

Recipiente de Presión Aeroespacial

Claes Fredriksson y Luca Masi
Granta Design, 300 Rustat House, 62 Clifton Rd, Cambridge, CB1 7EG, UK

Primera Publicación en Junio 2016



Contenido

| | |
|---|---|
| 1. 1.Introducción | 2 |
| 2. 2.¿Qué aspecto tienen los recipientes a presión? | 2 |
| 3. 3.¿Cuál es el problema? | 3 |
| 4. 4.Cómo seleccionar materiales aeroespaciales en GRANTA EduPack | 4 |
| Función: | 5 |
| Limitaciones: | 5 |
| Objetivos: | 5 |
| 5. 5.Índices de materiales para presión y seguridad | 7 |
| 6. 6.Resultado | 8 |
| 7. 7.Análisis y verificación de la realidad | 8 |
| 8. 8.¿Qué aportó GRANTA EduPack? | 9 |
| Referencias | 9 |

Resumen

Este caso práctico muestra cómo GRANTA EduPack ayuda en la selección de materiales para recipientes a presión ligeros y seguros en aplicaciones aeroespaciales. Mostramos cómo minimizar la masa, mientras que el desempeño de seguridad, incluidas propiedades del material, tenacidad y resistencia a bajas temperaturas se maximizan. El caso está inspirado en un artículo presentado por la NASA [1] para los tanques del transbordador espacial y los tanques criogénicos de los cohetes Ariane. GRANTA EduPack permite realizar elecciones de materiales mostrando los pasos del proceso con el fin de enseñar y capacitar. Se trata la capacidad de trazar, comparar y discutir múltiples índices de materiales de forma simultánea. Se han incluido ecuaciones relevantes para facilitar una perspectiva de resistencia/mecánica de los materiales.

1. Introducción

Hay muchos ejemplos de recipientes a presión en aplicaciones aeroespaciales. Las cabinas presurizadas en aviones y naves espaciales, por ejemplo, están expuestas a grandes variaciones de presión, ya que las presiones externas varían desde las condiciones atmosféricas hasta casi cero en el espacio o en altitudes muy elevadas. También hay ejemplos de tanques de gas comprimido que contienen combustibles, creando fuerzas distribuidas desde el interior hacia la pared del contenedor. Todas estas aplicaciones tienen muchos requisitos de diseño para una elección de material óptima, pero una limitación común es que se debe evitar una explosión debido a una fractura rápida.

La seguridad es una prioridad en el diseño de recipientes a presión y esto es particularmente cierto para aplicaciones aeroespaciales. Además, las propiedades mecánicas son siempre consideradas en relación con la masa de los recipientes a presión, ya que esto afecta al alcance y el rendimiento del vehículo. Los recipientes a presión también suelen estar sujetos a grandes cambios de temperatura (y, en tanques criogénicos o espacio, temperaturas de casi 0 K), lo que añade limitaciones para la elección de materiales.



