>3</sup>	J/kg°C
Coefficiente de expansión térmica	115	230	μstrain/°C
Conductor o aislante eléctrico	Buen aislante eléctrico		

Resistividad eléctrica	10 <sup>20</sup>	10 <sup>23</sup>	μohm·cm
Constante dieléctrica	1,2	1,3	
Factor de disipación	5·10 <sup>-4</sup>	0,003	-
Rigidez dieléctrica	4	6	MV/m
Transparencia	Opaco		
¿Material de riesgo crítico?	No		
Colabilidad	3	5	-
Moldeabilidad	1	4	-
Soldabilidad	1	-	-
Energía gris	100	111	MJ/kg
Huella de carbono	3,43	3,79	kg/kg
Reciclable	No		
Inflamabilidad	Altamente inflamable		

Tabla 3. Propiedades de la espuma polimérica flexible (MD)

ESPUMA POLIMÉRICA RÍGIDA (LD)			
PROPIEDAD	INTERVALO DE VALORES		UNIDADES
Densidad	36	70	Kg/m <sup>3</sup>
Precio	13,1	14,4	€/kg
Fecha primer uso	1931		
Módulo de Young	0,023	0,08	GPa
Módulo de elasticidad transversal	0,008	0,035	GPa
Módulo de compresibilidad	0,023	0,08	GPa
Coefficiente de Poisson	0,25	0,33	-
Límite elástico	0,3	1,7	MPa
Tensión de rotura	0,45	2,25	MPa
Esfuerzo de compresión	0,37	1,7	MPa
Deformación	2	5	% strain
Dureza Vickers	0,037	0,17	HV
Resistencia a la fatiga a 10 <sup>7</sup> ciclos	0,296	1,36	MPa
Resistencia a la fractura	0,0021	0,02	MPa·m <sup>0,5</sup>

Coeficiente de pérdida mecánica (tan delta)	0,005	0,3	-
Punto de fusión	-	-	°C
Temperatura de transición vítrea	66,9	171	°C
Temperatura de operación máxima	66,9	147	°C
Temperatura de operación mínima	-113	-73,2	°C
Conductor o aislante térmico	Buen aislante térmico		
Conductividad térmica	0,023	0,04	W/m°C
Capacidad de calor específico	$1,12 \cdot 10^3$	$1,91 \cdot 10^3$	J/kg°C
Coeficiente de expansión térmica	20	80	$\mu\text{strain}/^\circ\text{C}$
Conductor o aislante eléctrico	Buen aislante eléctrico		
Resistividad eléctrica	$10^{17}$	$10^{21}$	$\mu\text{ohm}\cdot\text{cm}$
Constante dieléctrica	1,04	1,1	-
Factor de disipación	$8 \cdot 10^{-4}$	0,008	-
Rigidez dieléctrica	1,9	6,04	MV/m
Transparencia	Opaco		
¿Material de riesgo crítico?	No		
Colabilidad	1	3	-
Moldeabilidad	3	4	-
Soldabilidad	1	2	-
Energía gris	96,6	107	MJ/kg
Huella de carbono	3,68	4,07	kg/kg
Reciclable	No		
Inflamabilidad	Auto extinguable		

Tabla 4. Propiedades de la espuma polimérica rígida (LD)

ESPUMA POLIMÉRICA RÍGIDA (MD)			
PROPIEDAD	INTERVALO DE VALORES		UNIDADES
Densidad	78	165	Kg/m <sup>3</sup>
Precio	13,1	14,4	€/kg
Fecha primer uso	1931		
Módulo de Young	0,08	0,2	GPa
Módulo de elasticidad transversal	0,0236	0,069	GPa
Módulo de compresibilidad	0,08	0,2	GPa
Coefficiente de Poisson	0,27	0,33	-
Límite elástico	0,4	3,5	MPa
Tensión de rotura	0,65	5,1	MPa
Esfuerzo de compresión	0,95	3,5	MPa
Deformación	2	5	% strain
Dureza Vickers	0,095	0,35	HV
Resistencia a la fatiga a 10 <sup>7</sup> ciclos	0,455	2,8	MPa
Resistencia a la fractura	0,0066	0,0486	MPa·m <sup>0,5</sup>
Coefficiente de pérdida mecánica (tan delta)	0,005	0,15	-
Punto de fusión	-	-	°C
Temperatura de transición vítrea	66,9	157	°C
Temperatura de operación máxima	66,9	157	°C
Temperatura de operación mínima	-113	-93,2	°C
Conductor o aislante térmico	Buen aislante térmico		
Conductividad térmica	0,027	0,038	W/m°C
Capacidad de calor específico	1,12·10 <sup>3</sup>	1,91·10 <sup>3</sup>	J/kg°C
Coefficiente de expansión térmica	20	70	μstrain/°C
Conductor o aislante eléctrico	Buen aislante eléctrico		

Resistividad eléctrica	$10^{17}$	$10^{21}$	$\mu\text{ohm}\cdot\text{cm}$
Constante dieléctrica	1,1	1,19	-
Factor de disipación	$8\cdot 10^{-4}$	0,008	-
Rigidez dieléctrica	5,61	6,76	MV/m
Transparencia	Opaco		
¿Material de riesgo crítico?	No		
Colabilidad	1	3	-
Moldeabilidad	3	4	-
Soldabilidad	1	2	-
Energía gris	96,6	107	MJ/kg
Huella de carbono	3,68	4,07	kg/kg
Reciclable	No		
Inflamabilidad	Auto extinguable		

Tabla 5. Propiedades de la espuma polimérica rígida (MD)

ESPUMA POLIMÉRICA RÍGIDA (HD)			
PROPIEDAD	INTERVALO DE VALORES		UNIDADES
Densidad	170	470	$\text{Kg}/\text{m}^3$
Precio	13,1	14,4	€/kg
Fecha primer uso	1931		
Módulo de Young	0,2	0,48	GPa
Módulo de elasticidad transversal	0,055	0,195	GPa
Módulo de compresibilidad	0,2	0,48	GPa
Coefficiente de Poisson	0,27	0,33	-
Límite elástico	0,8	12	MPa
Tensión de rotura	1,2	12,4	MPa
Esfuerzo de compresión	2,8	12	MPa
Deformación	2	10	% strain
Dureza Vickers	0,28	1,2	HV
Resistencia a la fatiga a $10^7$ ciclos	0,84	9,6	MPa
Resistencia a la fractura	0,0236	0,0905	$\text{MPa}\cdot\text{m}^{0,5}$

Coefficiente de pérdida mecánica (tan delta)	0,005	0,15	-
Punto de fusión	-	-	°C
Temperatura de transición vítrea	66,9	171	°C
Temperatura de operación máxima	66,9	167	°C
Temperatura de operación mínima	-113	-73,2	°C
Conductor o aislante térmico	Buen aislante térmico		
Conductividad térmica	0,034	0,063	W/m°C
Capacidad de calor específico	1·10 <sup>3</sup>	1,91·10 <sup>3</sup>	J/kg°C
Coefficiente de expansión térmica	22	70	μstrain/°C
Conductor o aislante eléctrico	Buen aislante eléctrico		
Resistividad eléctrica	10 <sup>16</sup>	10 <sup>20</sup>	μohm·cm
Constante dieléctrica	1,21	1,45	-
Factor de disipación	8·10 <sup>-4</sup>	0,008	-
Rigidez dieléctrica	6,02	11	MV/m
Transparencia	Opaco		
¿Material de riesgo crítico?	No		
Colabilidad	1	3	-
Moldeabilidad	3	4	-
Soldabilidad	1	2	-
Energía gris	96,6	107	MJ/kg
Huella de carbono	3,68	4,07	kg/kg
Reciclable	No		
Inflamabilidad	Auto extingible		

Tabla 6. Propiedades de la espuma polimérica rígida (HD)

Una vez que han sido mostradas todas las propiedades de los elementos, veo oportuno añadir una serie de imágenes donde se ven como lucen físicamente estos materiales en la fabricación de productos.



*Ilustración 16. Espuma polimérica flexible (VLD)*



*Ilustración 17. Espuma polimérica flexible (LD)*



*Ilustración 18. Espuma polimérica flexible (MD)*



Ilustración 19. Espuma polimérica rígida (LD)



Ilustración 20. Espuma polimérica rígida (MD)

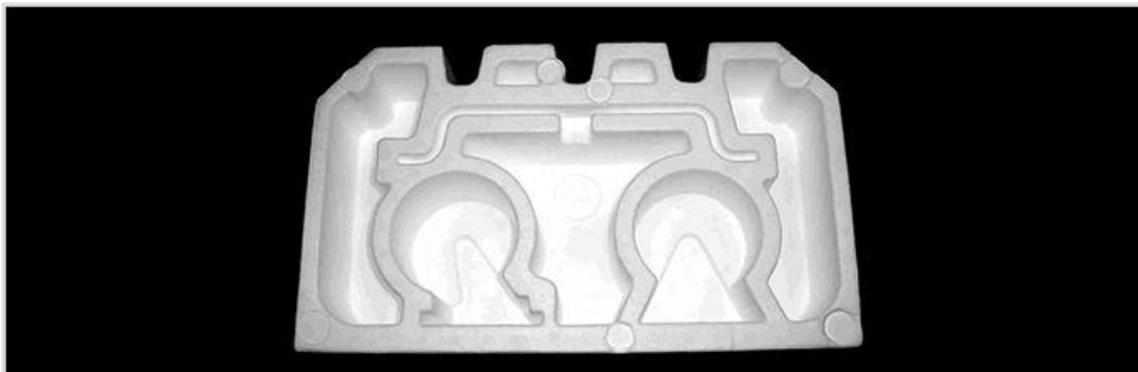
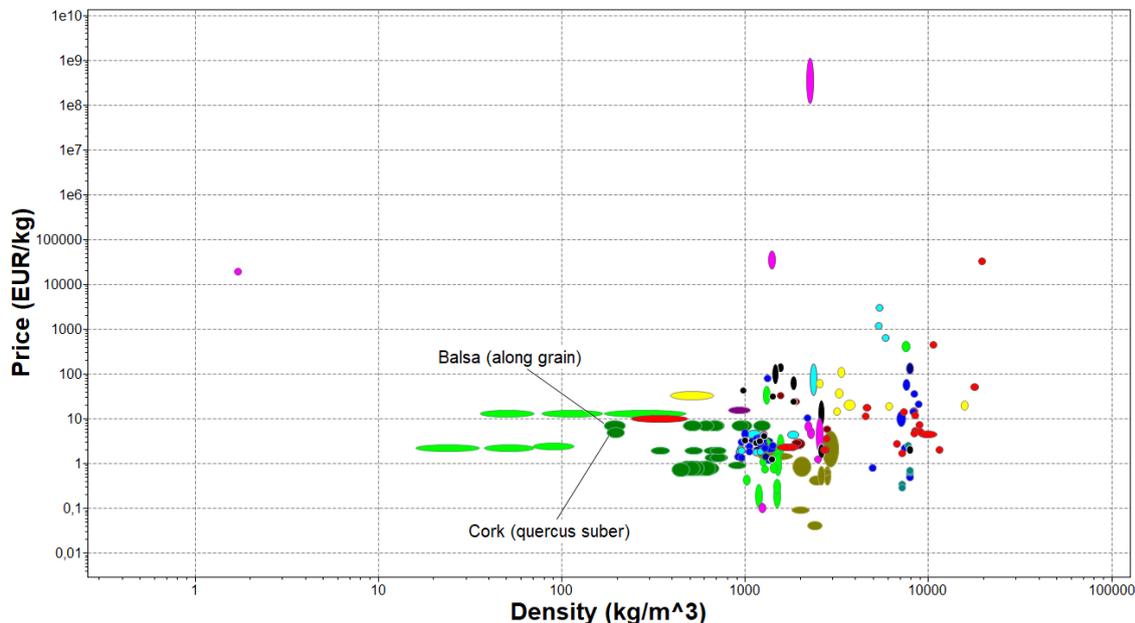


Ilustración 21. Espuma polimérica rígida (HD)

Como hemos visto, en este apartado le hemos dado preferencia a la ligereza y el precio del material a la hora de seleccionarlo. Por este motivo, una empresa que quiera obtener la mayor rentabilidad económica utilizará la espuma polimérica flexible (VLD). A continuación, vamos a comentar otras propiedades importantes de estos materiales que puede llevar a la empresa al uso de otro tipo de espumas.

En la gráfica también se pueden observar dos materiales que podrían cumplir perfectamente con las especificaciones de nuestro diseño: la madera de

balsa y el corcho. Podemos ver que ambos materiales tienen unas propiedades bastante similares y que pueden competir sin ningún problema con las espumas poliméricas. De hecho, tienen hasta mejor relación densidad-precio que la espuma polimérica rígida (HD).



