

Martínez V. Carlos R.

Normas y criterios para la selección de materiales

Martínez V. Carlos R.
al20441517@ite.edu.mx

RESUMEN: Se describe un enfoque sistemático y orientado al diseño para la selección de materiales, que consta de cinco pasos: 1) establecer los requisitos de diseño, 2) selección de materiales, 3) clasificación, 4) investigación de candidatos específicos y 5) aplicación de restricciones culturales específicas en el proceso de selección. En el núcleo de este enfoque está la definición de índices de rendimiento (es decir, combinaciones particulares de propiedades de materiales que representan el rendimiento de un componente dado) junto con gráficos de propiedades de materiales. Estos gráficos de selección de materiales, que trazan una propiedad contra otra, proporcionan un entorno gráfico potente donde se pueden aplicar y analizar criterios de selección cuantitativos, tales como los capturados en los índices de rendimiento, y hacer compensaciones entre objetivos conflictivos. Encontrar un material con un alto valor de estos índices maximiza el rendimiento del componente. Se examinan ejemplos específicos relacionados con la industria aeroespacial (cuchillas de motor, recipientes a presión), tanto a temperatura ambiente como a alta temperatura (donde los efectos dependientes del tiempo son importantes) para demostrar la metodología. La discusión luego se centra en materiales híbridos/ingenieriles y cómo estos pueden ser adaptados eficazmente para llenar vacíos en el espacio de propiedades de los materiales, permitiendo así la innovación y los aumentos en el rendimiento en comparación con los materiales monolíticos. Finalmente, se presenta una breve discusión sobre la gestión de los datos necesarios para la selección de materiales, incluyendo la recopilación, análisis, despliegue, cuestiones de mantenimiento y se realiza un estudio de caso de ejemplos para decidir cuáles materiales resultan óptimos para la construcción de planeadores sin propulsión.

PALABRAS CLAVE: Consideraciones modales, Diagrama de Ashby, Grafeno, Fuselaje, Empenaje, Envergadura,

ABSTRACT. A systematic, design-oriented approach to materials selection is described, consisting of five steps: 1) establishing design requirements, 2) material selection, 3) ranking, 4) investigating specific candidates, and 5) applying specific cultural constraints in the selection process. At the core of this approach is the definition of performance indices (i.e., particular combinations of material properties that represent the performance of a given component) along with material property charts. These material selection graphs, which plot one property against another, provide a powerful

graphical environment where quantitative selection criteria, such as those captured in the performance indices, can be applied and analyzed and trade-offs made between conflicting targets. Finding a material with a high value of these indices maximizes the performance of the component. Two specific examples related to the aerospace industry (engine blades and pressure vessels) are examined, both at room temperature and at high temperature (where time-dependent effects are important) to demonstrate the methodology. The discussion then turns to hybrid/engineered materials and how these can be effectively tailored to fill gaps in the materials property space, thus enabling innovation and performance gains compared to monolithic materials. Finally, a brief discussion is presented on the management of the data required for materials selection, including collection, analysis, deployment, and maintenance issues and a case study to decide the optimal materials for the construction of non-powered gliders.

Keywords. Ashby diagram, Empanage, Fuselage, Graphene, Modal considerations, Span.

1 INTRODUCCIÓN

La importancia de la reducción de peso en los sistemas aeroespaciales ha sido un factor clave desde el principio. En consecuencia, el uso de nuevos materiales, por ejemplo, discos de turbina de aleación dual y materiales compuestos (basados en cerámica, metálicos y poliméricos) y nuevos tipos de conceptos estructurales, particularmente del tipo de pared delgada (dimensionados principalmente en base al pandeo) han dominado. Desde la perspectiva de un diseñador, desde un punto de vista industrial, la función principal de una estructura aeronáutica es transmitir fuerzas a través del espacio con el menor peso y costo posible para el cliente. Normalmente, la tarea del diseñador es equilibrar una variedad de requisitos funcionales (por ejemplo, tipos de condiciones de carga (tensión, compresión, flexión, vibración, cíclica, etc.)) con restricciones (fabricabilidad, límites geométricos, aspectos ambientales, mantenibilidad, por nombrar algunos) para llegar a la elección "óptima" del concepto estructural y la selección de materiales para un peso y/o costo dado.