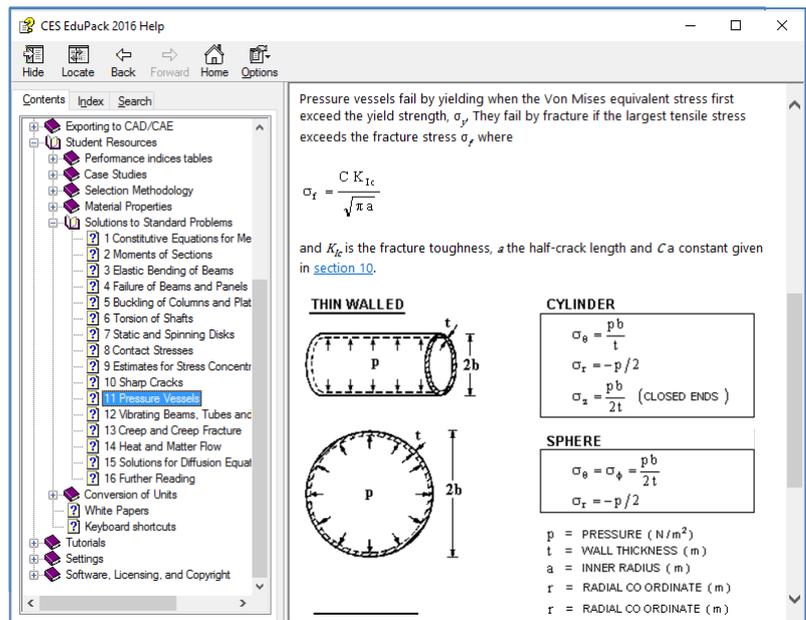
Aplicaciones

- Cabinas de presión de aeronaves
- Orbitadores espaciales
- Tanques de combustible para cohetes (LHX)
- Tanques oxidantes de cohetes (LOX)
- Tanques presurizadores de helio
- Tanques del sistema de control de reacción (RCS)
- Tanques del sistema de maniobra orbital (OMS)
- Sistemas de almacenamiento criogénico (segmento terrestre)

2. ¿Qué aspecto tienen los recipientes a presión?

Los recipientes a presión normalmente se dividen en paredes gruesas y paredes delgadas para derivar las ecuaciones de tensión mecánica. Aquí consideraremos que las formas son cilíndricas (con extremos cerrados) o esféricas, ambas con un radio, R . Mientras que, en una pared gruesa, se debe considerar la variación de la tensión dentro del material, una pared delgada se puede tratar como una membrana, que es una aproximación razonable si el espesor es mucho más pequeño que el radio. Dado que el bajo peso es una consideración importante en todas las aplicaciones aeroespaciales, estamos interesados en los de paredes delgadas. A continuación, se dan las ecuaciones de tensión relevantes para cilindros de pared delgada y recipientes a presión esféricos, respectivamente.

La función AYUDA (HELP) en GRANTA EduPack 2016, ofrece parte de la teoría necesaria para este caso práctico. A través del botón HELP (Student Resources), como se ve a la derecha, se puede acceder a las ecuaciones básicas para la tensión mecánica en recipientes a presión cilíndricos y esféricos. Se encuentran buscando "Pressure Vessels". Como puede verse en las fotos de arriba y en las de la Soyuz a continuación, estas formas son frecuentes en materia aeroespacial. La mayor tensión para ambas formas es a lo largo de la dirección azimutal (Θ).



3. ¿Cuál es el problema?

Si el objetivo principal es minimizar la masa y maximizar el rendimiento, y la seguridad es una restricción de diseño, hay cinco índices de materiales que se pueden visualizar como líneas de índice en la gráfica de propiedades. Esto nos ayudará a explorar el problema.

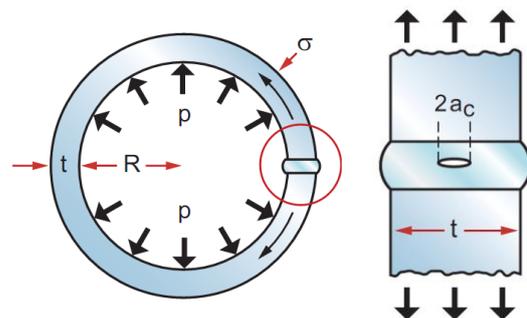
Para minimizar la masa, m , para un cilindro de longitud L con extremos hemisféricos o una esfera:

$$m = 4\pi R^2 t \rho + 2\pi R L t \rho \text{ (cilindro)} \quad \text{ó} \quad m = 4\pi R^2 t \rho \text{ (esfera)} \quad [\text{ecs. 1a y 1b}]$$

Dado que trataremos el espesor como una variable de diseño libre, eliminaremos t para permitir una elección libre del material. A partir de las ecuaciones básicas en la ventana AYUDA mostrada en la parte superior de la página, vemos que la tensión máxima en una pared delgada de un recipiente a presión es:

$$\sigma = \frac{pR}{t} \text{ (cilindro de final cerrado)} \quad \text{ó} \quad \sigma = \frac{pR}{2t} \text{ (esfera)} \quad [\text{ecs. 2a y 2b}]$$

Usando estas ecuaciones en el límite de rotura del material ($\sigma = \sigma_y$), podemos sustituir:



$t = \frac{pR}{\sigma}$ ó $t = \frac{pR}{2\sigma}$ en ecs. 1a y b respectivamente, representando expresiones independientes del grosor:

$$m = 2\pi R^2 p (2R + L) \frac{\rho}{\sigma_y} \text{ (cylinder)} \quad \text{ó} \quad m = 2\pi R^3 p \frac{\rho}{\sigma_y} \text{ (sphere)} \text{ [ecs. 3a y 3b]}$$

Para evitar una rotura rápida (explosión), debemos observar el vínculo entre la tensión en el material y el tamaño crítico de la grieta, ilustrado en la figura anterior.