Gráfica 40. Relación precio densidad de los materiales a estudiar (II)

La madera de balsa es la madera más ligera que se conoce. El principal problema de esta es su obtención, ya que el balsa solo crece en climas subtropicales muy específicos de países sudamericanos y centroamericanos, por lo que nos podría incluir costes extras de transporte y exportación.

Es excepcionalmente suave y ligera, con un grano abierto grueso. La densidad, típicamente aproximadamente  $140 \text{ kg/m}^3$ , es aproximadamente un tercio de la de otros tipos de madera dura. Se utiliza para la construcción de modelos y flotabilidad, quizás la más famosa es la fabricación de la balsa Kon-Tiki. La madera de balsa se utilizó alguna vez para la construcción de aviones y planeadores. Hoy en día es su principal uso como núcleo para paneles sándwich livianos y para modelar productos durante la fase de diseño.

El corcho es un material que se obtiene de la corteza del alcornoque. Tiene unas propiedades muy semejantes al material comentado anteriormente. Es un poco más pesado que la madera de balsa. El principal componente del corcho es la suberina. El corcho puede obtenerse directamente extraído del alcornoque o puede ser tratado para usarlo de manera más eficiente en diferentes áreas de fabricación.

Ambos materiales son idóneos por su relación densidad-precio si no tenemos en cuenta otras consideraciones. Al ser estas dos propiedades el único criterio que tienen que pasar los materiales para este dron “ultra económico” las tomaremos como buenas alternativas a las espumas poliméricas. A continuación, se muestran el resto de las propiedades importantes de estos materiales:

MADERA DE BALSA			
PROPIEDAD	INTERVALO DE VALORES		UNIDADES
Densidad	170	220	Kg/m <sup>3</sup>
Precio	5,74	9,21	€/kg
Fecha primer uso	Desconocida		
Módulo de Young	4,2	5,2	GPa
Módulo de elasticidad transversal	0,31	0,38	GPa
Módulo de compresibilidad	0,08	0,1	GPa
Coeficiente de Poisson	0,35	0,4	-
Límite elástico	13	16	MPa
Tensión de rotura	22	27	MPa
Esfuerzo de compresión	10	14	MPa
Deformación	1.03	1,26	% strain
Dureza Vickers	0,35	0,43	HV
Resistencia a la fatiga a 10 <sup>7</sup> ciclos	5,4	6,6	MPa
Resistencia a la fractura	0,5	0,6	MPa·m <sup>0,5</sup>
Coeficiente de pérdida mecánica (tan delta)	0,122	0,15	-
Punto de fusión	-	-	°C
Temperatura de transición vítrea	-	-	°C
Temperatura de operación máxima	120	140	°C
Temperatura de operación mínima	-73,2	-23,2	°C
Conductor o aislante térmico	Buen aislante térmico		

Conductividad térmica	0,09	0,12	W/m°C
Capacidad de calor específico	$1,66 \cdot 10^3$	$1,71 \cdot 10^3$	J/kg°C
Coefficiente de expansión térmica	2	11	$\mu\text{strain}/^\circ\text{C}$
Conductor o aislante eléctrico	Mal aislante eléctrico		
Resistividad eléctrica	$6 \cdot 10^{13}$	$2 \cdot 10^{14}$	$\mu\text{ohm} \cdot \text{cm}$
Constante dieléctrica	2,45	3	-
Factor de disipación	0,021	0,026	-
Rigidez dieléctrica	1	2	MV/m
Transparencia	Opaco		
¿Material de riesgo crítico?	No		
Colabilidad	-	-	-
Moldeabilidad	-	-	-
Soldabilidad	-	-	-
Energía gris	11,6	12,8	MJ/kg
Huella de carbono	0,574	0,633	kg/kg
Reciclable	-		
Inflamabilidad	-		

Tabla 7. Propiedades de la madera de balsa

CORCHO			
PROPIEDAD	INTERVALO DE VALORES		UNIDADES
Densidad	177	218	Kg/m <sup>3</sup>
Precio	4,04	6,52	€/kg
Fecha primer uso	3000 a. C.		
Módulo de Young	0,0251	0,0499	GPa
Módulo de elasticidad transversal	0,00401	0,00798	GPa
Módulo de compresibilidad	0,0139	0,0201	GPa
Coefficiente de Poisson	0,08	0,4	-
Límite elástico	1,1	2,19	MPa
Tensión de rotura	1	2,5	MPa

Esfuerzo de compresión	1	1,99	MPa
Deformación	20	70	% strain
Dureza Vickers	-	-	HV
Resistencia a la fatiga a 10 <sup>7</sup> ciclos	0,552	1,1	MPa
Resistencia a la fractura	0,0697	0,1	MPa·m <sup>0,5</sup>
Coefficiente de pérdida mecánica (tan delta)	0,1	0,3	-
Punto de fusión	-	-	°C
Temperatura de transición vítrea	-	-	°C
Temperatura de operación máxima	118	142	°C
Temperatura de operación mínima	-73,2	-22,2	°C
Conductor o aislante térmico	Buen aislante térmico		
Conductividad térmica	0,0398	0,0482	W/m°C
Capacidad de calor específico	1,9·10 <sup>3</sup>	2,1·10 <sup>3</sup>	J/kg°C
Coefficiente de expansión térmica	130	181	μstrain/°C
Conductor o aislante eléctrico	Mal aislante eléctrico		
Resistividad eléctrica	10 <sup>9</sup>	10 <sup>11</sup>	μohm·cm
Constante dieléctrica	6	8	-
Factor de disipación	0,02	0,05	-
Rigidez dieléctrica	1	1,99	MV/m
Transparencia	Opaco		
¿Material de riesgo crítico?	No		
Colabilidad	-	-	-
Moldeabilidad	3	4	-
Soldabilidad	-	-	-
Energía gris	3,8	4,2	MJ/kg
Huella de carbono	0,181	0,2	kg/kg
Reciclable	No		

Inflamabilidad	Auto extinguido
----------------	-----------------

Tabla 8. Propiedades del corcho

A continuación, mostraremos como son físicamente estos dos materiales que acabamos de comentar:



Ilustración 22. Madera de balsa

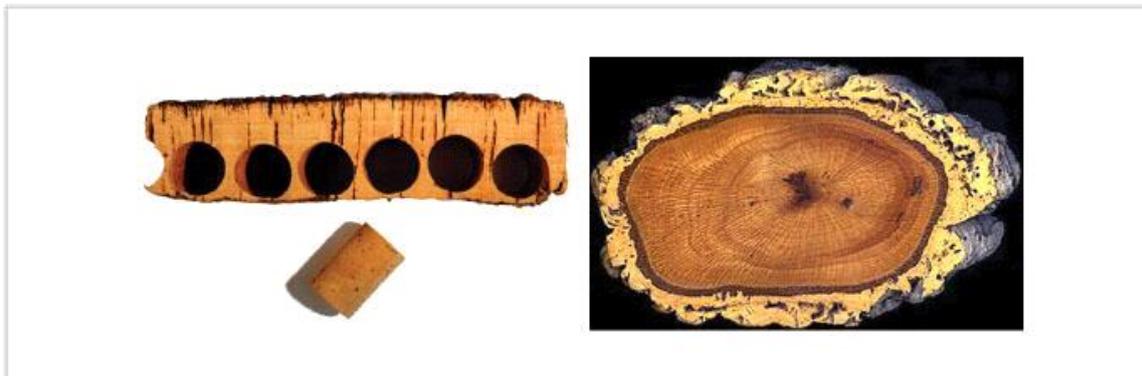
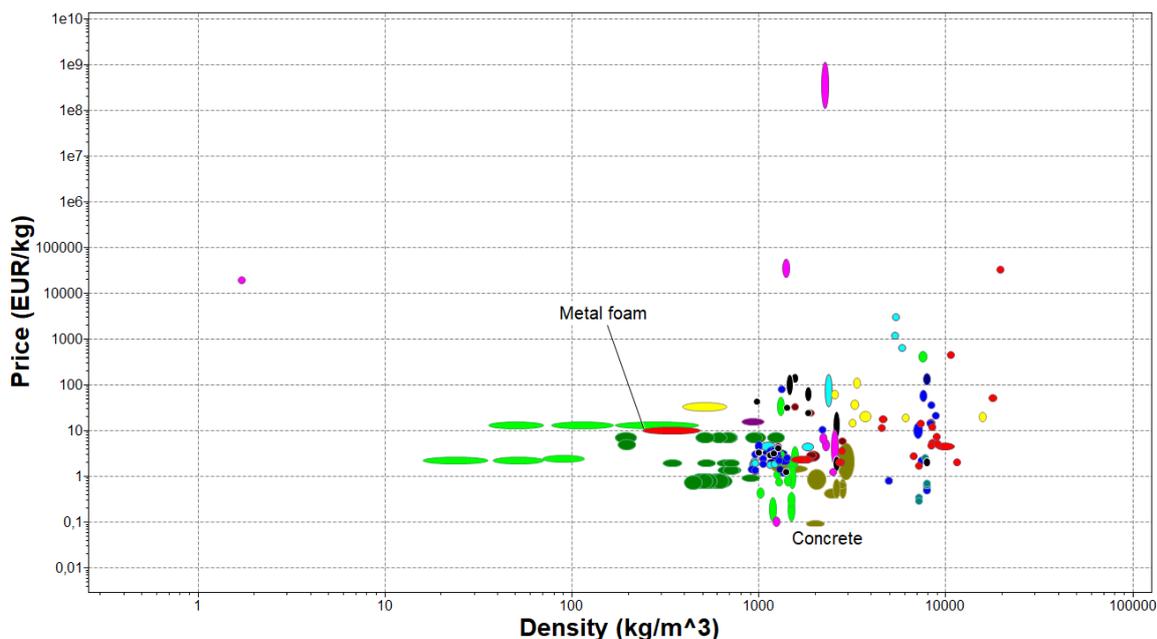


Ilustración 23. Corcho

Atendiendo a las propiedades que tenemos en cuenta vemos que ambos materiales tienen aproximadamente la misma densidad, sin embargo; el corcho es algo más barato. También se comportan similarmente ante el calor y la electricidad. Respecto a las propiedades mecánicas, podemos observar que las de la madera de balsa son bastante mejores, por lo que daremos preferencia a la utilización de este material respecto al corcho.

Otro material que podemos observar que tiene una relación densidad-precio similar a los materiales mencionados anteriormente es la espuma metálica, que, aunque sea una espuma entra dentro de los materiales metálicos. Esta espuma metálica es un material de nueva utilización que es muy útil en varias áreas tecnológicas. Es un material muy poroso, ya que estos ocupan más de la mitad del volumen total.



Gráfica 41. Relación precio densidad de los materiales a estudiar (III)

Las espumas metálicas tienen unas propiedades muy atractivas. Son ligeros y rígidos; tienen buenas características de absorción de energía (lo que los hace buenos para la protección contra choques y el embalaje) y atractivas propiedades de transferencia de calor (utilizadas para enfriar equipos electrónicos y como intercambiadores de calor en motores. Algunos tienen celdas abiertas, muy parecidas a las espumas poliméricas, pero con características de los metales (ductilidad, conductividad eléctrica, soldabilidad, etc.). Otros tienen celdas cerradas, como "corcho metálico". Son visualmente atractivos, lo que sugiere su uso en arquitectura y diseño de interiores. En este momento hay unos 12 proveedores que comercializan esta gama de espumas metálicas, en su mayoría a base de aluminio, pero otros metales (cobre, níquel, acero inoxidable y titanio) pueden convertirse en espuma.