Esta tarea puede ser a menudo desalentadora tanto para los practicantes inexpertos como para los experimentados debido a la amplia gama de opciones disponibles. Además, dependiendo de la formación del ingeniero, por ejemplo, un profesional orientado a los

materiales frente a uno orientado a la mecánica, su respuesta a la pregunta de diseñar para una deflexión adecuada puede ser bastante diferente. La persona orientada a los materiales típicamente pensaría que necesita un material con alta rigidez (es decir, módulo de Young (E)), mientras que la persona orientada a las estructuras naturalmente pensaría en alta rigidez (por ejemplo, $E \cdot I$, el producto del módulo de Young y el momento de inercia (I) dado un haz en flexión); el primero está orientado a las propiedades del material y el otro está orientado al rendimiento. Esta diversidad de perspectivas es precisamente la razón por la que se requiere una metodología robusta y sistemática para conectar material y aplicación, como se presentará e ilustrará en este artículo.

2 ENFOQUE SISTEMÁTICO PARA LA SELECCIÓN DE MATERIALES

2.1 METODOLOGÍA

El enfoque sistemático para la selección de materiales incluye los siguientes pasos:

2.1.1. TRADUCCIÓN

Este primer paso implica traducir los requisitos de diseño en términos claros de desempeño que puedan ser cumplidos por los materiales. Se identifican las funciones, restricciones y objetivos del diseño. Las funciones definen qué debe hacer el componente, las restricciones definen los límites dentro de los cuales debe operar el componente y por su lado, los objetivos definen lo que se desea maximizar o minimizar (por ejemplo, peso, costo, impacto ambiental).

2.1.2. FILTRADO/RECHAZADO

En esta etapa, se utilizan criterios de exclusión para eliminar materiales que no cumplen con las restricciones críticas del diseño. Se evalúan propiedades como el límite elástico, la densidad, la resistencia a la corrosión, entre otras.

2.1.3. CLASIFICACIÓN

Los materiales que pasan el filtrado inicial se clasifican según índices de rendimiento que combinan varias propiedades materiales en un solo valor numérico que puede ser utilizado para comparar el rendimiento de los materiales en la aplicación específica de interés.

2.1.4. INVESTIGACIÓN

Los materiales que quedan después de la clasificación inicial se investigan a fondo para verificar que cumplan con todos los requisitos del diseño, incluidos aspectos prácticos como disponibilidad, costo y consideraciones ambientales.

2.1.5. RESTRICCIONES CULTURALES ESPECÍFICAS

Finalmente, se aplican restricciones específicas, culturales o de la organización, tales como preferencias corporativas, compatibilidad con tecnologías existentes y regulaciones específicas.

2.2 ÍNDICES DE RENDIMIENTO DE MATERIALES

Los índices de rendimiento de materiales son combinaciones de propiedades de materiales que reflejan el rendimiento de un componente dado. Estos índices permiten la comparación objetiva entre diferentes materiales y facilitan la toma de decisiones informadas para maximizar el rendimiento del componente.

Las ecuaciones que definen los índices de rendimiento se derivan de la función y las restricciones del diseño. Por ejemplo, para minimizar el peso de una viga sometida a flexión, el índice de rendimiento M puede definirse como:

$$M = \frac{E}{\rho} \quad \text{Ec. (1)}$$

donde:

E = Módulo de Young
 ρ = la densidad del material.

Para aplicaciones que requieren alta resistencia a la tracción y baja densidad, el índice de rendimiento podría ser:

$$M = \frac{\sigma_y}{\rho} \quad \text{Ec. (2)}$$

Donde: σ_y es el límite elástico del material.

2.3 GRÁFICOS DE PROPIEDADES DE MATERIALES

Los gráficos de propiedades de materiales trazan una propiedad contra otra y proporcionan una herramienta visual poderosa para aplicar y analizar criterios de selección cuantitativos. Estos gráficos ayudan a identificar materiales que ofrecen un rendimiento óptimo para los requisitos específicos de la aplicación. El diagrama de Ashby es una representación típica utilizado en esta fase.

