

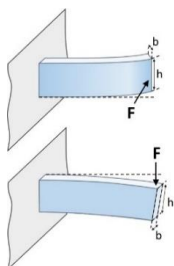
## 1. Selección de materiales en el diseño

El rendimiento mecánico es importante para muchos productos y ha de considerarse en su diseño. Muchas aplicaciones requieren una elevada rigidez y resistencia específica, tradicionalmente otorgadas por algún tipo de aleación metálica. Además, los metales poseen una resistencia a fractura y a la temperatura muy atractivas. Para ciertas aplicaciones hay polímeros con propiedades más competentes que esas aleaciones, especialmente en términos de coste, peso y resistencia a la corrosión. En este caso práctico, nos centraremos en materiales para una **espada ligera de motosierra**, en la que todas las propiedades mencionadas son importantes y han de tenerse en cuenta en el diseño.



La selección sistemática materiales en "Ashby et al." implica identificar la *Función*, los *Objetivos* y las *Restricciones* para el diseño. Es vital determinar qué propiedades mecánicas son clave para el rendimiento. La espada debe soportar fuerzas tanto en la dirección del corte como en direcciones perpendiculares. Esto resulta en fuerzas de flexión sobre la espada. Dado que la espada debe de ser suficientemente resistente, la resistencia, será uno de los parámetros cruciales. Sin embargo, esta propiedad no es la que limita el rendimiento. Como en la mayoría del equipamiento para deportes y carreras (esquí, raquetas, bicicletas, etc.), la *rigidez* es la propiedad limitante. Nuestro caso práctico resalta la rigidez y la masa.

## 2. Cómo abordar el problema



En CES EduPack, la espada se puede comparar mecánicamente a una viga con un extremo fijo sometido a tensión por fuerzas horizontales y verticales, tal como se muestra en la imagen. Ahora, debemos especificar la función, las restricciones y el objetivo de la selección.

**Función:** Viga de longitud L fijada en un extremo.

Las restricciones mecánicas que suponen la rigidez de flexión pueden ser utilizadas para eliminar un parámetro libre de diseño, lo que permite que la selección dependa únicamente de las propiedades del material.

**Restricciones:** Rigidez a flexión  $> S^*$  (en ambas direcciones).

Este límite inferior en S nos da una altura mínima de la espada:

$$\text{Vertical: } S = \frac{F}{\delta} = \frac{CEI}{L^3} = \frac{CE b^3 h}{12 L^3} \quad \boxed{h = \frac{12SL^3}{CEb^3}}$$

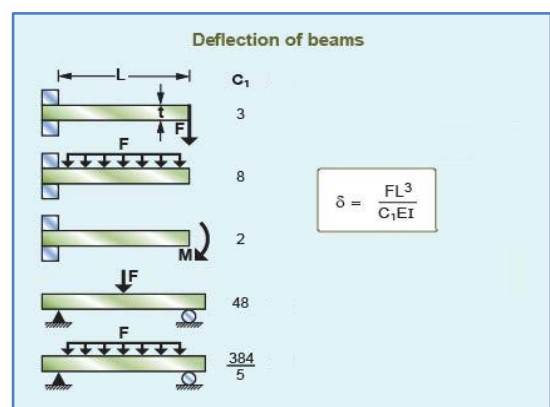
$$\text{Horizontal: } S = \frac{F}{\delta} = \frac{CEI}{L^3} = \frac{CE bh^3}{12 L^3} \quad \boxed{h = \left(\frac{12SL^3}{CEb}\right)^{1/3}}$$

Donde:

m = masa  
 $\rho$  = densidad  
 S = rigidez (F/ $\delta$ )  
 $\delta$  = deflexión

En esta viga:  $\delta = FL^3/CEI$   
 C = constante (aquí, entre 3 y 8)  
 E = Módulo de Young  
 I = Segundo momento de área  
 ( $I = bh^3/12 \uparrow$  or  $b^3h/12 \leftrightarrow$ )

La constante C varía según se apliquen cargas puntuales o distribuidas (o combinaciones de ambas) en la viga. Aun así, las constantes no afectarán a la selección del material basándonos en sus propiedades.



Otras restricciones de diseño son:

- *Temperatura de trabajo mín/máx:* **-40 °C / +110 °C**
- *Resistencia al agua (dulce):* **excelente**
- *Resistencia al aceite lubricante:* **excelente**
- *Resistencia al petróleo (gasolina):* **excelente**
- *Propiedades mecánicas:* **analizadas por separado**

Para obtener el Índice de Rendimiento, sustituimos  $h$  (altura de la espada) por cada una de las restricciones en la función de la viga, eliminando así este parámetro libre de diseño (el ancho, por otro lado, va fijado por  $b$ ).