A continuación, se muestran las propiedades que nos da el software CES Edupack 2019:

ESPUMA METÁLICA			
PROPIEDAD	INTERVALO DE VALORES		UNIDADES
Densidad	240	480	Kg/m <sup>3</sup>
Precio	9,82	10,8	€/kg
Fecha primer uso	1956		
Módulo de Young	0,45	1,2	GPa

Módulo de elasticidad transversal	0,2	0,6	GPa
Módulo de compresibilidad	0,45	1,2	GPa
Coefficiente de Poisson	0,28	0,3	-
Límite elástico	0,7	2	MPa
Tensión de rotura	0,7	2,5	MPa
Esfuerzo de compresión	0,85	5	MPa
Deformación	1	4	% strain
Dureza Vickers	0,045	0,12	HV
Resistencia a la fatiga a 10 <sup>7</sup> ciclos	0,2	0,6	MPa
Resistencia a la fractura	0,6	1,2	MPa·m <sup>0,5</sup>
Coefficiente de pérdida mecánica (tan delta)	0,005	0,4	-
Punto de fusión	550	615	°C
Temperatura de transición vítrea	-	-	°C
Temperatura de operación máxima	140	190	°C
Temperatura de operación mínima	-273	-	°C
Conductor o aislante térmico	Mal conductor térmico		
Conductividad térmica	3,8	7	W/m°C
Capacidad de calor específico	910	960	J/kg°C
Coefficiente de expansión térmica	19	21	μstrain/°C
Conductor o aislante eléctrico	Buen conductor eléctrico		
Resistividad eléctrica	34	89	μohm·cm
Constante dieléctrica	-	-	-
Factor de disipación	-	-	-
Rigidez dieléctrica	-	-	MV/m
Transparencia	Opaco		
¿Material de riesgo crítico?	-		

Colabilidad	2	3	-
Moldeabilidad	-	-	-
Soldabilidad	2	3	-
Energía gris	349	385	MJ/kg
Huella de carbono	1,71	1,89	kg/kg
Reciclable	Sí		
Inflamabilidad	No inflamable		

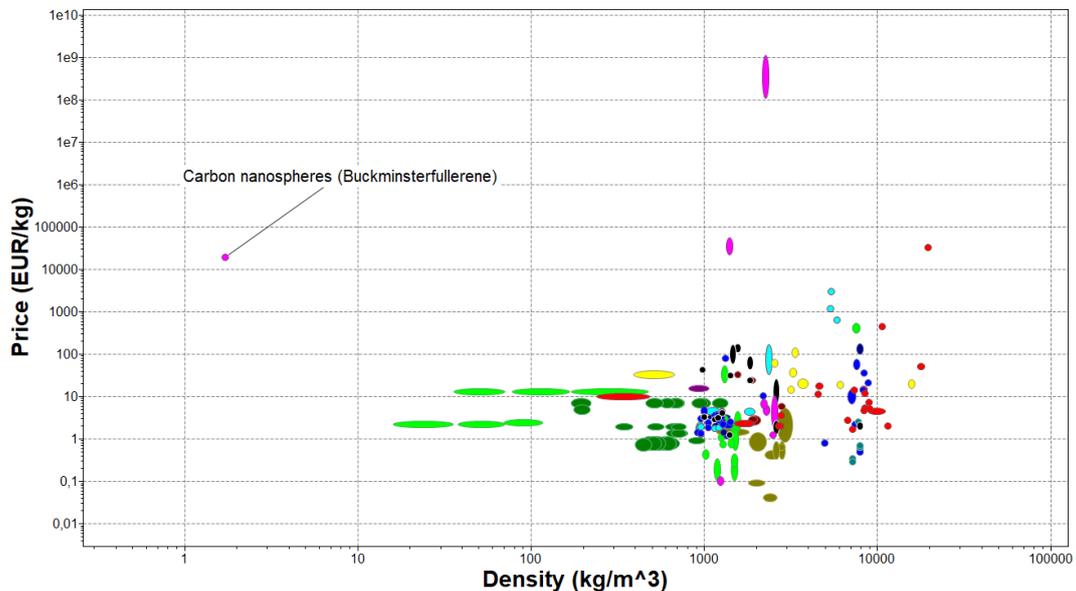
Tabla 9. Propiedades de la espuma metálica

Este material presenta el siguiente aspecto:



Ilustración 24. Espuma metálica

Si observamos detenidamente la gráfica podemos observar que hay uno que destaca especialmente en una de las propiedades que hemos señalado como importantes para la fabricación de este tipo de drones. Este material se llama nanoesferas de carbono. Las nanoesferas de carbono es el material más ligero que contiene la base de datos del software utilizado.

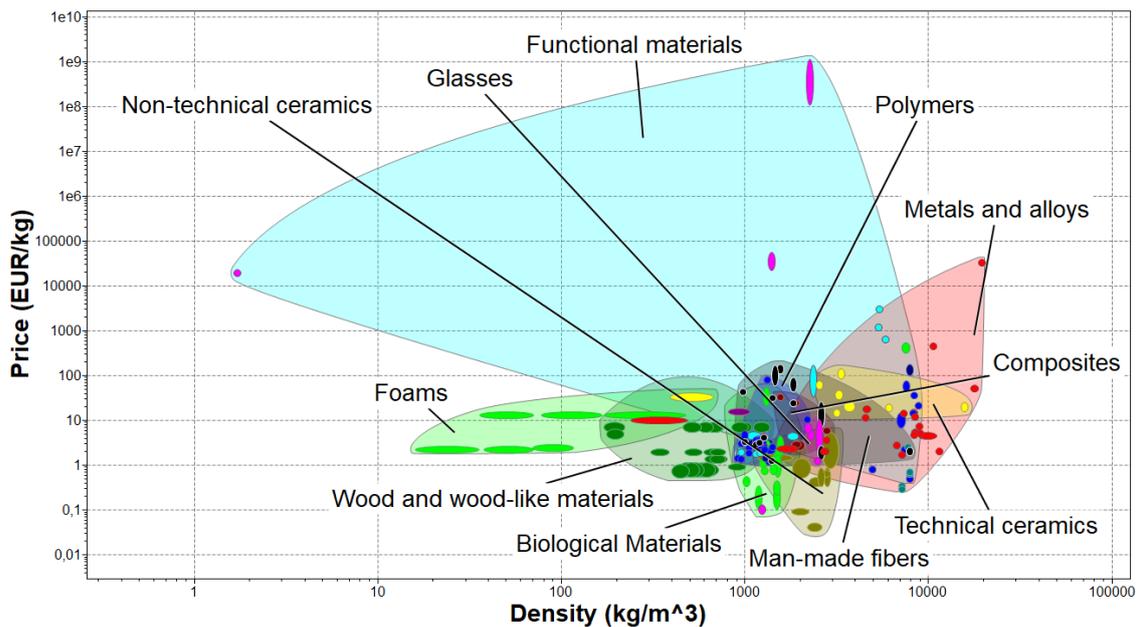


Gráfica 42. Relación precio densidad de los materiales a estudiar (IV)

El carbono existe como tres alótropos: grafito, diamante y carbono amorfo. Las nanoesferas de carbono, los nanotubos, las nano capas (grafeno) y el grafito son fullerenos. El enlace  $sp^2$  en fullerenos une cada átomo a otros tres (a diferencia del enlace  $sp^3$  en el diamante, en el que cada átomo está unido a otros cuatro). Las nanoesferas y los nanotubos pueden actuar como jaulas huecas con otro átomo adentro, creando un compuesto endoédrico.

Este material tiene unas sorprendentes propiedades mecánicas, térmicas y eléctricas. Por esto podemos observar que es un material extremadamente caro que es inviable para la fabricación de un dron de estas características. Probablemente lo analizaremos más adelante en otros tipos de drones de altísima gama o militares.

En la siguiente gráfica podemos observar los materiales que pueden ser idóneos para nuestro dron basándonos en la relación densidad-precio que hemos establecido antes.



Gráfica 43. Relación precio densidad de los materiales a estudiar (V)

Si observamos por tipos de materiales podemos observar que casi todos los tipos de materiales tienen unos compuestos con una relación densidad-precio muy similares, es decir, por la misma zona de la gráfica. Aunque esta es la tendencia natural, podemos ver que los materiales funcionales y, los metales y aleaciones abarcan un espectro más amplio con materiales diferentes entre ellos (en estas propiedades).

Como ya hemos comprobado antes, los mejores materiales para la fabricación de estos drones ultra económicos son las espumas y las maderas o similares. Los peores para su fabricación serían claramente, como podemos ver en la imagen, los metales y aleaciones.

#### **4.2 Drones civiles profesionales de alta gama**

A continuación, vamos a realizar un análisis de los materiales apropiados para la fabricación de drones de alta gama. Este tipo de drones están ahora mismo en auge y las empresas tecnológicas están diseñando sus modelos que normalmente están destinados al ocio y entretenimiento.

Estos drones suelen tener un coste elevado que pueden sobrepasar los 1000 € sin ningún problema. Suelen tener acabados de una gran calidad y además suelen ir equipados con una gran cantidad de dispositivos electrónicos que permiten entre muchas funciones: conexión WIFI, cámara con definición 4K, GPS, sensores...

Para la selección del material que formará la estructura del dron vamos a tener en cuenta las propiedades mecánicas principalmente. Utilizaremos el CES Edupack 2019 para introducir los parámetros a los que les daremos importancia. Estos vehículos no suelen tener tampoco motores muy potentes, por lo que será clave seleccionar materiales que no sean excesivamente pesados.

El precio también lo tendremos en cuenta ya que tampoco puede ser excesivamente elevados, por eso pondremos un tope de 150 €/kg. Esta condición no la tuvimos en cuenta en el primer dron que definimos, por lo que en este diseño analizaremos materiales que antes los desestimábamos por su elevado coste. Tampoco utilizaremos materiales excesivamente caros ya que no le saldría rentable a la empresa, y los destinaremos al uso de drones militares en el siguiente apartado.

También pondremos exigentes límites de tensión de rotura, dureza Vickers y resistencia a la fatiga. He elegido todos estos parámetros ya que considero que son los más importantes. También he tenido en cuenta que otros parámetros son directamente proporcionales con otros que he decidido no introducir en el software, por lo que su ausencia tendrá una influencia mínima.

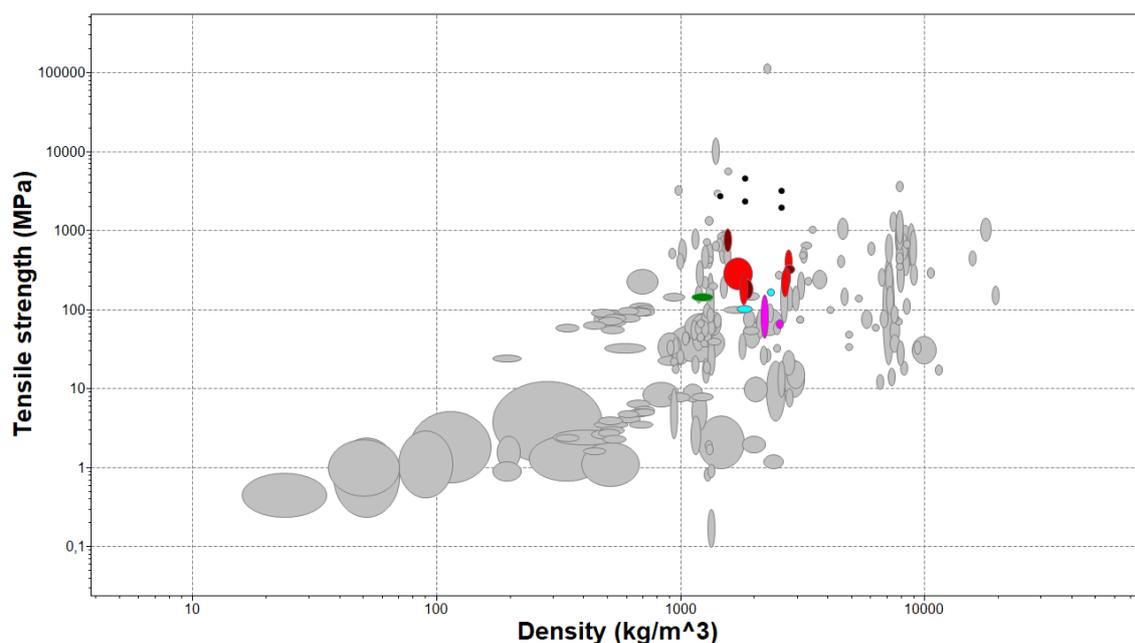
Para la selección de los materiales utilizaremos una gráfica que relaciona la densidad con la tensión de rotura. Para hacer un filtro y despreciar los materiales que no tienen las propiedades mecánicas que queremos en nuestro material utilizaremos un filtro por límites de la siguiente forma:

Density	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="3000"/>	kg/m <sup>3</sup>
Price	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="200"/>	EUR/kg
Hardness - Vickers	<input type="text" value="20"/>	<input type="text" value="3000"/>	HV
Fatigue strength at 10 <sup>7</sup> cycles	<input type="text" value="50"/>	<input type="text" value="10000"/>	MPa

 Etapa 1: Tensile strength (MPa) vs. Density (kg/m<sup>3</sup>)

 Etapa 2: Density, Price, Hardness - Vickers, Fatigue strength at 10<sup>7</sup> cycles