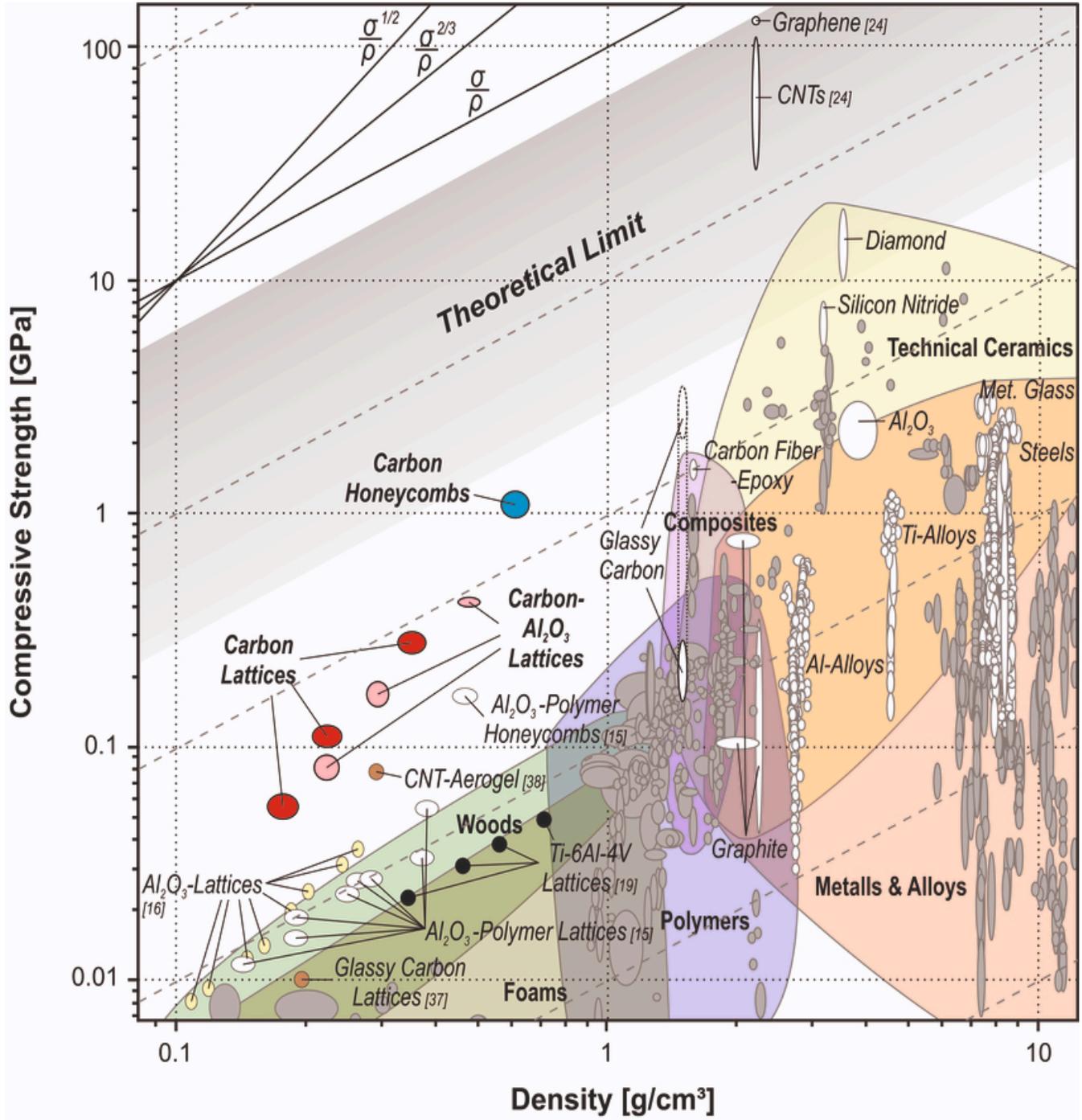


Figura 1. Diagrama de Ashby que muestra la relación entre dureza estructural (módulo de Young) respecto a la densidad (g/cm^3) para varios materiales

Material	Densidad	Módulo de Young	Límite elástico
Aleación de Titanio	4500	110	950
Aleación de aluminio	2700	70	450
Compuesto CFRP	1600	140	1200

Tabla 1. Propiedades Típicas de Materiales para Aplicaciones Aeroespaciales. Deducido de la interpretación de diagramas de Ashby.



Figura 2. Envergadura de aleación de carbono

2.4 ELECCIÓN DE MATERIALES PARA ESTUDIOS DE CASO

2.4.1 Cuchillas de Motor

Si quisiéramos estudiar, por ejemplo, las cuchillas de motor deben funcionar en condiciones de alta temperatura y soportar cargas cíclicas. Se seleccionan materiales que ofrecen alta resistencia a la temperatura, baja densidad y alta resistencia a la fatiga.

$$M = \frac{\sigma_{fatiga}}{\rho} \quad \text{Ec. (3)}$$

donde: σ_{fatiga} es el límite elástico del material

2.4.2 Recipientes a Presión

Los recipientes a presión deben soportar altas presiones internas sin fallar. Los materiales seleccionados deben tener alta resistencia a la tracción, buena resistencia a la corrosión y ser adecuados para procesos de fabricación específicos.