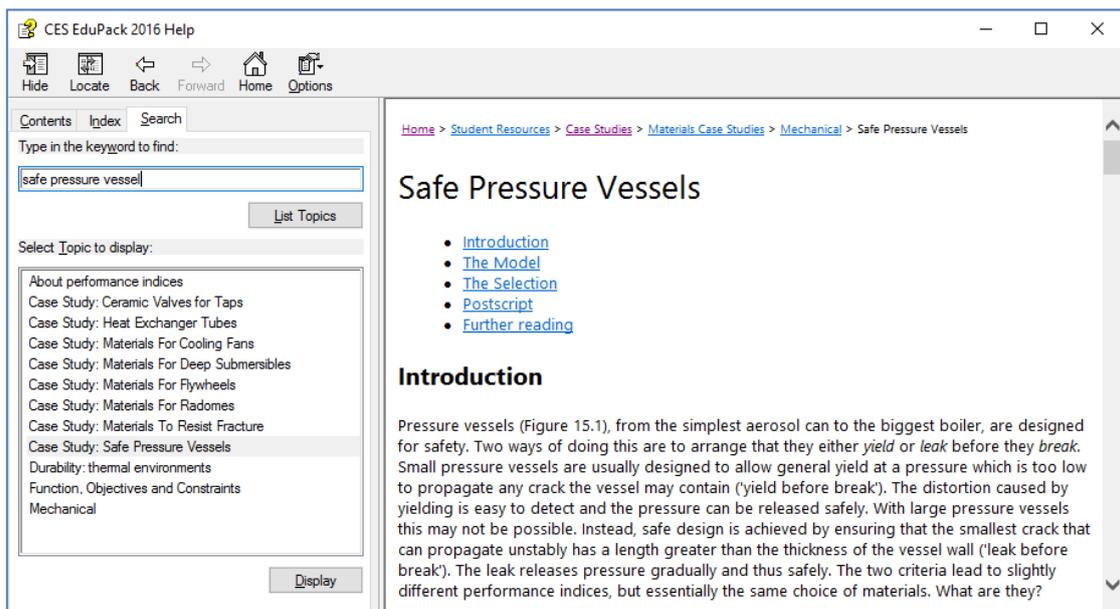
A partir de la mecánica de fracturas [2], sabemos que la tensión necesaria para propagar una grieta es:

$$\sigma = C \frac{K_{Ic}}{\sqrt{\pi a_c}} \quad \text{[ec. 4]}$$

donde K_{Ic} =Tenacidad a la fractura y $C \approx 1$ para grietas pequeñas. Eliminando la tensión mediante la sustitución de las ecs. 2a y b en el límite de rotura del material ($\sigma = \sigma_y$), en ec. 4 nos da los requisitos en la presión para evitar la propagación de grietas:

$$p \leq \frac{t}{R} \frac{K_{Ic}}{\sqrt{\pi a_c}} \text{ (cilindro)} \quad \text{ó} \quad p \leq \frac{2t}{R} \frac{K_{Ic}}{\sqrt{\pi a_c}} \text{ (esfera)} \quad \text{[ecs. 5a y 5b]}$$

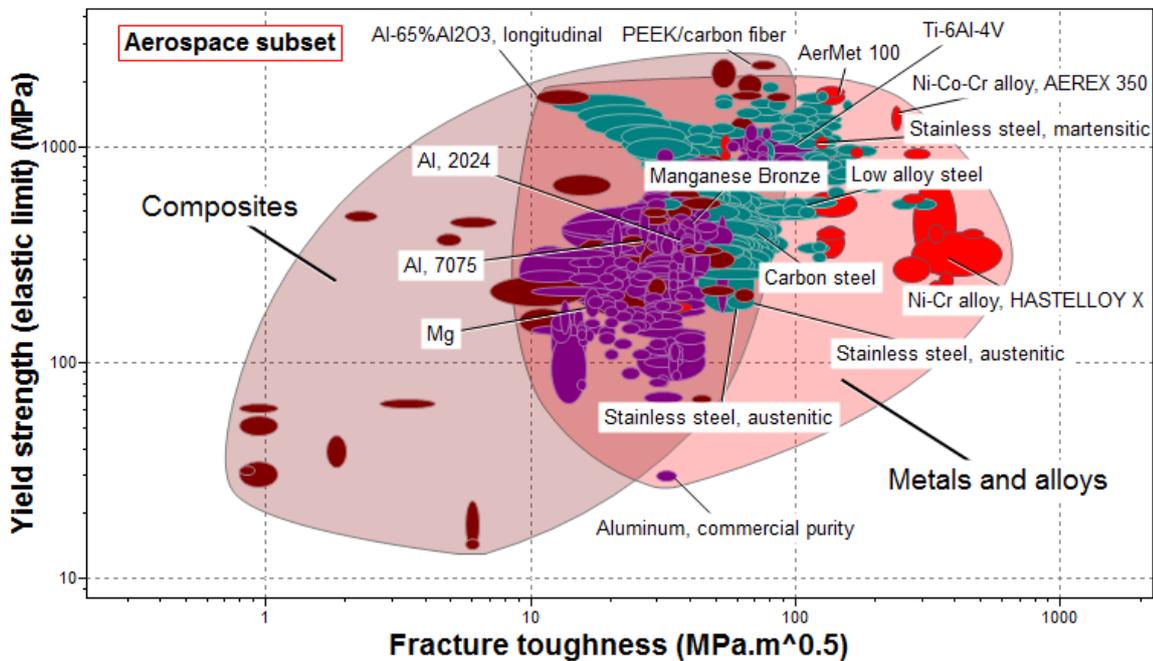
Estas ecuaciones se utilizan a continuación para crear las líneas de índice de material para recipientes a presión seguros. Más antecedentes y detalles sobre la derivación de estos se dan en un caso práctico integrado disponible desde la función HELP de GRANTA EduPack, como se muestra a continuación:



4. Cómo seleccionar materiales aeroespaciales en GRANTA EduPack

Para encontrar materiales candidatos, seguiremos la metodología de selección racional de Ashby et al [3], ilustrada esquemáticamente en el siguiente diagrama. Usaremos el Nivel 3 de la **base de datos Aeroespacial**. La selección se inicia haciendo clic en **Grafico/Seleccionar** en la barra de herramientas principal y seleccionando **Materiales Aeroespaciales**. El resultado, un subconjunto inicial de ~500 materiales. La alta permeabilidad de los gases y un rendimiento pobre a baja temperatura hace que los materiales compuestos sean menos atractivos. Así, algunos tanques están formados por materiales compuestos de alta resistencia que rodean una carcasa metálica para contener la presión. En este caso práctico, nos centraremos en los materiales soldables, que son principalmente aleaciones metálicas.

A continuación, un gráfico de límite elástico vs tenacidad a la fractura para el subconjunto de todos los materiales aeroespaciales. Estas dos propiedades son clave para 4 de nuestros 5 índices de materiales:



Grafica 1: Subconjunto de Materiales Aeroespaciales (GRANTA EduPack)

Función:

Buscamos seleccionar materiales para un recipiente a presión, en una aplicación aeroespacial. La **función** es contener la presión (véanse las ecuaciones 5a y b).

Limitaciones:

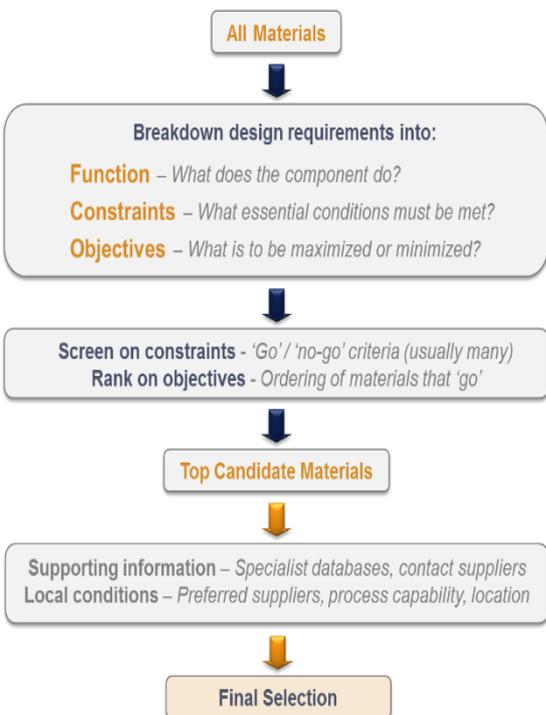
Las restricciones se pueden aplicar en cualquier orden. Aquí, aplicamos primero el subconjunto de materiales aeroespaciales, además de requerir soldabilidad y una temperatura mínima de servicio por debajo del hidrógeno líquido (-253 °C). Tas trazar la gráfica, consideraremos implícitamente dos restricciones de seguridad alternativas.