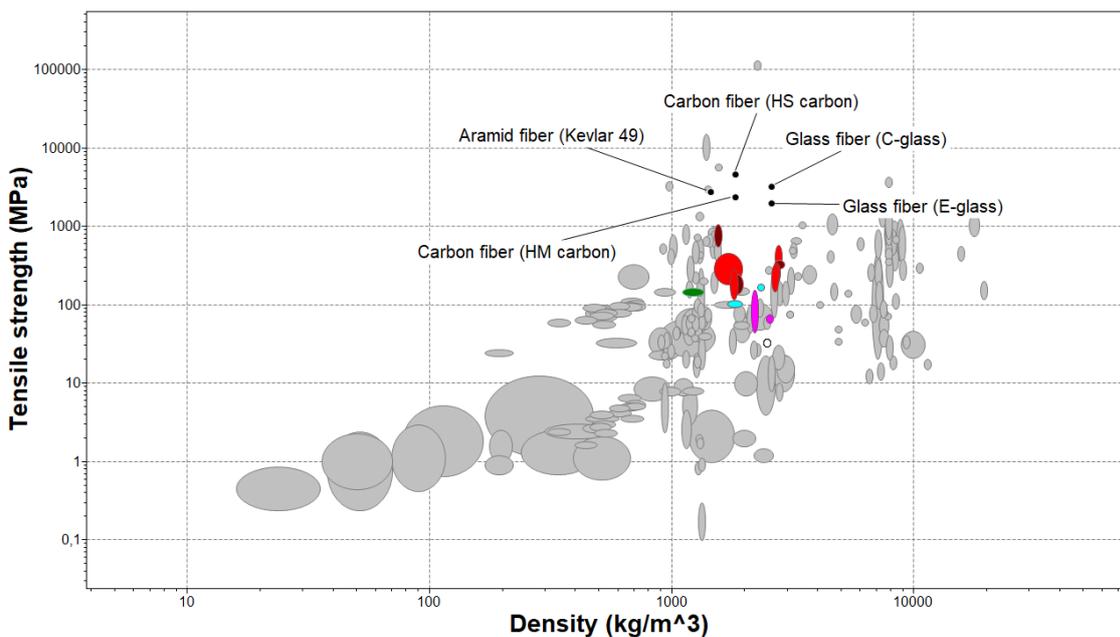
Al aplicar estos filtros en la gráfica, nos aparecerán en color los elementos que se encuentran dentro de estos límites, mientras que los que no cumplen las especificaciones aparecerán en gris:



Gráfica 44. Materiales que pasan las especificaciones fijadas para drones civiles profesionales de alta gama (I)

En la anterior gráfica podemos ver los 18 materiales que cumplen con los criterios que hemos fijado previamente. Aunque pasen el filtro todos esos materiales solo comentaremos y daremos las propiedades al completo de los que consideró que darán mejor rendimiento.

Primero analizaremos las 5 fibras que nos salen resaltadas en negro en la gráfica anterior, como veremos tienen unas propiedades bastante buenas que se adaptarán perfectamente al diseño que queremos en este apartado.



Gráfica 45. Materiales que pasan las especificaciones fijadas para drones civiles profesionales de alta gama (II)

Estos cinco materiales son fibras cuya composición ha sido modificada química y estructuralmente, y que por lo tanto sus propiedades han sido modificadas durante el proceso de fabricación. Esto hace que las propiedades se vean mejoradas, siendo muy útiles para el diseño vehículos o artefactos que requieren de alta resistencia y bajo peso.

En las siguientes tablas podemos ver los valores que toman algunos parámetros en los materiales mencionados.

Las fibras de carbono se fabrican pirolizando fibras orgánicas tales como viscosa, rayón o poliacrilonitrilo (PAN), o a partir de brea de petróleo. El tipo PAN tiene las mejores propiedades mecánicas, pero las producidas a partir de brea son más baratas. Las fibras PAN se estiran primero para alinearse, se oxidan en el aire a temperaturas ligeramente elevadas, luego se carbonizan en un ambiente

inerte a temperaturas muy altas, y finalmente se calientan bajo tensión para convertir la estructura cristalina en la de grafito.

Las fibras de carbono tienen alta resistencia y rigidez con baja densidad, pero se oxidan a altas temperaturas a menos que la atmósfera se reduzca. Vienen en cuatro grados: alto módulo, alta resistencia, módulo ultra alto y resistencia ultra alta, con un aumento de costos en ese orden. Las fibras individuales son muy delgadas (<10 micras de diámetro); generalmente se hilan en remolques y se tejen en textiles. Se utilizan principalmente como refuerzo en matrices de polímero, metal o carbono. Este registro describe las propiedades de las fibras de carbono simples de alta resistencia (HS).

FIBRA DE CARBONO (HS CARBON)			
PROPIEDAD	INTERVALO DE VALORES		UNIDADES
Densidad	1,8·10 <sup>3</sup>	1,84·10 <sup>3</sup>	Kg/m <sup>3</sup>
Precio	21,5	28,8	€/kg
Área de sección de la fibra	2,8·10 <sup>-5</sup>	5·10 <sup>-5</sup>	mm <sup>2</sup>
Módulo de Young	225	260	GPa
Módulo de elasticidad transversal	100	110	GPa
Módulo de compresibilidad	107	109	GPa
Coefficiente de Poisson	0,01	0,2	-
Límite elástico	3,75·10 <sup>3</sup>	4·10 <sup>3</sup>	MPa
Tensión de rotura	4,4·10 <sup>3</sup>	4,8·10 <sup>3</sup>	MPa
Esfuerzo de compresión	4,9·10 <sup>3</sup>	5·10 <sup>3</sup>	MPa
Deformación	1,7	2	% strain
Dureza Vickers	660	810	HV
Resistencia a la fatiga a 10 <sup>7</sup> ciclos	3,83·10 <sup>3</sup>	4,08·10 <sup>3</sup>	MPa
Resistencia a la fractura	1	1,5	MPa·m <sup>0,5</sup>
Coefficiente de pérdida mecánica (tan delta)	1·10 <sup>-5</sup>	2·10 <sup>-5</sup>	-
Punto de fusión	3,69·10 <sup>3</sup>	3,83·10 <sup>3</sup>	°C
Recuperación de humedad	0	0	%

Temperatura de operación máxima	530	580	°C
Temperatura de operación mínima	-273	-272	°C
Conductor o aislante térmico	Buen conductor térmico		
Conductividad térmica	80	200	W/m°C
Capacidad de calor específico	705	715	J/kg°C
Coefficiente de expansión térmica	0,2	0,4	μstrain/°C
Conductor o aislante eléctrico	Buen conductor eléctrico		
Resistividad eléctrica	$6,3 \cdot 10^4$	$1,6 \cdot 10^5$	μohm·cm
Constante dieléctrica	-	-	-
Factor de disipación	-	-	-
Rigidez dieléctrica	-	-	MV/m
Transparencia	Opaco		
¿Material de riesgo crítico?	No		
Colabilidad	-	-	-
Moldeabilidad	-	-	-
Soldabilidad	-	-	-
Energía gris	272	300	MJ/kg
Huella de carbono	19,3	21,3	kg/kg
Reciclable	-		
Inflamabilidad	-		

Tabla 10. Propiedades de la fibra de carbono (HS CARBON)

FIBRA DE CARBONO (HM CARBON)			
PROPIEDAD	INTERVALO DE VALORES		UNIDADES
Densidad	$1,8 \cdot 10^3$	$1,84 \cdot 10^3$	Kg/m <sup>3</sup>
Precio	45	89,9	€/kg
Área de sección de la fibra	$2,8 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$	mm <sup>2</sup>
Módulo de Young	370	390	GPa

Módulo de elasticidad transversal	165	175	GPa
Módulo de compresibilidad	178	180	GPa
Coefficiente de Poisson	0,01	0,2	-
Límite elástico	$2,4 \cdot 10^3$	$2,41 \cdot 10^3$	MPa
Tensión de rotura	$2,4 \cdot 10^3$	$2,41 \cdot 10^3$	MPa
Esfuerzo de compresión	$4,9 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^3$	MPa
Deformación	0,7	1	% strain
Dureza Vickers	660	810	HV
Resistencia a la fatiga a $10^7$ ciclos	$1,87 \cdot 10^3$	$2,4 \cdot 10^3$	MPa
Resistencia a la fractura	1	1,5	MPa·m <sup>0,5</sup>
Coefficiente de pérdida mecánica (tan delta)	$1 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-5}$	-
Punto de fusión	$3,69 \cdot 10^3$	$3,83 \cdot 10^3$	°C
Recuperación de humedad	-	-	%
Temperatura de operación máxima	530	580	°C
Temperatura de operación mínima	-273	-272	°C
Conductor o aislante térmico	-		
Conductividad térmica	80	200	W/m°C
Capacidad de calor específico	705	715	J/kg°C
Coefficiente de expansión térmica	0,2	0,4	μstrain/°C
Conductor o aislante eléctrico	-		
Resistividad eléctrica	$6,3 \cdot 10^4$	$1,6 \cdot 10^5$	μohm·cm
Constante dieléctrica	-	-	-
Factor de disipación	-	-	-
Rigidez dieléctrica	-	-	MV/m
Transparencia	Opaco		
¿Material de riesgo crítico?	No		

Colabilidad	-	-	-
Moldeabilidad	-	-	-
Soldabilidad	-	-	-
Energía gris	272	300	MJ/kg
Huella de carbono	19,3	21,3	kg/kg
Reciclable	No		
Inflamabilidad	-		

Tabla 11. Propiedades de la fibra de carbono (HM CARBON)

Originalmente producida por Dupont como Kevlar, las fibras de aramida se procesan de tal manera que las cadenas de polímero se alinean paralelas al eje de la fibra. La unidad química es una poliamida con una estructura de anillo que proporciona una alta rigidez. Están disponibles en forma de baja densidad / alta resistencia (Kevlar 29), como fibras de alto módulo (Kevlar 49) y como fibras de módulo ultra alto (Kevlar 149). El primero se usa en cuerdas, cables y armaduras; el segundo como refuerzo en polímeros para componentes aeroespaciales, marinos y automotrices. Las fibras Nomex tienen excelente resistencia a las llamas y a la abrasión. Estos materiales son excepcionalmente estables y tienen buena resistencia, tenacidad y rigidez de hasta 170 C.

A este material se le pueden dar muchos usos: ropa protectora de armadura corporal, protección contra bombas y proyectiles, y, en combinación con cerámica de carburo de boro, para chalecos antibalas. Como papel se puede usar para núcleos de panal para paneles sándwich. Como fibras y tejidos se usa como refuerzo en compuestos de matriz polimérica. El Kevlar también se ha utilizado como componente resistente a explosiones de un sistema de cerramiento de edificios. El edificio del Pentágono de los EE. UU. se ha reforzado con un sistema de este tipo.

ARAMIDA (KEVLAR 49)			
PROPIEDAD	INTERVALO DE VALORES		UNIDADES
Densidad	$1,44 \cdot 10^3$	$1,45 \cdot 10^3$	Kg/m <sup>3</sup>
Precio	60,2	170	€/kg
Área de sección de la fibra	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$1,3 \cdot 10^{-4}$	mm <sup>2</sup>
Módulo de Young	125	135	GPa

Módulo de elasticidad transversal	1	1,3	GPa
Módulo de compresibilidad	152	164	GPa
Coefficiente de Poisson	0,35	0,36	-
Límite elástico	$2,25 \cdot 10^3$	$2,75 \cdot 10^3$	MPa
Tensión de rotura	$2,5 \cdot 10^3$	$3 \cdot 10^3$	MPa
Esfuerzo de compresión	200	300	MPa
Deformación	2,4	2,6	% strain
Dureza Vickers	25	50	HV
Resistencia a la fatiga a $10^7$ ciclos	$2,25 \cdot 10^3$	$2,75 \cdot 10^3$	MPa
Resistencia a la fractura	2	4	MPa·m <sup>0,5</sup>
Coefficiente de pérdida mecánica (tan delta)	0,008	0,01	-
Punto de fusión	500	530	°C
Recuperación de humedad	3,5	3,5	%
Temperatura de operación máxima	200	300	°C
Temperatura de operación mínima	-200	-	°C
Conductor o aislante térmico	Mal aislante térmico		
Conductividad térmica	0,2	0,3	W/m°C
Capacidad de calor específico	$1,35 \cdot 10^3$	$1,45 \cdot 10^3$	J/kg°C
Coefficiente de expansión térmica	-4	-2	μstrain/°C
Conductor o aislante eléctrico	Buen aislante eléctrico		
Resistividad eléctrica	$1 \cdot 10^{19}$	$1 \cdot 10^{21}$	μohm·cm
Constante dieléctrica	4,1	4,5	-
Factor de disipación	0,029	0,035	-
Rigidez dieléctrica	30	33	MV/m
Transparencia	Translúcido		
¿Material de riesgo crítico?	No		

Colabilidad	-	-	-
Moldeabilidad	-	-	-
Soldabilidad	-	-	-
Energía gris	222	247	MJ/kg
Huella de carbono	16,4	18,2	kg/kg
Reciclable	-		
Inflamabilidad	-		

Tabla 12. Propiedades de la aramida (Kevlar 49)

Las fibras de vidrio se hacen dándole forma al vidrio fundido a través de una hiladora, obteniendo fibras continuas de diámetro entre 10 y 100 micras. Su perfección les da una fuerza excepcional en la tensión, sin embargo, son flexibles. Se pueden agregar en fieltro que tiene muy baja conducción de calor. Por lo tanto, se utiliza en una variedad de productos de aislamiento térmico para edificios. Se pueden tejer en una tela e imprimir para dar un sustituto resistente al fuego para cortinas o cubiertas (cuando la tela tejida se trata con silicona, se puede usar hasta 250 C). Como fibras o hilos continuos forman el refuerzo en polímeros reforzados con fibra de vidrio, GFRP.

Hay varios grados de fibra de vidrio, que difieren en composición y resistencia. E-glass es el refuerzo estándar. El vidrio C tiene mejor resistencia a la corrosión que E. Los vidrios R y S tienen mejores propiedades mecánicas que E pero son más caros. El vidrio AR resiste los álcalis, lo que permite su uso para reforzar el cemento.

FIBRA DE VIDRIO (C-GLASS)			
PROPIEDAD	INTERVALO DE VALORES		UNIDADES
Densidad	$2,55 \cdot 10^3$	$2,6 \cdot 10^3$	Kg/m <sup>3</sup>
Precio	7,19	27	€/kg
Área de sección de la fibra	$5 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$	mm <sup>2</sup>
Módulo de Young	66	70	GPa
Módulo de elasticidad transversal	27	30	GPa
Módulo de compresibilidad	39	41	GPa
Coefficiente de Poisson	0,21	0,23	-
Límite elástico	$3,2 \cdot 10^3$	$3,3 \cdot 10^3$	MPa

Tensión de rotura	$3,2 \cdot 10^3$	$3,3 \cdot 10^3$	MPa
Esfuerzo de compresión	$4 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^3$	MPa
Deformación	4,6	4,9	% strain
Dureza Vickers	500	600	HV
Resistencia a la fatiga a $10^7$ ciclos	$2,88 \cdot 10^3$	$2,97 \cdot 10^3$	MPa
Resistencia a la fractura	0,5	1	MPa·m <sup>0,5</sup>
Coefficiente de pérdida mecánica (tan delta)	$1 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$	-
Punto de fusión	-	-	°C
Temperatura de transición vítrea	547	577	%
Temperatura de operación máxima	347	377	°C
Temperatura de operación mínima	-	-	°C
Conductor o aislante térmico	-		
Conductividad térmica	1,2	1,35	W/m°C
Capacidad de calor específico	800	805	J/kg°C
Coefficiente de expansión térmica	4,9	5,1	μstrain/°C
Conductor o aislante eléctrico	-		
Resistividad eléctrica	$1 \cdot 10^{22}$	$1 \cdot 10^{23}$	μohm·cm
Constante dieléctrica	6,13	6,33	-
Factor de disipación	0,001	0,004	-
Rigidez dieléctrica	15	20	MV/m
Transparencia	-		
¿Material de riesgo crítico?	Sí		
Colabilidad	-	-	-
Moldeabilidad	-	-	-
Soldabilidad	-	-	-
Energía gris	49,3	54,3	MJ/kg
Huella de carbono	2,85	3,14	kg/kg

Reciclable	No
Inflamabilidad	-

Tabla 13. Propiedades de la fibra de vidrio (C-glass)

FIBRA DE VIDRIO (E-GLASS)			
PROPIEDAD	INTERVALO DE VALORES		UNIDADES
Densidad	$2,55 \cdot 10^3$	$2,6 \cdot 10^3$	Kg/m <sup>3</sup>
Precio	1,4	2,79	€/kg
Área de sección de la fibra	$5 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-4}$	mm <sup>2</sup>
Módulo de Young	72	85	GPa
Módulo de elasticidad transversal	30	36	GPa
Módulo de compresibilidad	43	50	GPa
Coefficiente de Poisson	0,21	0,23	-
Límite elástico	$1,9 \cdot 10^3$	$2,05 \cdot 10^3$	MPa
Tensión de rotura	$1,9 \cdot 10^3$	$2,05 \cdot 10^3$	MPa
Esfuerzo de compresión	$4 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^3$	MPa
Deformación	2,7	3	% strain
Dureza Vickers	350	550	HV
Resistencia a la fatiga a 10 <sup>7</sup> ciclos	$1,6 \cdot 10^3$	$1,7 \cdot 10^3$	MPa
Resistencia a la fractura	0,5	1	MPa·m <sup>0,5</sup>
Coefficiente de pérdida mecánica (tan delta)	$1 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$	-
Punto de fusión	-	-	°C
Temperatura de transición vítrea	547	577	%
Temperatura de operación máxima	347	377	°C
Temperatura de operación mínima	-	-	°C
Conductor o aislante térmico	Mal aislante térmico		
Conductividad térmica	1,2	1,35	W/m°C
Capacidad de calor específico	800	805	J/kg°C

Coefficiente de expansión térmica	4,9	5,1	$\mu\text{strain}/^{\circ}\text{C}$
Conductor o aislante eléctrico	Buen aislante eléctrico		
Resistividad eléctrica	$1 \cdot 10^{22}$	$1 \cdot 10^{23}$	$\mu\text{ohm}\cdot\text{cm}$
Constante dieléctrica	6,13	6,33	-
Factor de disipación	0,001	0,004	-
Rigidez dieléctrica	15	20	MV/m
Transparencia	Calidad Óptica		
¿Material de riesgo crítico?	No		
Colabilidad	-	-	-
Moldeabilidad	-	-	-
Soldabilidad	-	-	-
Energía gris	49,3	54,3	MJ/kg
Huella de carbono	2,85	3,14	kg/kg
Reciclable	No		
Inflamabilidad	-		

Tabla 14. Propiedades de la fibra de vidrio (E-glass)

En las siguientes fotografías podemos observar el aspecto físico que presentarían los materiales comentados anteriormente:

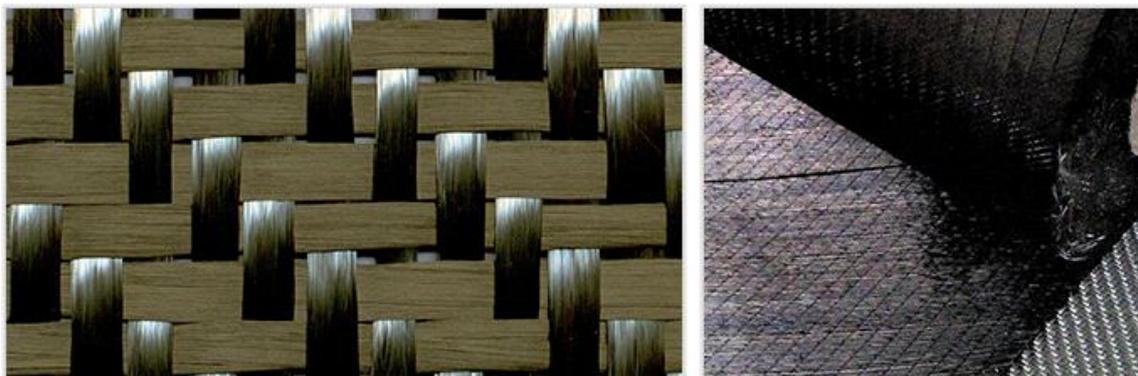


Ilustración 25. Fibra de carbono

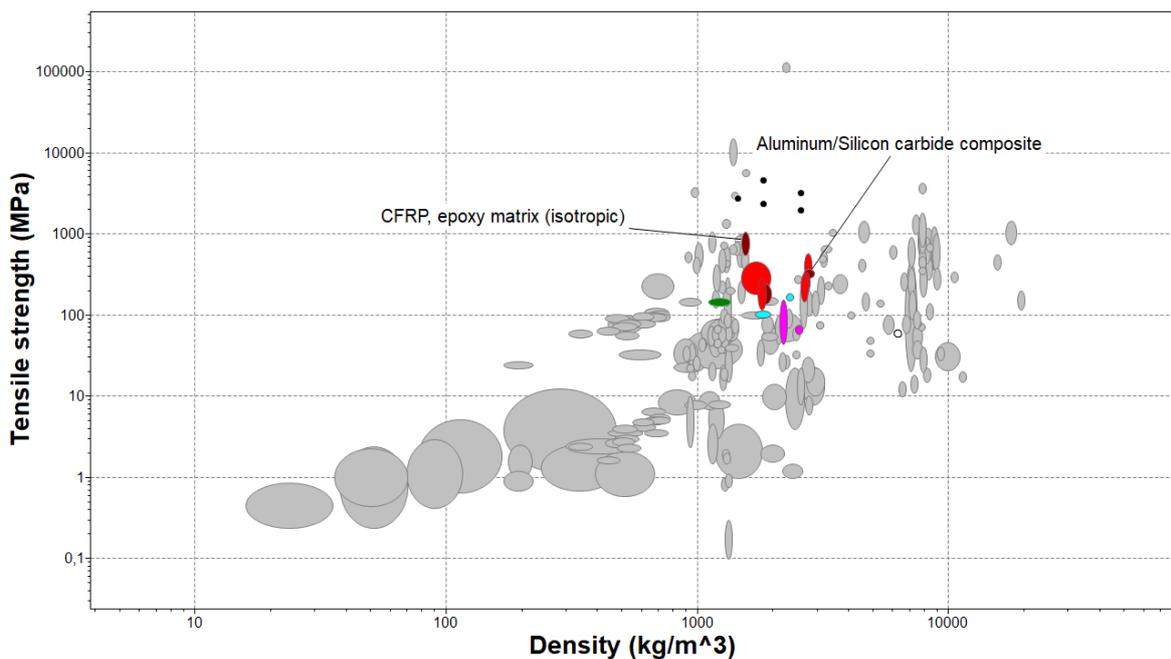


Ilustración 26. Fibra de aramida (Kevlar 49)



Ilustración 27. Fibra de vidrio

Una vez dadas las propiedades de las fibras debemos analizar otras alternativas para ver si nos sale más rentable la utilización de otro tipo de material, por lo tanto, a continuación, veremos los dos materiales compuestos que podrían ajustarse a nuestras exigencias:



Gráfica 46. Materiales que pasan las especificaciones fijadas para drones civiles profesionales de alta gama (III)

El CFRP o polímero reforzado con fibra de carbono se trata de un plástico reforzado con fibra de carbono. Los compuestos reforzados con fibra de carbono (CFRP) ofrecen una mayor rigidez y resistencia que cualquier otro tipo, pero son considerablemente más caros que el GFRP. Las fibras continuas en una matriz de poliéster o epoxi brindan el mayor rendimiento. Las fibras transportan las cargas mecánicas, mientras que el material de la matriz transmite cargas a las fibras y proporciona ductilidad y tenacidad, además de proteger las fibras del daño causado por la manipulación o el medio ambiente. Es el material de la matriz el que limita la temperatura de servicio y las condiciones de procesamiento.

Las propiedades de los compuestos de fibra están fuertemente influenciadas por la elección de la fibra y la matriz y la forma en que se combinan: relación fibra-resina, longitud de la fibra, orientación de la fibra, grosor del laminado y la presencia de agentes de acoplamiento de fibra / resina para mejorar la unión. El vidrio ofrece alta resistencia a bajo costo; el carbono tiene muy alta resistencia, rigidez y baja densidad; Kevlar tiene alta resistencia y baja densidad, es ignífugo y transparente a las ondas de radio (a diferencia del carbono).

Los poliésteres son las matrices más utilizadas, ya que ofrecen propiedades razonables a un costo relativamente bajo. Las propiedades superiores de los epoxis y el rendimiento de temperatura de las poliimidas pueden justificar su uso en ciertas aplicaciones, pero son caras. La resistencia de un material compuesto aumenta proporcionalmente a la relación fibra-resina y orientando las fibras paralelas a la dirección de carga. Cuanto más largas son las fibras, más eficiente es el refuerzo para transportar las cargas aplicadas, pero las fibras más cortas son más fáciles de procesar y, por lo tanto, más baratas. El aumento del espesor del laminado conduce a una menor resistencia y módulo compuestos, ya que hay una mayor probabilidad de huecos atrapados. Los agentes de acoplamiento generalmente aumentan la resistencia a la tracción. Las condiciones ambientales afectan el rendimiento de los compuestos: la carga por fatiga, la humedad y el calor reducen la resistencia permisible.

Este material tiene múltiples usos: componentes estructurales ligeros en tecnologías aeroespaciales y automovilísticas. También se suele usar equipos

deportivos como palos de golf, remos, botes y raquetas. Su uso se ha extendido también a aplicaciones como muelles o recipientes a presión.

En la siguiente tabla podemos observar las propiedades de este polivalente material:

POLÍMERO REFORZADO CON FIBRA DE CARBONO (ISOTRÓPICO)			
PROPIEDAD	INTERVALO DE VALORES		UNIDADES
Densidad	1,5·10 <sup>3</sup>	1,6·10 <sup>3</sup>	Kg/m <sup>3</sup>
Precio	32,1	35,6	€/kg
Fecha primer uso	1963		
Módulo de Young	69	150	GPa
Módulo de elasticidad transversal	28	60	GPa
Módulo de compresibilidad	43	80	GPa
Coeficiente de Poisson	0,305	0,307	-
Límite elástico	550	1,05·10 <sup>3</sup>	MPa
Tensión de rotura	550	1,05·10 <sup>3</sup>	MPa
Esfuerzo de compresión	440	840	MPa
Deformación	0,32	0,35	% strain
Dureza Vickers	10,8	21,5	HV
Resistencia a la fatiga a 10 <sup>7</sup> ciclos	150	300	MPa
Resistencia a la fractura	6,12	20	MPa·m <sup>0,5</sup>
Coeficiente de pérdida mecánica (tan delta)	0,0014	0,0033	-
Punto de fusión	-	-	°C
Temperatura de transición vítrea	99,9	180	°C
Temperatura de operación máxima	140	220	°C
Temperatura de operación mínima	-123	-73,2	°C
Conductor o aislante térmico	Mal aislante térmico		
Conductividad térmica	1,28	2,6	W/m°C

Capacidad de calor específico	902	$1,04 \cdot 10^3$	J/kg°C
Coefficiente de expansión térmica	1	4	$\mu\text{strain}/^\circ\text{C}$
Conductor o aislante eléctrico	Mal conductor eléctrico		
Resistividad eléctrica	$1,65 \cdot 10^5$	$9,46 \cdot 10^5$	$\mu\text{ohm}\cdot\text{cm}$
Constante dieléctrica	-	-	-
Factor de disipación	-	-	-
Rigidez dieléctrica	-	-	MV/m
Transparencia	Opaco		
¿Material de riesgo crítico?	No		
Colabilidad	-	-	-
Moldeabilidad	4	5	-
Soldabilidad	-	-	-
Energía gris	453	500	MJ/kg
Huella de carbono	32,9	36,4	kg/kg
Reciclable	No		
Inflamabilidad	-		

Tabla 15. Propiedades del polímero reforzado con fibra de carbono (isotrópico)

El otro material compuesto de este tipo será un compuesto de matriz metálica de aluminio y silicio. Los compuestos de matriz metálica son metales reforzados con partículas cerámicas. Los más utilizados se basan en aluminio reforzado con partículas de carburo de silicio o alúmina. El refuerzo aumenta la rigidez, la resistencia y la temperatura máxima de servicio sin aumentar seriamente el peso. La producción ahora excede las 10,000 toneladas por año, a un costo de 5 a 8 €/ kg.

Entre sus muchas aplicaciones destacamos la fabricación de: pistones; partes del motor; discos de freno, tambores y pinzas, ejes de transmisión, cuadros de bicicleta de montaña. También se suele utilizar para la fabricación de instrumentos de precisión y equipamiento deportivo como cuadros de bicicleta de montaña y ejes de palos de golf.

COMPUESTO DE CARBURO DE ALUMINIO/SILICIO			
PROPIEDAD	INTERVALO DE VALORES		UNIDADES
Densidad	2,66·10 <sup>3</sup>	2,9·10 <sup>3</sup>	Kg/m <sup>3</sup>
Precio	5,33	7,1	€/kg
Fecha primer uso	1982		
Módulo de Young	81	100	GPa
Módulo de elasticidad transversal	30,4	38,5	GPa
Módulo de compresibilidad	68	83	GPa
Coefficiente de Poisson	0,29	0,31	-
Límite elástico	280	324	MPa
Tensión de rotura	290	365	MPa
Esfuerzo de compresión	280	325	MPa
Deformación	1	5	% strain
Dureza Vickers	70	140	HV
Resistencia a la fatiga a 10 <sup>7</sup> ciclos	50	110	MPa
Resistencia a la fractura	15	24	MPa·m <sup>0,5</sup>
Coefficiente de pérdida mecánica (tan delta)	0,001	0,009	-
Punto de fusión	525	627	°C
Temperatura de transición vítrea	-	-	°C
Temperatura de operación máxima	227	367	°C
Temperatura de operación mínima	-273	-	°C
Conductor o aislante térmico	Buen conductor térmico		
Conductividad térmica	100	160	W/m°C
Capacidad de calor específico	800	900	J/kg°C
Coefficiente de expansión térmica	15	23	μstrain/°C
Conductor o aislante eléctrico	Buen conductor eléctrico		

Resistividad eléctrica	5	12	$\mu\text{ohm}\cdot\text{cm}$
Constante dieléctrica	-	-	-
Factor de disipación	-	-	-
Rigidez dieléctrica	-	-	MV/m
Transparencia	Opaco		
¿Material de riesgo crítico?	Sí		
Colabilidad	3	4	-
Moldeabilidad	1	3	-
Soldabilidad	2	-	-
Energía gris	827	914	MJ/kg
Huella de carbono	48,6	53,7	kg/kg
Reciclable	Sí		
Inflamabilidad	No inflamable		

Tabla 16. Propiedades del compuesto de carburo de aluminio/silicio

Como podemos observar, estos dos elementos pese a tener propiedades bastante aptas, no se acercan a las excelentes propiedades que tienen las cinco primeras fibras comentadas previamente.

Físicamente presentan el siguiente aspecto:

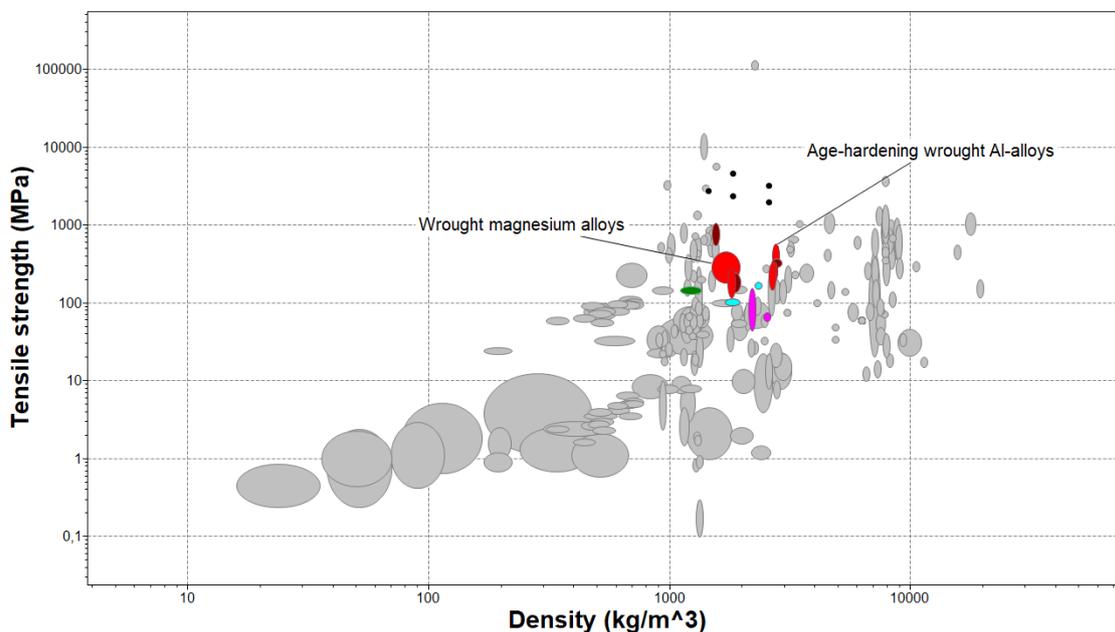


Ilustración 28. Polímero reforzado con fibra de carbono



Ilustración 29. Compuesto de carburo de aluminio/silicio

Por último, analizaremos también los dos materiales metálicos que según el software pueden acercarse más a las especificaciones que pedimos.



Gráfica 47. Materiales que pasan las especificaciones fijadas para drones civiles profesionales de alta gama (IV)

En primer lugar, comentaremos las aleaciones de magnesio forjado.

El magnesio es un metal casi indistinguible del aluminio en color, pero de menor densidad. Es el trío de metal ligero más liviano (con socios de aluminio y titanio) y ligero: una caja de computadora hecha de magnesio es apenas dos tercios tan pesada como una de aluminio. El aluminio y el magnesio son los pilares de la ingeniería de fuselaje. Solo el berilio es más ligero, pero su gasto y toxicidad potencial limitan su uso únicamente a aplicaciones especiales. El magnesio es inflamable, pero esto es solo un problema cuando está en forma de polvo o una lámina muy delgada. Cuesta más que el aluminio, pero no tanto como el titanio. El magnesio y sus aleaciones tienen una estructura de cristal hexagonal (a diferencia del aluminio) que restringe su capacidad de ser laminado o forjado a temperatura ambiente. Sin embargo, pueden extruirse, forjarse y enrollarse por encima de 350 °C. Esto explica en parte el bajo consumo de productos forjados: representan aproximadamente el 25% del consumo de aleación de magnesio.

Este material tiene múltiples aplicaciones como la tecnología aeroespacial, automoción, deportes como el ciclismo, latas de combustible

nuclear, amortiguación de vibraciones, carcasas de teléfonos móviles, material de oficina, cortacésped, etc.

Podemos observar sus propiedades en la tabla que viene a continuación:

ALEACIONES DE MAGNESIO FORJADO			
PROPIEDAD	INTERVALO DE VALORES		UNIDADES
Densidad	1,5·10 <sup>3</sup>	1,95·10 <sup>3</sup>	Kg/m <sup>3</sup>
Precio	2,31	2,49	€/kg
Fecha primer uso	1950		
Módulo de Young	42	47	GPa
Módulo de elasticidad transversal	16	19	GPa
Módulo de compresibilidad	35	41	GPa
Coefficiente de Poisson	0,29	0,31	-
Límite elástico	115	410	MPa
Tensión de rotura	185	450	MPa
Esfuerzo de compresión	115	410	MPa
Deformación	3,5	18	% strain
Dureza Vickers	43	135	HV
Resistencia a la fatiga a 10 <sup>7</sup> ciclos	90	225	MPa
Resistencia a la fractura	12	18	MPa·m <sup>0,5</sup>
Coefficiente de pérdida mecánica (tan delta)	9·10 <sup>-4</sup>	0,02	-
Punto de fusión	447	649	°C
Temperatura de transición vítrea	-	-	°C
Temperatura de operación máxima	120	200	°C
Temperatura de operación mínima	-83,2	-53,2	°C
Conductor o aislante térmico	Buen conductor térmico		
Conductividad térmica	50	126	W/m°C
Capacidad de calor específico	955	1,06·10 <sup>3</sup>	J/kg°C

Coeficiente de expansión térmica	24,6	28	$\mu\text{strain}/^{\circ}\text{C}$
Conductor o aislante eléctrico	Buen conductor eléctrico		
Resistividad eléctrica	4,15	15	$\mu\text{ohm}\cdot\text{cm}$
Constante dieléctrica	-	-	-
Factor de disipación	-	-	-
Rigidez dieléctrica	-	-	MV/m
Transparencia	Opaco		
¿Material de riesgo crítico?	Sí		
Colabilidad	4	5	-
Moldeabilidad	2	3	-
Soldabilidad	4	-	-
Energía gris	294	324	MJ/kg
Huella de carbono	33,6	37,1	kg/kg
Reciclable	Sí		
Inflamabilidad	No inflamable		

*Tabla 17. Propiedades de las aleaciones de magnesio forjado*

El otro metal que destacaremos serán las aleaciones de aluminio forjado endurecidas por envejecimiento.

Las aleaciones de aluminio de alta resistencia se basan en el endurecimiento por envejecimiento: una secuencia de pasos de tratamiento térmico que provoca la precipitación de una dispersión a nano escala de compuestos intermetálicos que impiden el movimiento de dislocación e imponen resistencia. Esto puede ser tan alto como 700 MPa, lo que les da una relación resistencia/peso que excede incluso la de los aceros más fuertes. Este registro describe la serie de aleaciones de aluminio forjado que dependen del endurecimiento por envejecimiento y requieren un tratamiento térmico en solución seguido de enfriamiento y envejecimiento. Esto se registra agregando TX al número de serie, donde X es un número entre 0 y 8 que registra el estado del tratamiento térmico.

Se enumeran a continuación utilizando las designaciones de IADS:

- Serie 2000: Al con 2 a 6% Cu - la serie aeroespacial más antigua y utilizada.

- Serie 6000: Al con hasta 1.2% de Mg y 1.3% Si - extrusiones y forjas de resistencia media.
- Serie 7000: Al con hasta 8% de Zn y 3% de Mg - el Hércules de aleaciones de aluminio, utilizado para estructuras de aviones de alta resistencia, forjas y láminas.

Ciertas aleaciones especiales también contienen plata. Por lo tanto, este registro, como el de las aleaciones de endurecimiento sin envejecimiento, es amplio y abarca todo esto.

ALEACIONES DE ALUMINIO FORJADO ENDURECIDAS POR ENVEJECIMIENTO			
PROPIEDAD	INTERVALO DE VALORES		UNIDADES
Densidad	$2,67 \cdot 10^3$	$2,84 \cdot 10^3$	Kg/m <sup>3</sup>
Precio	3,58	3,78	€/kg
Fecha primer uso	1916		
Módulo de Young	68	76	GPa
Módulo de elasticidad transversal	26	29	GPa
Módulo de compresibilidad	68	75	GPa
Coeficiente de Poisson	0,33	0,34	-
Límite elástico	241	520	MPa
Tensión de rotura	288	581	MPa
Esfuerzo de compresión	245	521	MPa
Deformación	3,4	12	% strain
Dureza Vickers	85,4	168	HV
Resistencia a la fatiga a 10 <sup>7</sup> ciclos	100	219	MPa
Resistencia a la fractura	25,7	41	MPa·m <sup>0,5</sup>
Coeficiente de pérdida mecánica (tan delta)	0,0011	-	-
Punto de fusión	502	647	°C
Temperatura de transición vítrea	-	-	°C
Temperatura de operación máxima	79,5	150	°C

Temperatura de operación mínima	-273	-	°C
Conductor o aislante térmico	Buen conductor térmico		
Conductividad térmica	135	185	W/m°C
Capacidad de calor específico	879	999	J/kg°C
Coefficiente de expansión térmica	22,7	24,6	μstrain/°C
Conductor o aislante eléctrico	Buen conductor eléctrico		
Resistividad eléctrica	3,6	5,3	μohm·cm
Constante dieléctrica	-	-	-
Factor de disipación	-	-	-
Rigidez dieléctrica	-	-	MV/m
Transparencia	Opaco		
¿Material de riesgo crítico?	Sí		
Colabilidad	4	5	-
Moldeabilidad	3	4	-
Soldabilidad	3	4	-
Energía gris	187	206	MJ/kg
Huella de carbono	12,5	13,7	kg/kg
Reciclable	Sí		
Inflamabilidad	No inflamable		

Tabla 18. Propiedades de las aleaciones de aluminio forjado endurecidas por envejecimiento

Estos dos metales tienen el siguiente aspecto físico:



Ilustración 30. Aleaciones del magnesio forjado



Ilustración 31. Aleaciones de aluminio forjado endurecidas por envejecimiento

En este apartado hemos analizado materiales con unas excelentes propiedades mecánicas que se adaptarían perfectamente a lo que buscamos en la fabricación de este tipo de drones. De entre todos estos materiales podemos destacar las fibras de carbono, en especial la HM, que tiene unas propiedades excepcionales que podrían servir incluso para la fabricación y el diseño de un dron militar

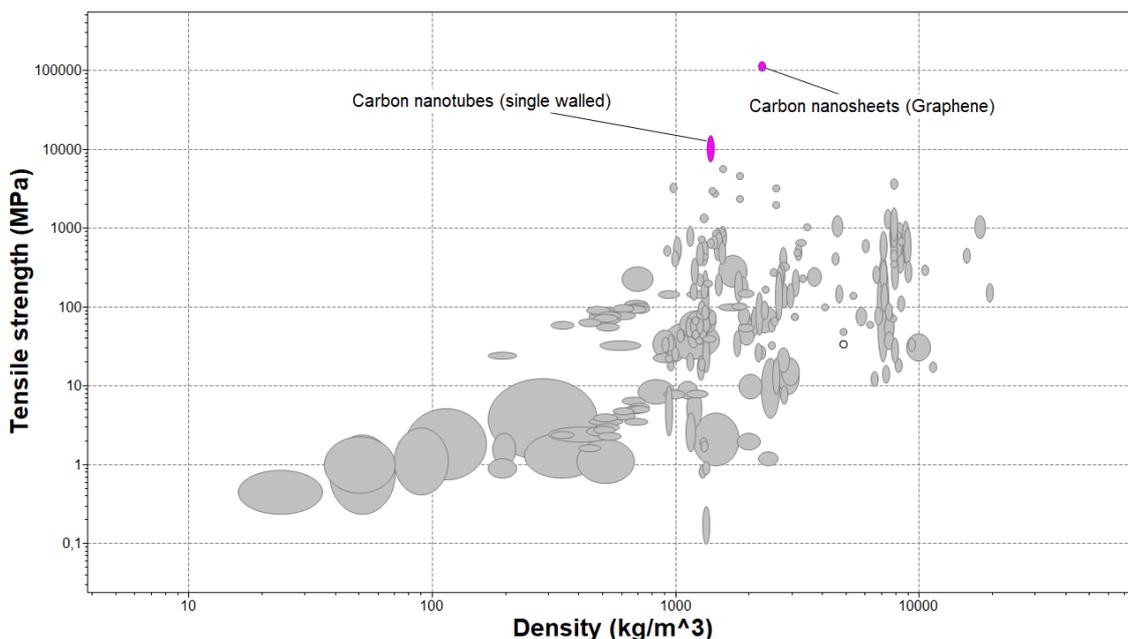
#### **4.3 Drones militares**

Los drones militares serán los últimos drones aéreos para los que seleccionaremos los mejores materiales para su estructura. Estos drones son los más exigentes en cuanto a propiedades, ya que serán expuestos a condiciones muy extremas.

En este caso uno de los filtros que quitaremos será el del precio, ya que los gobiernos poseen de suficiente poderío económico como para que no le importe este parámetro a la hora de fabricar uno de sus drones. También hemos añadido unos límites de propiedades mecánicas más elevados para tener materiales que se pueden enfrentar con éxito a los posibles inconvenientes que puede tener un dron de este tipo. Hemos añadido también una temperatura máxima de funcionamiento alta ya que estos drones pueden encontrarse con armas de fuego o condiciones ambientales muy adversas.

Seguidamente adjuntamos los criterios mínimos que hemos impuesto:

Density	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="4000"/>	kg/m <sup>3</sup>
Price	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="1e13"/>	EUR/kg
Yield strength (elastic limit)	<input type="text" value="7000"/>	<input type="text" value="1e13"/>	MPa
Tensile strength	<input type="text" value="7000"/>	<input type="text" value="1e12"/>	MPa
Maximum service temperature	<input type="text" value="700"/>	<input type="text" value="1e8"/>	°C



Gráfica 48. Materiales que pasan las especificaciones fijadas para drones militares

Estos dos materiales han sido creados en los últimos años y debido a sus excelentes propiedades térmicas y mecánicas tiene múltiples usos en el campo de la ingeniería. Vamos a comentar las propiedades que tienen estos dos sorprendentes materiales, para comprobar si son los más apropiados para la fabricación de nuestro dron.

Los nanotubos de carbono son fullerenos, como el grafeno enrollado en un cilindro con una pared de uno o más átomos de espesor. Las propiedades dependen del ángulo de balanceo (son posibles tres ángulos distintos) y del radio del tubo, con consecuencias curiosas: los nanotubos pueden mostrar conducción metálica o actuar como semiconductores. Los nanotubos pueden tener paredes simples (SWNT) o paredes múltiples, como tubos dentro de tubos (MWNT). El enlace sp<sup>2</sup> en fullerenos une cada átomo a otros tres (a diferencia del enlace sp<sup>3</sup>

en el diamante, en el que cada átomo está unido a otros cuatro), y es excepcionalmente fuerte.

Los nanotubos de carbono se fabrican mediante descarga de arco, ablación por láser, desproporción de monóxido de carbono a alta presión y deposición química de vapor (CVD). El precio de los nanotubos de pared simple ha caído de alrededor de \$ 1500 por gramo a alrededor de \$ 50 por gramo en la última década. Todavía son demasiado caros para su uso para reforzar materiales, pero se espera que tengan un profundo impacto en la electrónica en la próxima década.

La alta rigidez y resistencia de los nanotubos de carbono (CNT) ha llevado a sugerencias para su uso como refuerzo en compuestos de matriz polimérica. Los ensayos muestran mejoras sustanciales, pero el costo de incluir solo el 1% de las CNT es tan grande en la actualidad que es muy complicado que las empresas opten por usar este material.

Mostramos a continuación las propiedades de este sorprendente material:

NANOTUBOS DE CARBONO			
PROPIEDAD	INTERVALO DE VALORES		UNIDADES
Densidad	$1,37 \cdot 10^3$	$1,4 \cdot 10^3$	Kg/m <sup>3</sup>
Precio	$2,29 \cdot 10^4$	$5,72 \cdot 10^4$	€/kg
Fecha primer uso	1993		
Módulo de Young	$1,2 \cdot 10^3$	$1,4 \cdot 10^3$	GPa
Módulo de elasticidad transversal	$7 \cdot 10^3$	$1,5 \cdot 10^4$	GPa
Módulo de compresibilidad	$7 \cdot 10^3$	$1,5 \cdot 10^4$	GPa
Coefficiente de Poisson	-	-	-
Límite elástico	-	-	MPa
Tensión de rotura	-	-	MPa
Esfuerzo de compresión	-	-	MPa
Deformación	9	11	% strain
Dureza Vickers	-	-	HV
Resistencia a la fatiga a 10 <sup>7</sup> ciclos	-	-	MPa

Resistencia a la fractura	-	-	MPa·m <sup>0,5</sup>
Coefficiente de pérdida mecánica (tan delta)	-	-	-
Punto de fusión	3,53·10 <sup>3</sup>	3,55·10 <sup>3</sup>	°C
Temperatura de transición vítrea	-	-	°C
Temperatura de operación máxima	740	760	°C
Temperatura de operación mínima	-	-	°C
Conductor o aislante térmico	Buen conductor térmico		
Conductividad térmica	2,2·10 <sup>3</sup>	3,5·10 <sup>3</sup>	W/m°C
Capacidad de calor específico	105	115	J/kg°C
Coefficiente de expansión térmica	1	2	μstrain/°C
Conductor o aislante eléctrico	Buen conductor eléctrico		
Resistividad eléctrica	34	100	μohm·cm
Constante dieléctrica	-	-	-
Factor de disipación	-	-	-
Rigidez dieléctrica	-	-	MV/m
Transparencia	-		
¿Material de riesgo crítico?	Sí		
Colabilidad	-	-	-
Moldeabilidad	-	-	-
Soldabilidad	-	-	-
Energía gris	1·10 <sup>4</sup>	5·10 <sup>4</sup>	MJ/kg
Huella de carbono	-	-	kg/kg
Reciclable	-		
Inflamabilidad	-		

Tabla 19. Propiedades de los nanotubos de carbono

El otro material que vamos a comentar es el grafeno, que es bastante similar a los nanotubos de carbono, pero tienen pequeñas diferencias. El grafeno

es una monocapa de carbono en una red hexagonal de un átomo (0.345 nm) de espesor. Dentro de la capa, los átomos de carbono están unidos sp<sup>2</sup> con una longitud de enlace de 0.142 nm. El grafito está formado por capas de grafeno apiladas una encima de la otra con una separación interplanar de 0.335 nm.

El grafeno es un semimetal de superposición cero (con agujeros y electrones como portadores de carga) con una conductividad eléctrica muy alta. Los átomos de carbono tienen un total de 6 electrones; 2 en la carcasa interna y 4 en la carcasa externa. Los 4 electrones de la capa externa en un átomo de carbono individual están disponibles para enlace químico, pero en el grafeno, cada átomo está conectado a otros 3 átomos de carbono en el plano bidimensional, dejando 1 electrón disponible libremente en la tercera dimensión para la conducción electrónica. Estos electrones pi (p) se encuentran arriba y debajo de la lámina de grafeno y son altamente móviles. Los orbitales p se superponen y mejoran los enlaces carbono-carbono en el grafeno. La unión y antiadherencia de los orbitales p determinan las propiedades electrónicas del grafeno.

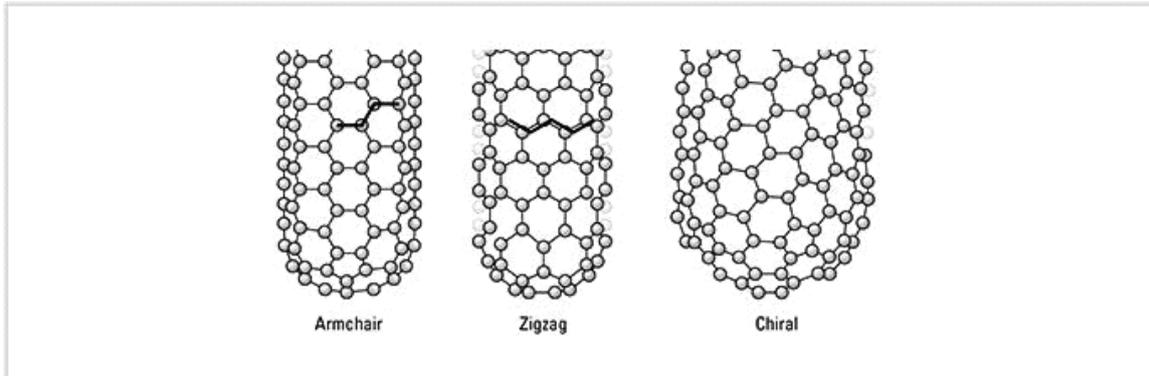
En la tabla que observamos a continuación se muestran las propiedades de este material:

GRAFENO			
PROPIEDAD	INTERVALO DE VALORES		UNIDADES
Densidad	$2,24 \cdot 10^3$	$2,25 \cdot 10^3$	Kg/m <sup>3</sup>
Precio	$1,14 \cdot 10^8$	$1,14 \cdot 10^9$	€/kg
Fecha primer uso	2004		
Módulo de Young	700	1000	GPa
Módulo de elasticidad transversal	310	430	GPa
Módulo de compresibilidad	349	490	GPa
Coeficiente de Poisson	0,15	0,17	-
Límite elástico	$1 \cdot 10^5$	$1,3 \cdot 10^5$	MPa
Tensión de rotura	$1 \cdot 10^5$	$1,3 \cdot 10^5$	MPa
Esfuerzo de compresión	-	-	MPa
Deformación	-	-	% strain
Dureza Vickers	-	-	HV

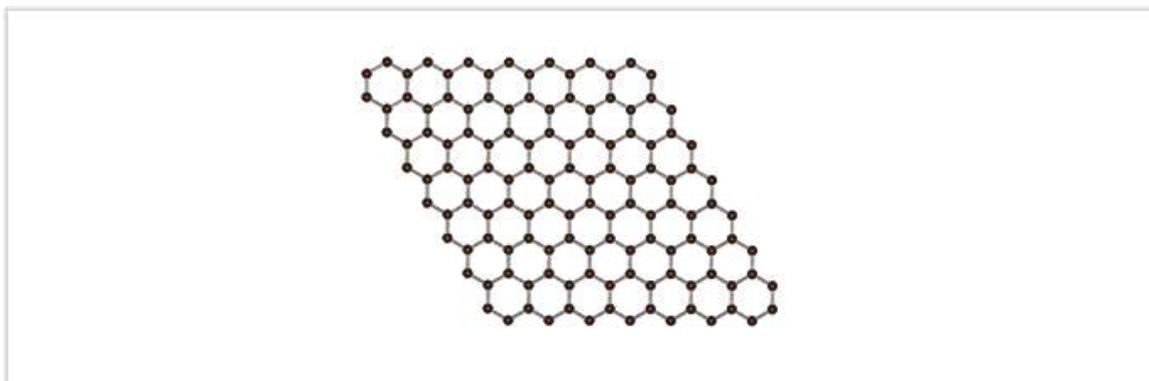
Resistencia a la fatiga a 10 <sup>7</sup> ciclos	-	-	MPa
Resistencia a la fractura	3,8	4	MPa·m <sup>0,5</sup>
Coefficiente de pérdida mecánica (tan delta)	3·10 <sup>-5</sup>	5·10 <sup>-5</sup>	-
Punto de fusión	3,55·10 <sup>3</sup>	3,55·10 <sup>3</sup>	°C
Temperatura de transición vítrea	-	-	°C
Temperatura de operación máxima	745	755	°C
Temperatura de operación mínima	-	-	°C
Conductor o aislante térmico	Buen conductor térmico		
Conductividad térmica	2·10 <sup>3</sup>	4,5·10 <sup>3</sup>	W/m°C
Capacidad de calor específico	700	900	J/kg°C
Coefficiente de expansión térmica	-	-	μstrain/°C
Conductor o aislante eléctrico	Buen conductor eléctrico		
Resistividad eléctrica	1	1,2	μohm·cm
Constante dieléctrica	-	-	-
Factor de disipación	-	-	-
Rigidez dieléctrica	-	-	MV/m
Transparencia	-		
¿Material de riesgo crítico?	Sí		
Colabilidad	-	-	-
Moldeabilidad	-	-	-
Soldabilidad	-	-	-
Energía gris	1·10 <sup>4</sup>	5·10 <sup>4</sup>	MJ/kg
Huella de carbono	-	-	kg/kg
Reciclable	-		
Inflamabilidad	-		

Tabla 20. Propiedades del grafeno

En las siguientes imágenes observamos como se presentan sus estructuras en el laboratorio:



*Ilustración 32. Nanotubos de carbono*



*Ilustración 33. Grafeno*



## **5. CONCLUSIONES**

Como podemos observar en los primeros capítulos de este trabajo, los drones son vehículos que han sido de reciente descubrimiento y que se encuentran en auge debido a los desarrollos tecnológicos de los últimos años. Como hemos comprobado los drones se empezaron a diseñar con fin militar, ya que estos les permitían atacar al enemigo desde la distancia sin tener que afrontar la pérdida de ninguno de sus soldados. Durante los últimos años se han implementado tecnologías que permiten que los drones se puedan aplicar a multitud de campos, como grabaciones de videos de alta o entrega de mensajería. Los drones en la actualidad siguen siendo usados por los gobiernos, sobre todo para tareas de vigilancia.

Estos nuevos usos que se les dan a los drones hacen que surjan variantes, cada una adecuada a su posterior uso. Uno de los factores más importantes en el diseño de los drones es la selección de los materiales utilizados, ya que debe tener las propiedades adecuadas en función al trabajo y a las condiciones a las que se va a someter. Uno de los factores más importantes es el precio del material, ya que el fabricante debe siempre obtener beneficios, algo que no ocurrirá si se utiliza un material de uso militar para la fabricación de un dron ultraeconómico normalmente usado por niños.

En primer lugar, hemos hecho un análisis sobre cuales serían los materiales más adecuados para la fabricación de un dron de uso civil ultraeconómico. Introdujimos en el software que los parámetros más importantes para esta variante eran, un bajo precio y una baja densidad. Al observar la gráfica nos damos cuenta de que el mejor material para un dron de este tipo es una espuma polimérica, un material que probablemente nunca hubiésemos usado sin la realización de este análisis. De las 6 espumas poliméricas que comparamos, la clara ganadora es la espuma polimérica flexible (VLD), ya que es la más ligera y barata. La ligereza de este material hace que podamos usar un motor de menor potencia, con lo que ahorraríamos aún más. Esta espuma, es probablemente la que peores propiedades mecánicas tenga, por lo tanto, igual nos es conveniente la selección de otra de ellas con el fin de mejorar la calidad del producto, aunque obtengamos un menor beneficio. También se analizan dos

maderas, aunque su resistencia a ciertas condiciones ambientales hace que pierdan peso en relación con las espumas.

Tras este primer dron, analizamos otro tipo de dron de mejor calidad. En este análisis tenemos en cuenta las propiedades mecánicas del material como la dureza, resistencia a la fatiga, tensión de rotura. También tenemos en cuenta la densidad y el precio. Tras seleccionar los valores entre los que queremos situar esas propiedades, encontramos que los mejores materiales para la fabricación de estos drones son las fibras de vidrio y de carbono.

Estos materiales ofrecen unas propiedades mecánicas excelentes a un precio no demasiado alto. Si tuviésemos que seleccionar una de las fibras, yo me quedaría con la fibra de carbón HS, ya que es bastante más barata que la fibra de carbón HM y ofrece unas propiedades muy similares.

Por último, hemos analizado drones de uso militar. Los límites que le ponemos a las propiedades mecánicas los hemos puesto bastante altos, para que el programa seleccione los materiales con las mejores propiedades físicas sin ninguna restricción. También se ha seleccionado que no haya límite en el precio. Los materiales que cumplen estos exigentes límites de propiedades mecánicas son tan solo dos: nanotubos de carbono y el grafeno. Estos dos materiales son excesivamente caros, por lo que su uso solo puede ser pagado por grandes multinacionales y por gobiernos para uso militar. Fabricar un dron de este material es casi imposible por su precio, pero se puede añadir un pequeño porcentaje que mejora bastante las propiedades del material usado.

En este trabajo se puede observar que todos los materiales son buenos para la fabricación de drones, pero debes tener claro para que tipo de dron sirve cada material. Por todo esto hay que saber cuáles son las propiedades que debería tener cada material y comprender su influencia en el diseño. Como hemos comprobado, los drones están muy presentes en la actualidad, pero lo estarán más en el futuro. La ciencia de los materiales y el diseño de drones va de la mano en cierto sentido, por lo que un avance o descubrimiento de algún nuevo material puede suponer un cambio significativo en el futuro de los drones.



## 6. FUENTES

[C] Información obtenida del software informático CES Edupack 2019

[1] <http://eldrone.es/que-es-un-drone/>

[2] <https://definicion.de/drone/>

[3] <http://fdra-aereo.blogspot.com/2019/06/el-primer-bombardeo-aereo-de-la.html>

[4] <http://eldrone.es/historia-de-los-drones/>

[5] <https://www.lavanguardia.com/historiayvida/historia-contemporanea/20180705/47311066203/10-momentos-clave-en-la-historia-de-los-drones.html>

[6] <https://hemav.com/el-origen-y-la-historia-de-los-drones/>

[7] [http://oa.upm.es/40803/1/INVE\\_MEM\\_2015\\_203893.pdf](http://oa.upm.es/40803/1/INVE_MEM_2015_203893.pdf)

[8] [http://www.ctie.monash.edu.au/hargrave/rpav\\_britain.html](http://www.ctie.monash.edu.au/hargrave/rpav_britain.html)

[9] <https://www.dehavillandmuseum.co.uk/aircraft/de-havilland-dh82b-queen-bee/>

[10] <https://actualidad.rt.com/actualidad/view/80396-vehiculos-aereos-tripulados-hitos-historicos>

[11] [https://www.ecured.cu/Fieseler\\_Fi\\_103](https://www.ecured.cu/Fieseler_Fi_103)

[12] <https://www.telam.com.ar/notas/201406/66983-alemania-normandia-adolf-hitler-aniversario-cohetes-v1.php>

[13] [https://www.militaryfactory.com/aircraft/detail.asp?aircraft\\_id=331](https://www.militaryfactory.com/aircraft/detail.asp?aircraft_id=331)

[14] [http://www.ctie.monash.edu.au/hargrave/rpav\\_radioplane4.html](http://www.ctie.monash.edu.au/hargrave/rpav_radioplane4.html)

[15] <http://www.designation-systems.net/dusrm/app1/bq-4.html>

[16]

[https://web.archive.org/web/20110807123337/http://www.vectorsite.net/twuav\\_01.html#m5](https://web.archive.org/web/20110807123337/http://www.vectorsite.net/twuav_01.html#m5)

[17] [https://airandspace.si.edu/collection-objects/gyrodyne-qh-50c-drone-anti-submarine-helicopter-dash/nasm\\_A20090023000](https://airandspace.si.edu/collection-objects/gyrodyne-qh-50c-drone-anti-submarine-helicopter-dash/nasm_A20090023000)

[18] <https://www.net-maquettes.com/es/pictures/gyrodyne-qh-50-dash/>

[19] <https://esenziale.com/tecnologia/partes-drone/>

[20] <https://dronprofesional.com/blog/cuales-son-las-partes-de-un-dron/>

[21] <https://www.areatecnologia.com/EL%20MOTOR%20ELECTRICO.htm>

[22] <http://guide.directindustry.com/es/que-motor-electrico-elegir/>

[23] <https://filmora.wondershare.com/es/drones/drone-motors.html>

[24]

[https://repository.eia.edu.co/bitstream/11190/2268/1/OchoaPedro\\_2018\\_DesarrolloBancoPruebas.pdf](https://repository.eia.edu.co/bitstream/11190/2268/1/OchoaPedro_2018_DesarrolloBancoPruebas.pdf)

[25] <https://www.intechopen.com/books/recent-research-in-polymerization/thermoplastic-foams-processing-manufacturing-and-characterization>