**Objetivo:** Minimizar la masa,  $m = A L \rho = b h L \rho$

Esto genera dos índices de rendimiento:

$$\text{Vertical: } m = L^2 \left( \frac{b^2 12 S^*}{C} \right)^{1/3} \left( \frac{\rho}{E^{1/3}} \right)$$

$$\text{Horizontal: } m = \left( \frac{12 S^* L^4}{C b^2} \right) \left( \frac{\rho}{E} \right)$$

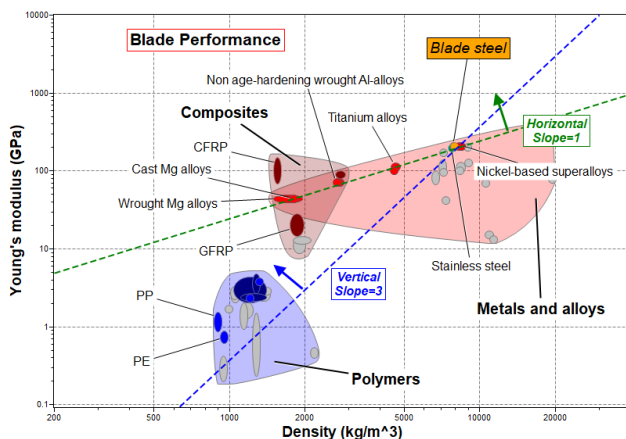
Ambas expresiones se han organizado de manera que las propiedades del material estén al final. La convención, siguiendo la metodología básica de selección de Ashby, define el *índice de material* (índice de rendimiento) como la inversa de estas ecuaciones.

$$\text{Obtenemos así: } M_V = \left( \frac{E^{1/3}}{\rho} \right) \quad M_H = \left( \frac{E}{\rho} \right)$$

Estos corresponden a líneas con pendientes 3 ( $M_V$ ) y 1 ( $M_H$ ), respectivamente, en una gráfica de propiedades  $E$  vs  $\rho$ , tal como se observa en el gráfico más abajo, donde se han añadido estas líneas.

### 3. Comparando el rendimiento

Para comparar las propiedades de un material de espada ya existente con otros posibles candidatos (*benchmarking*), añadimos un registro de referencia al gráfico, que llamaremos “*Acero para espadas*”. El Módulo de Young oscilará entre los 208-216 GPa y la densidad será de unos 7800-7900 kg/m<sup>3</sup> para un acero bajo en carbono, AISI 4140, templado en aceite a 315°C. Este material es similar al utilizado en espadas de motosierra y al *Acero Inoxidable* del Nivel 2 de CES EduPack. Se pueden añadir más datos haciendo clic derecho sobre el gráfico y completando los registros vacíos.

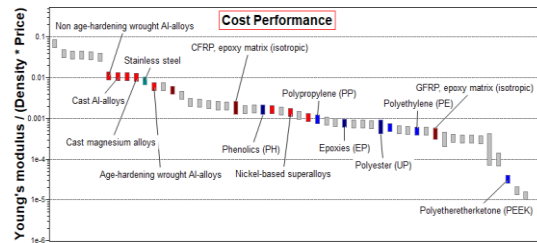


Si añadimos dos rectas de maximización con pendientes 1 y 3, descartamos los materiales que se encuentran bajo el registro de referencia. Si se considera el índice de rendimiento vertical ( $m=3$ ), podemos ver que las aleaciones y superaleaciones con base Níquel, junto con las aleaciones de Ti, Al y Mg, rinden tan bien como el material de referencia. El CFRP presenta incluso mejor. El índice de rendimiento horizontal ( $m=1$ ) muestra que materiales como Ti, Al, Mg y CFRP rinden mejor. El eje vertical es más importante, porque la espada es delgada y más susceptible a la deformación en esa dirección.

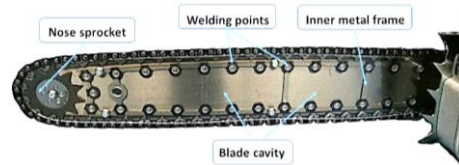
### 4. Verificación

Hasta ahora hemos considerado un material de bajo peso, limitado por su rigidez y teniendo en cuenta la durabilidad. Pero hay otros aspectos que han de tenerse en cuenta, como es el coste. Podemos añadir pues, una segunda etapa de selección. Para un diseño limitado por la rigidez, el índice de rendimiento de coste que debe ser maximizado es:  $M = E / (\rho \cdot \text{cm})$ :

Al considerar la variable coste, las mejores alternativas



son las aleaciones de Al, Mg y acero inoxidable. Es probable que esta consideración influya en gran medida en los materiales usados hoy en día. En las espadas de motosierra reales, la resistencia se debe al diseño estructural. Los diferentes tipos de espadas usadas actualmente difieren en su estructura interna, bien por el relleno de las cavidades, la combinación de materiales o los procesos de fabricación.



### 5. Conclusiones

En este caso práctico industrial, hemos explorado una forma sistemática de entender los materiales utilizados en una espada de motosierra usando CES EduPack. Hemos visto como materiales como Ti, Al, Mg o CFRP pueden mejorar el rendimiento de estas espadas. El diseño ingenieril, sin embargo, siempre comprenderá un balance entre las propiedades de los distintos materiales, costes, procesos de fabricación y grado de innovación.