Lista de limitaciones:

- Solo se consideran Materiales Aeroespaciales
- Debe deformarse plásticamente antes de romperse
- Debe tener fugas antes de romperse
- Los materiales se deben de poder soldarse
- Temperatura mínima de servicio a -260 °C o más frío

Objetivos:

Se considera un *diseño limitado por resistencia*, el principal objetivo es **minimizar la masa** con el espesor como variable de diseño libre. También buscaremos **maximizar la seguridad**.

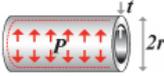
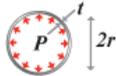


Ambas expresiones anteriores para la masa (ecuaciones 3a y b) producen el mismo índice de material, M1 (consulte la tabla siguiente). Elegiremos maximizar M0 (gráfico de barras 2) para minimizar la masa, lo que significa que M1 se convierte en la resistencia específica:

$$M1 = \sigma_y / \rho$$

En GRANTA EduPack HELP se proporciona una tabla de índice de materiales, como se muestra a continuación:

Strength-limited design at minimum mass

| FUNCTION AND CONSTRAINTS ^{1, 3} | | MAXIMIZE ² | MINIMIZE ² |
|--|---|-----------------------|-----------------------|
| Cylinder with internal pressure |  | σ_y / ρ | ρ / σ_y |
| Sphere with internal pressure |  | σ_y / ρ | ρ / σ_y |

Los materiales aeroespaciales que quedan después de filtrar aquellos que se pueden soldar y mantener una temperatura mínima de servicio inferior a -260 °C se muestran a continuación (con color diferente al gris). Una línea discontinua (M1) indica una propuesta de filtración de materiales relevantes. El precio del material se representa en el eje X, solo para facilitar la comparación. La mayoría de las superaleaciones, como Inconel 718, tienen combinaciones no deseadas de alta densidad y alto precio por kg.

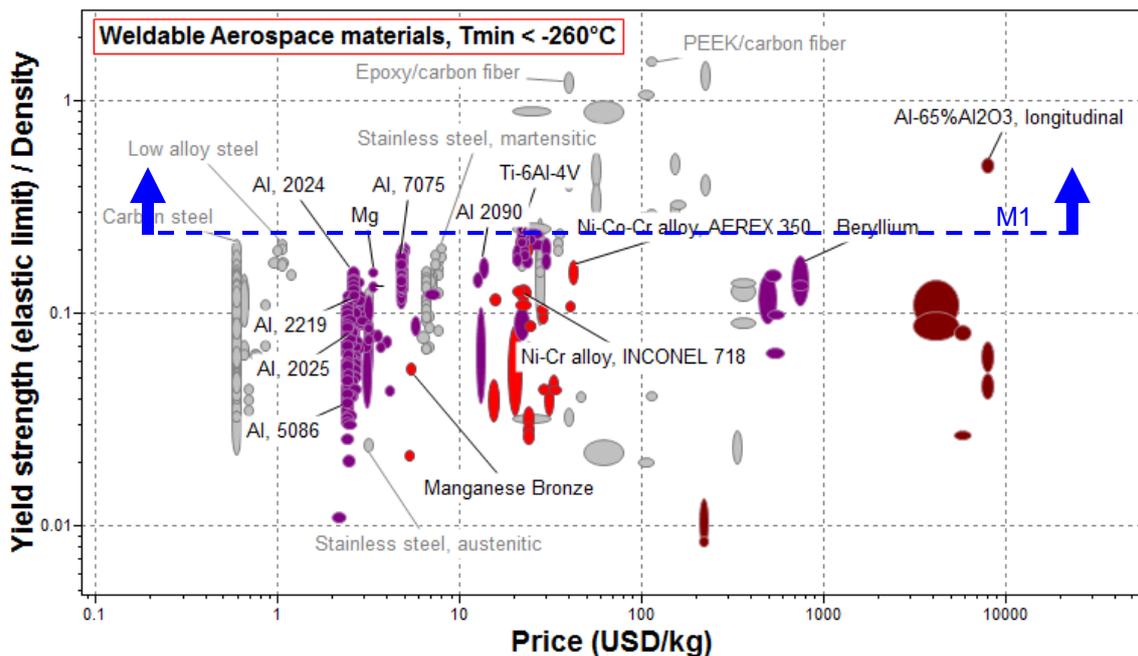


Chart 2: Materiales Aeroespaciales soldables que soportan temperaturas menores a -260°C

5. Índices de materiales para presión y seguridad

En este caso práctico hemos optado por incluir ecuaciones para apoyar una comprensión más profunda y vincular la selección de materiales con la asignatura de resistencia/mecánica de materiales.

Encontrar materiales que maximicen la seguridad está vinculado a la función (contener la presión). Para una geometría dada (R, t, L), el primer índice de material proviene directamente de las ecs. de presión 5a y b:

$$p \leq \frac{t}{R} \frac{K_{Ic}}{\sqrt{\pi a_c}} \text{ (cilindro) } \text{ ó } p \leq \frac{2t}{R} \frac{K_{Ic}}{\sqrt{\pi a_c}} \text{ (esfera)}$$

Independientemente de si la forma es esférica o cilíndrica, el material que permite la máxima presión para un determinado espesor, antes de la fractura rápida, es aquel con mayor *tenacidad a la fractura*.

$$M2=K_{Ic}$$

En el gráfico 3 vemos la línea de índice horizontal M2. A continuación se derivan y representan tres líneas de índice adicionales, M3-M5. Esto se debe a que una max M2 no es garantía contra una rotura rápida.

Para derivar la restricción *de deformación plástica antes de la ruptura*, se puede elevar al cuadrado la ec. 4, lo que lleva a la expresión (aun usamos $C \approx 1$):

$$a_c \leq \frac{C^2}{\pi} \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_y} \right)^2. \quad \text{[ec. 6]}$$

El máximo tamaño de fisura permisible es por lo tanto obtenido para el material con máximo valor:

$$M3=K_{Ic} / \sigma_y$$

Esto permitirá que la presión alcance el límite donde el material comienza a deformarse plásticamente (y por lo tanto la deformación puede ser detectada), antes de que se produzca una fractura rápida.

Si no se puede monitorear el tanque, es mejor dejar que la grieta se propague hasta un valor justo por encima del espesor de la pared, t , creando una pequeña *fuga antes de la rotura*. Entonces: $2a_c \geq t$.

Esto insertado en la ec. 6 y combinado con las ecs 2a o b en el límite elástico del material ($\sigma = \sigma_y$) resulta en:

$$p \leq \frac{2C^2 K_{Ic}^2}{\pi R \sigma_y} \text{ (cilindro) } \text{ ó } p \leq \frac{4C^2 K_{Ic}^2}{\pi R \sigma_y} \text{ (esfera)} \quad \text{[ecs. 7a y b]}$$

Que nos da el siguiente índice de material:

$$M4=K_{Ic}^2 / \sigma_y$$

Ambos índices de material M3 y M4 tienen el límite elástico en el denominador, por lo que un valor pequeño de la resistencia puede ser compatible con un buen desempeño. Pero, esto es una anomalía, pues da lugar a un espesor (ec 1) y por lo tanto un tanque pesado. Por lo tanto, M3 o M4 deben combinarse con un índice basado en la ecuación 1 que minimice el espesor o, de manera equivalente, que maximice el límite elástico. Este índice de material de apoyo se puede trazar directamente como una línea vertical en la Gráfica 3.

$$M5=\sigma_y$$

6. Resultado

El Gráfico 3 muestra los candidatos después de aplicar las correspondientes restricciones (el resto aparecen en color gris). Al aplicar la línea de selección del Gráfico 2, aún tenemos ~100 materiales. Así, aumentamos M2 y M5 hasta tener aleaciones de Al, Ti y algunas superaleaciones restantes. Esto se hace visualmente, ya que no tenemos valores concretos. Las restricciones de seguridad, que resultan en las líneas de índice M3 (pendiente = 1) o M4 (pendiente = 1/2) se pueden aplicar, dando como resultado materiales similares. El índice de fuga antes de la rotura, M4, favorece ligeramente las aleaciones de Ti. Si el Gráfico 3 se realiza en una nueva etapa después del Gráfico 2, se muestran los resultados de ambos combinados.

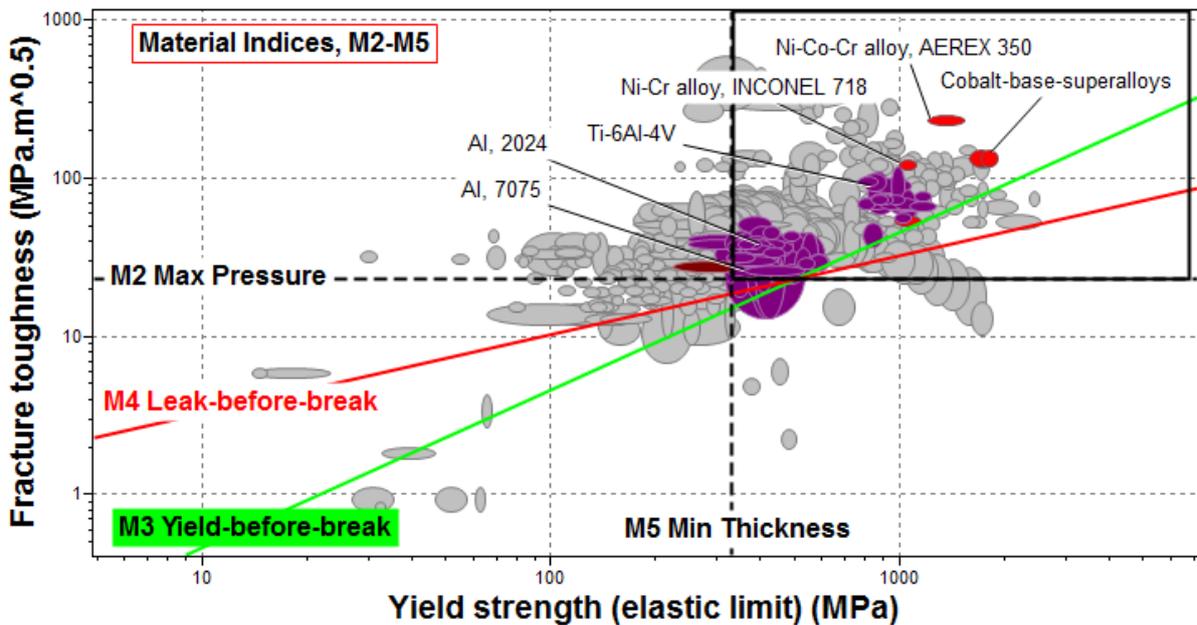
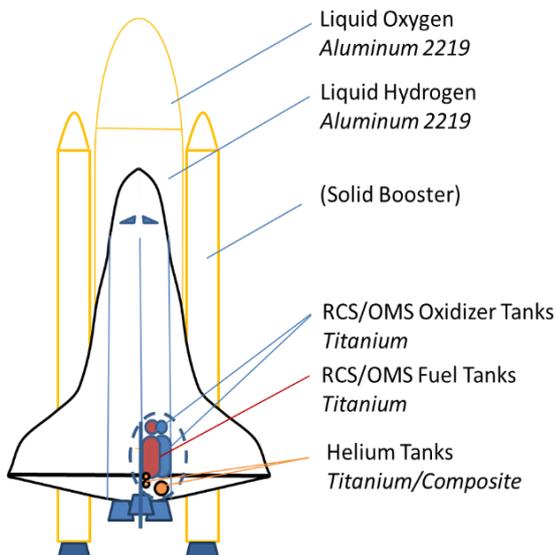


Chart 3: Grafica de propiedades mostrando las cuatro líneas de índice para tenacidad y resistencia.

7. Análisis y verificación de la realidad

Los resultados de la selección (Gráficos 2 y 3) se puede comparar con materiales utilizados en los tanques del transbordador espacial [4] y los tanques criogénicos de los cohetes Ariane 4 y 5 que se muestran aquí.



Fuente: Tanques criogénicos para Aplicaciones Espaciales, Aire Líquido

| Tipo | Diámetro | Altura | Masa cargada | Material |
|--------------------|----------|--------|--------------|----------|
| Ariane 4 H10 | 2.6 m | 8.3 m | 12 t | Al 7020 |
| Ariane 5 EPC | 5.4 m | 23.8 m | 175 t | Al 2219 |
| Ariane 5 ESC-A LOX | 2.6 m | 2.8 m | 12 t | Al 7020 |
| Ariane 5 ESC-A LH2 | 5.4 m | 3 m | 2.7 t | Al 2219 |

Titanio, Al 2219 y Al 7020 se usan en estas dos aplicaciones. El Al 7020 está en la base de datos de Nivel 3, pero muchas aleaciones de las series 2000, 2200 y 7000, así como las aleaciones de Ti, aparecen como mejores candidatos tras la selección.

GRANTA EduPack, combinado con la experiencia docente, sugiere las siguientes conclusiones:

- Si tomamos como objetivo principal minimizar la masa, GRANTA EduPack es capaz de proponer una serie de materiales aeroespaciales que superan las limitaciones de baja temperatura y soldabilidad: las series 2200 y 7000 de Aluminio, aleaciones de titanio y superaleaciones compuestas por níquel y cobalto, aleaciones de berilio y algunos materiales compuestos.
- Aunque minimizar el coste no fue el objetivo principal de este caso práctico, el coste de los materiales considerados en el Gráfico 2 indica una razón por la cual las superaleaciones a base de níquel y cobalto, el compuesto de Al y cerámica o las aleaciones de berilio no son realmente comunes para los recipientes a presión aeroespaciales.
- Si se maximiza la seguridad, siendo la función principal contener la presión, podemos explorar hasta cuatro índices de materiales sin necesidad de valores numéricos, utilizando la herramienta de visualización en un solo gráfico de propiedades. Este gráfico se puede acoplar al resultado de la selección que minimiza la masa.
- Las múltiples líneas de selección son útiles para comparar diferentes requisitos de diseño y discutir conceptos importantes, como la diferencia entre limitaciones y objetivos alternativos, o índices de rendimiento en general.

8. ¿Qué aportó GRANTA EduPack?

Este caso práctico [5] proporciona una plataforma para la discusión de la selección de materiales en un campo muy interesante para la mayoría de los estudiantes: las aplicaciones aeroespaciales. En nuestro caso, queríamos explorar y comparar objetivos, utilizando ecuaciones básicas y métodos visuales.

El software permite investigar este problema sistemáticamente, paso a paso y de forma visual, utilizando dos gráficos de propiedades acoplados y varias líneas de índice. En este caso, también pudimos encontrar información de ayuda a través de la función HELP. Proporcionó ecuaciones de presión básicas y derivaciones de índices de rendimiento relevantes. Los términos de búsqueda utilizados fueron: “pressure vessel” y “safe pressure vessel”.

La base de datos UniversoMateriales nos permite considerar un subconjunto de materiales aeroespaciales y concentrarnos en dos de los objetivos más importantes, típicos de este tipo de aplicaciones: minimización de la masa y desempeño de la presión vinculado a la seguridad.

En este ejemplo, hemos tenido en cuenta algunas limitaciones realistas: seguridad, temperaturas de servicio extremas y procesos de fabricación. Es posible introducir muchas más restricciones, por ejemplo, en términos de valores numéricos, pero esto está más allá del alcance de este estudio.

Referencias

1. Steven M. Arnold, David Cebon and Mike Ashby, “Materials Selection for Aerospace Systems”, NASA/TM-2012-217411 (Technical Memorandum). Disponible online: http://everyspec.com/NASA/NASA-General/NASA_TM-2012-217411_47675/
2. Por ejemplo, see Hellan, K (1985) ‘**Introduction to fracture mechanics**’, McGraw-Hill.
3. Por ejemplo, see Ashby, M.F. (2005) “Materials Selection in Mechanical Design”, 3rd edition, Butterworth Heinemann, Oxford, UK. ISBN 0-7506-6168-2.
4. Luca d’Agostino, **Lecture Notes**, Departamento de Ingeniería Aeroespacial, Universidad de Pisa, Italia.
5. Aquí se encuentran más casos prácticos: <https://www.grantadesign.com/education/teachingresources/>