2.4.3 Desarrollo de prototipo de planeador

Como ya se ha mencionado, la resistencia estructural y el peso son factores esenciales para el éxito del diseño de un planeador. Ambos parámetros tienen en común el material con el que se planea construir la aeronave de acuerdo al diagrama de Ashby de la Fig. (1). Afortunadamente, los materiales modernos han eliminado en gran medida muchos de los problemas estructurales asociados a las cuestiones mencionadas anteriormente.

Sin embargo, a pesar de la disponibilidad de estos materiales modernos, hay que seguir prestando especial atención a los distintos componentes de la aeronave.

Por este motivo, a menudo se emplean diferentes materiales en función del objetivo de estos componentes. Normalmente, el fuselaje se construye con un material relativamente pesado y de alta resistencia, mientras que las alas y el empenaje suelen construirse con un material mucho más ligero y modular. Además, hay otros aspectos que también influyen en la selección del material: la fabricabilidad, la asequibilidad y la facilidad de mantenimiento. Estas propiedades suelen descartar el uso de métodos de construcción que requieren mucha mano de obra y materiales caros como el titanio y las aleaciones exóticas de aluminio. Sin embargo, con la llegada de la fibra de carbono, estos problemas pueden paliarse a menudo. Además, la fibra de carbono permite desarrollar configuraciones inusuales de alas y fuselajes que no son fáciles de conseguir con otros materiales.

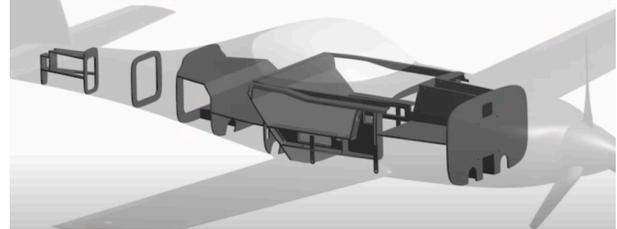


Figura 3. Fuselaje de aleación de carbono

Además de las consideraciones de tensión e impacto, las consideraciones modales también son de particular importancia. Aunque no son tan evidentes en el funcionamiento general como las tensiones de carga, las inestabilidades aeroelásticas son extremadamente peligrosas. En caso de que se produzcan, la estructura puede desintegrarse en cuestión de segundos. Además, los efectos aerodinámicos negativos asociados al aleteo del ala pueden hacer que las superficies de control resulten ineficaces. Los métodos para eliminar este comportamiento aeroelástico incluyen una elevada rigidez del material y la limitación de la distancia entre los centros de masas alineándolos con el fuselaje. Por lo tanto, en el diseño de cualquier aeronave, especialmente en el caso de un prototipo, es necesario realizar un análisis modal.

En cuanto al tipo de material, puede recomendarse que el fuselaje y la cola se construyan con fibra de vidrio y la estructura del ala con espuma de alto impacto. La selección de estos materiales se basó en su elevada relación resistencia/peso, así como en su facilidad de fabricación.

Así que a partir de esta tabla se puede ver claramente que añadir fibra de carbono al diseño de un parapente tiene sentido. Ahora bien, hay muchos otros factores a tener en cuenta y hay que estudiar realmente los detalles para obtener las respuestas correctas.

3 SELECCIÓN AVANZADA

3.1 MATERIALES PARA APLICACIONES DE ALTA TEMPERATURA

En aplicaciones de alta temperatura, es crucial seleccionar materiales que mantengan sus propiedades mecánicas a temperaturas elevadas. Se consideran factores como la temperatura máxima y mínima de servicio, la resistencia a la fluencia y la estabilidad térmica.

3.2 DISEÑO PARA FLUENCIA

El diseño para condiciones de fluencia implica el uso de ecuaciones constitutivas para la deflexión por fluencia, la fractura por fluencia y la relajación por fluencia. Estos modelos ayudan a predecir el comportamiento del material bajo cargas sostenidas a alta temperatura y a seleccionar materiales adecuados para estas condiciones.

La ecuación general para la tasa de fluencia ϵ puede ser expresada como:

$$\epsilon = A\sigma^n e^{-\frac{Q}{RT}} \quad \text{Ec. (4)}$$

donde:

- A = Constante de material,
- σ = Tensión aplicada,
- n = Exponente de tensión,
- Q = Energía de activación para la fluencia,
- R = Constante de los gases ideales.
- T = temperatura absoluta.

3.3 MATERIALES INGENIERILES

Los materiales ingenieriles, como los materiales compuestos y los materiales híbridos, pueden ser diseñados para llenar vacíos en el espacio de propiedades de los materiales, permitiendo innovaciones y mejoras en el rendimiento en comparación con los materiales monolíticos. Por ejemplo, los compuestos de matriz metálica de aluminio (MMC) y las estructuras de celosía ofrecen combinaciones únicas de propiedades mecánicas, térmicas y eléctricas que pueden ser aprovechadas para aplicaciones específicas.

4. CUESTIONES DE DATOS

La gestión de los datos necesarios para la selección de materiales incluye la recopilación, análisis, despliegue y mantenimiento de los datos. Es fundamental garantizar que los datos sean precisos, actualizados y accesibles para los diseñadores e ingenieros involucrados en el proceso de selección de materiales.

5. CONCLUSIONES

Las normas y criterios selección de materiales tanto en la industria como para sistemas aeronáuticos y aeroespaciales es un proceso complejo que requiere un enfoque sistemático y basado en el diseño. La utilización de índices de rendimiento y gráficos de propiedades de materiales facilita la comparación objetiva y la toma de decisiones informadas. Los avances en materiales ingenieriles y la gestión eficiente de los datos son esenciales para impulsar la innovación y mejorar el rendimiento de los sistemas aeroespaciales.

En vista a futuro como vimos con materiales como las fibras de carbono existen materiales exóticos en los que se están realizando avances significativos y podrían tener aplicaciones aeronáuticas una de ellos es el grafeno el cual de acuerdo con la Fig. 1 del diagrama de Ashby sería un candidato decente para usarse en aeronaves además de ser poseer conductividad eléctrica.

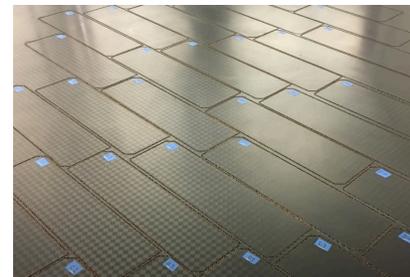


Figura 3. Recubrimiento de grafeno

<https://www.thegraphenecouncil.org/blogpost/1501180/307471/World-s-First-Graphene-Skinned-Plane>.

De hecho, ya hay equipos que trabajan y desarrollan planeadores de grafeno



Fig. 4 Primer planeador recubierto de grafeno

6. AGRADECIMIENTOS

El equipo de investigación expresa sus agradecimientos a:

- **M.C. Mónica Rodríguez Rivas**, Maestra en ciencias y docente del instituto tecnológico de Ensenada, por su paciencia y asesoramiento en el presente artículo de final de asignatura.
- Los directivos del departamento de Electricidad y Electrónica y en particular a los del Programa de Ingeniería Mecatrónica, así como a todos aquellos que fomentaron la especialidad en industria, ciencia y tecnología aeroespacial del Instituto Tecnológico de Ensenada.
- La Comisión Nacional de Ciencia y Tecnología
- La Fundación Carlos Elio Zondo I.A.P.
- La Fundación Telmex

7. REFERENCIAS

- [1] GK. Krempetz, "Carbon Fiber Facts," *AMA Glider*, 2013. Link: <https://amaglider.com/?p=view&a=carbon-fiber-facts>.
- [2] H. Khalil, "Nonlinear Systems", 2nd. ed., Prentice Hall, NJ, pp. 50-56, 1996.
- [3] M. Ashby, D. Cebon. Materials selection in mechanical design. *Journal de Physique IV Proceedings*, 1993, 03 (C7), pp.C7-1-C7-9. 10.1051/jp4:1993701. jpa-00251707.
- [4] Ashby, M.F., 2016. *Materials Selection in Mechanical Design*, fifth ed. Oxford, UK: Butterworth Heinemann.
- [5] Co
- [6] Shercliff, H. R. (2016). *Elastic structures in design*. In *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*. Elsevier. doi:10.1016/b978-0-12-803581-8.02944-1
- [7] Vaidya, B. "Juno: World's first graphene skinned plane." *Inceptive Mind*, 15 Aug. 2018, Disponible en: