

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES TÉRMICAS DE LOS MATERIALES

COMPONENTE: ESTUDIAR LAS PROPIEDADES TÉRMICAS DE LOS MATERIALES

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO
MECÁNICO, INGENIERÍA MECÁNICA**

ROBERT STALIN JÁCOME CABASCANGO

robert.jacome@epn.edu.ec

DIRECTOR: Ing. MARIO GERMAN GRANJA RAMÍREZ, MSc.

mario.granja@epn.edu.ec

DMQ, Enero 2024

CERTIFICACIONES

Yo, Robert Stalin Jácome Cabascango declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

Robert Stalin Jácome Cabascango

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por Robert Stalin Jácome Cabascango, bajo mi supervisión.

Ing. Mario Granja MSc.
DIRECTOR

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

Robert Stalin Jácome Cabascango

Mario Germán Granja Ramírez

DEDICATORIA

Este trabajo va dedicado a mis padres Arturo Jácome y María Cabascango que me han apoyado incondicionalmente y me han brindado su paciencia y cariño para terminar esta etapa de mi vida.

A mis hermanos Erick, Armando y Cristina por su apoyo.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mis padres quienes con tanto esfuerzo y sacrificio han luchado para poder darme la educación y ser mi motivación para seguir adelante.

A mis hermanos que me han apoyado bastante durante todos estos años.

Al Ingeniero Granja por darme la oportunidad de hacer este trabajo con él y guiarme durante la realización del mismo.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES.....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	II
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
RESUMEN	IX
ABSTRACT	X
1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Objetivo general	2
1.2 Objetivos específicos	2
1.3 Alcance	2
1.4 Marco teórico	3
1.4.1 Antecedentes.....	3
1.4.2 Temperatura de transición vítrea	3
1.4.3 Temperaturas máximas y mínimas de servicio.....	6
1.4.4 Conductividad térmica	6
1.4.5 Capacidad calorífica específica.....	10
1.4.6 Coeficiente de expansión térmica.....	13
2 Metodología [1].....	16
2.1 Generalidades.....	16
2.2 Requerimiento de diseño	17
2.3 Índice de desempeño generalizado.....	18
2.3.1 Ejemplo de cálculo del índice de desempeño.....	19
2.4 Tabla de índices de desempeño en el Diseño Termo Mecánico.....	21
2.5 Tubería de intercambiador de calor de grado marino, Ejemplo 1.....	23
2.5.1 Requerimientos de diseño en el del intercambiador de calor	23
2.5.2 Selección usando restricciones	24
2.5.3 Clasificación usando objetivos.....	26
2.6 Eje cilíndrico para caja de cambios, Ejemplo 2	30
2.6.1 Requerimientos de diseño para el eje cilíndrico	30
2.6.2 Selección usando restricciones	32

2.6.3	Clasificación usando objetivos.....	32
2.7	Estructura del ala de un avión, Ejemplo 3.....	33
2.7.1	Requerimientos de diseño para la estructura del ala de un avión	33
2.7.2	Selección usando restricciones	34
2.7.3	Clasificación usando objetivos.....	35
3	RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	36
3.1	Resultados	36
3.1.1	Tubería de intercambiador de calor de grado marino, Ejemplo 1	36
3.1.2	Eje cilíndrico para caja de cambios, Ejemplo 2	36
3.1.3	Estructura del ala de un avión, Ejemplo 3	36
3.2	Conclusiones.....	38
3.3	Recomendaciones.....	39
4	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	40
5	ANEXOS.....	41

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Calorimetría diferencial de escaneo	4
Figura 1.2. Distribución de átomos a temperatura absoluta	5
Figura 1.3. Compactación de átomos aleatorios	5
Figura 1.4. Medición de la conductividad térmica.....	7
Figura 1.5. Energía térmica atómica.....	8
Figura 1.6. Transmisión de calor por el movimiento de fonones.	9
Figura 1.7. Medición de capacidad específica.....	11
Figura 1.8. (a)fila de átomos en reposo.(b)ondas longitudinales.(c)ondas transversales .	12
Figura 1.9.La energía térmica.....	12
Figura 1.10. Medición del coeficiente térmico de expansión	13
Figura 1.11. La expansión térmica	15
Figura 2.1. Metodología del caso de estudio.....	17
Figura 2.2. Índice de desempeño	19
Figura 2.3. Intercambiador de calor.....	23
Figura 2.4. Interfaz Ces Edupack	24
Figura 2.5. Selección de materiales utilizando el comando límites/restricciones	24
Figura 2.6. Subconjunto de materiales a seleccionar.....	25
Figura 2.7. Lista de materiales seleccionados para la corrosión.....	25
Figura 2.8. Limitación de diseño por propiedades.....	26
Figura 2.9. Propiedades térmicas utilizadas en la selección de materiales	27
Figura 2.10. Límite de diseño por corrosión	28
Figura 2.11. Selección para el eje x de la gráfica por la oxidación.....	29
Figura 2.12. Selección del componente del eje y por corrosión	29
Figura 2.13. Oxidación Vs Agua salada	30
Figura 2.14. Densidad vs precio	30
Figura 2.15. Eje cilíndrico	31
Figura 2.16. Caja de cambios del Red Bull Racing RB6	32
Figura 2.17. Índice para minimizar el precio vs el índice para minimizar el peso.....	32
Figura 2.18. Posibles materiales para el diseño.....	33
Figura 2.19. Lista de los posibles materiales.....	33
Figura 2.20. Estructura del ala de un avión	34
Figura 2.21. Selección usando restricciones mecánicas, eléctricas y térmicas	35
Figura 2.22. Conductividad térmica Vs Temperatura máxima de servicio	35
Figura 3.1. Mejores alternativas para la selección del material en el ejemplo 1	36

Figura 3.2. Mejores alternativas para la selección del material en el ejemplo 2	36
Figura 3.3. Mejores alternativas para la selección del material en el ejemplo 3	37

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Requerimientos de diseño.	18
Tabla 2.2. Requerimientos de diseño para el ejemplo de índice de desempeño	20
Tabla 2.3. Índice de desempeño por diseño Termo Mecánico	21
Tabla 2.4. Variables de índice de desempeño Termo Mecánico.....	22
Tabla 2.5. Requerimientos de diseño en el intercambiador de calor, ejemplo 1	23
Tabla 2.6. Requerimientos de diseño del eje cilíndrico, ejemplo 2.....	31
Tabla 2.7. Requerimientos de diseño, ejemplo 3	34

RESUMEN

Las propiedades de los materiales en la ingeniería son muy importantes, tal es el caso de la conductividad térmica la cual indica su capacidad térmica para conducir calor. Cuando los elementos de la máquina operan en ambientes calientes, la transferencia de calor puede afectar el rendimiento de la máquina. Por lo que el estudio de los parámetros en los cambios de las propiedades térmicas ayudará a una mejor comprensión y adecuada selección de los materiales en la ingeniería.

Existe poca información sobre los parámetros que influyen en las propiedades térmicas de los materiales y su relación con la microestructura, estos son muy importantes, ya que la inadecuada selección ocasionaría un mal funcionamiento o desgaste apresurado de la máquina.

Se recopilará información sobre las propiedades térmicas de los materiales en libros revistas científicas, artículos software, así como los parámetros que intervienen en cada uno de ellos en los materiales como aceros, cerámicos, plásticos, etc. Seguidamente, se hará un análisis que relacionen los diferentes materiales que cumplan con las necesidades del material que se necesite.

PALABRAS CLAVE: Propiedades, materiales, conductividad, térmica, calor, microestructura.

ABSTRACT

The properties of materials in engineering are very important, such as thermal conductivity, which indicates their thermal capacity to conduct heat. When machine elements operate in hot environments, heat transfer can affect machine performance. Therefore, the study of the parameters in the changes in thermal properties will help a better understanding and adequate selection of materials in engineering.

There is little information about the parameters that influence the thermal properties of the materials and their relationship with the microstructure; these are very important since inadequate selection would cause poor operation or rapid wear of the machine.

Information will be collected on the thermal properties of materials in books, scientific journals, software articles, as well as the parameters involved in each of them in materials such as steel, ceramics, plastics, etc. Next, an analysis will be made that relates the different materials that meet the needs of the material needed.

KEYWORDS: Properties, materials, conductivity, thermal, heat, microstructure.

1 INTRODUCCIÓN

En el presente trabajo de integración se recopiló información de las propiedades térmicas de los materiales: Punto de fusión, Temperatura máxima de servicio, Conductividad térmica, Capacidad de calor específica y Coeficiente de expansión térmica para poder analizar sus parámetros y cómo el calor afecta sus propiedades.

Posteriormente se seleccionó 3 ejemplos de selección de materiales en el uso de la industria, tomando en cuenta 4 aspectos fundamentales seguidos por el Dr. Michael Ashby los cuales son: establecer los requerimientos de funcionamiento, filtrar los materiales que cumplen dichas características, clasificación de los materiales y documentar la información para seleccionar el mejor material que se adapte al trabajo.

Para los ejemplos se sigue la Tabla 2.1 en la cual se debe tener en cuenta la función que realiza el componente, su objetivo que por lo general es minimizar o maximizar alguna propiedad y las variables que debe cumplir dicho material.[1]

Otro aspecto que se debe tener en cuenta es el índice de desempeño que depende del objetivo al cual se quiere llegar con la selección del material, basándose en esto se obtiene con el programa Ces Edupack la lista de los materiales para finalmente analizar cuál material es la mejor opción.

1.1 Objetivo general

Estudiar las propiedades térmicas de los materiales.

1.2 Objetivos específicos

- Definir las propiedades térmicas de los materiales más utilizadas en el Diseño Térmico Mecánico.
- Utilizar la metodología del Dr. M Ashby en el estudio y selección de materiales utilizados en el Diseño Térmico Mecánico.
- Seleccionar materiales con énfasis en las propiedades térmicas que satisfagan los requerimientos funcionales del Diseño Térmico Mecánico.

1.3 Alcance

El presente trabajo tiene como finalidad analizar las propiedades térmicas de los materiales y seleccionar el adecuado material en las diferentes necesidades de las piezas sometidas a altas o bajas temperaturas y así obtener una lista de los posibles materiales con la ayuda del programa Ces Edupack.

1.4 Marco teórico

1.4.1 Antecedentes

Las propiedades mecánicas y físicas de un material dependen de la temperatura de servicio o de procesamiento. Es útil apreciar las propiedades térmicas de los materiales para entender la falla mecánica de los mismos cuando cambia la temperatura, a fin de diseñar procesos en los que los materiales deban calentarse o para seleccionar materiales para transferir rápidamente el calor.

El manejo térmico se ha convertido en un factor muy importante en materiales de empaques electrónicos. Algunos chips de computadora tienen ahora más de mil millones de transistores; el calor que se produce debe ser disipado de manera eficiente para que los dispositivos funcionen de forma adecuada.

En materiales metálicos, los electrones transfieren calor; en materiales cerámicos, la conducción de calor abarca ondas elásticas. En otras aplicaciones, por ejemplo, los recubrimientos térmicos de barreras, se desea reducir al mínimo la transferencia térmica a través del material. La transferencia térmica también es importante en numerosas aplicaciones que van, por ejemplo, de vasos de espuma de poliestireno que se usan para tomar bebidas calientes hasta refinados recubrimientos en vidrios para la construcción de edificios eficientes en el consumo de energía.[2]

1.4.2 Temperatura de transición vítrea

La temperatura de fusión, T_m y la temperatura de transición vítrea, T_g (ambas en unidades K o C) son fundamentales porque se relacionan directamente con la fuerza de los enlaces del sólido. Los sólidos cristalinos tienen un punto de fusión agudo T_m , los sólidos no cristalinos no la tienen, la temperatura del vidrio T_g caracteriza la transición de un verdadero sólido a un líquido muy viscoso. Medir el punto de fusión parece fácil: simplemente caliente hasta que se derrita y luego registre la temperatura. Eso funciona, pero no es tan preciso como se desea debido a los gradientes de temperatura, y no funciona en absoluto para la temperatura del vidrio porque se trata de un cambio gradual. En cambio T_m y T_g (y todas las demás temperaturas de transición de fase) se miden mediante calorimetría diferencial de barrido, como se explica en la Figura 1.1. La muestra de prueba y un material estándar calibrado se calientan en cámaras aisladas. Se monitorea la temperatura de cada uno y se ajusta la energía P_1 a la muestra, utilizando un circuito de retroalimentación, de modo que su temperatura se mantenga

igual que a la del estándar, al cual se aplica la energía P_2 . Cuando la muestra se funde o pasa por su transición vítrea, se absorbe un calor latente y eso significa que se debe bombear más energía a la muestra de la temperatura a la que le sucede. Graficando $P_1 - P_2$ contra la temperatura, como se muestra en la Figura 1.1. Se utiliza el mismo equipo para medir el calor latente y el calor específico.[3]

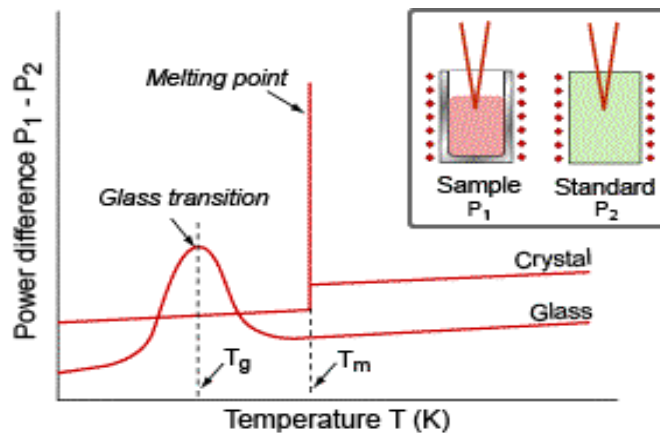


Figura 1.1. Calorimetría diferencial de escaneo, utilizada para medir el punto de cocción y la temperatura del vidrio. [3]

La característica más llamativa del derretimiento es que la temperatura de fusión es aguda, tan aguda que el punto de fusión del hielo (0°C) y del azufre (119°C) se utilizan como estándares de temperatura. La fusión aún no se comprende completamente, pero muchas de sus características se explican por la sugerencia de Lindemann de que los cristales se funden cuando la amplitud de la vibración atómica excede aproximadamente el 10% del espaciado atómico. Cuanto mayor es el módulo E , más difícil es estirar los enlaces atómicos, por lo que podríamos esperar encontrar esto $T_m \propto E$, y de hecho este es el caso: para metales y cerámicas.[3]

$$\frac{E}{T_m} \approx 0.12 \quad (1.1)$$

(E esta en GPa y T_m esta en Kelvin) es una aproximación notablemente buena.

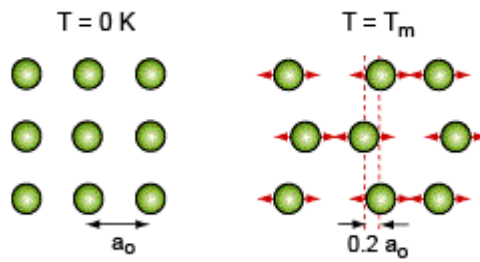


Figura 1.2. Distribución de átomos a temperatura absoluta [3]

El concepto clave para comprender la transición vítrea es el de volumen libre. Pensemos por el momento en esferas empaquetadas al azar, aunque el argumento es válido para moléculas de forma más compleja, existe una densidad de empaquetado específica para una matriz aleatoria como la de la Figura 1.3 en la que toda la matriz se bloquea; se llama fracción de empaquetamiento aleatorio denso y su valor es 0,64 (consulte densidad y empaquetamiento de átomos). Los vidrios reales con átomos esféricos presentan esta fracción de empaquetamiento a bajas temperaturas. Al calentarse a través de la temperatura del vidrio T_g , la estructura se expande de modo que la fracción de relleno es menor y, en consecuencia, el volumen mayor. La diferencia entre el volumen real y el volumen bloqueado es el volumen "libre", libre en el sentido de que da a los átomos libertad para cambiar su configuración. Un cambio de configuración es el de la difusión mezcla de los átomos, otro es el cambio de forma en respuesta a un estrés. Es el equivalente vítreo de la fusión, pero el agudo punto de fusión del cristal se difumina en una amplia transición que abarca decenas de grados en un polímero y cientos en vidrios inorgánicos como el vidrio de soda. La temperatura T_g es el centro de la transición, como se muestra en la Figura 1.1

Los polímeros como PP, PE y PS tienen formas tanto cristalinas como vítreas; para estos se encuentra que T_m y T_g están relacionados por $T_g \approx 0.65T_m$. [3]

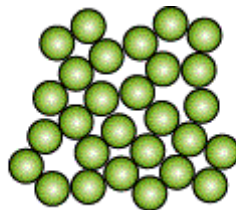


Figura 1.3. Compactación de átomos aleatorios [3]

1.4.3 Temperaturas máximas y mínimas de servicio.

Es útil en diseño de ingeniería, definir dos temperaturas empíricas: las temperaturas de servicio máxima T_{max} y mínima T_{min} (unidades para ambas K o C). La primera nos indica la temperatura más alta a la que el material puede usarse razonablemente sin que la oxidación, el cambio químico, la deflexión excesiva o la "fluencia" se conviertan en un problema (la temperatura de uso continuo o CUT es una medida similar). La segunda es la temperatura por debajo de la cual el material se vuelve quebradizo o inseguro de usar. Son empíricas y no existen definiciones universalmente aceptadas. La mayoría de los metales comienzan a deslizarse por encima de $0,35T_m$ aunque las aleaciones especialmente desarrolladas (como las superaleaciones a base de níquel) resisten la fluencia hasta $0,7T_m$. Para los polímeros la temperatura importante es T_g ; por encima de T_g el material comienza a ablandarse (ver punto de fusión y temperatura del vidrio). Para la mayoría de los polímeros, una temperatura alta significa "cualquier temperatura superior a 135°C ", pero algunos, como el PTFE (teflón), se pueden utilizar a temperaturas considerablemente más altas. Se utilizan varias pruebas para evaluar la temperatura a la que se puede utilizar un polímero. El índice térmico relativo (RTI) y la ASTM utiliza la temperatura (CUT), que son medidas de durabilidad a largo plazo. La temperatura de reblandecimiento Vicat, VST, y la temperatura de deflexión por calor, HDT son pruebas a corto plazo que miden solo la temperatura a la cual la deflexión bajo carga se vuelve significativa. Son útiles para clasificar, 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 (ver tenacidad a la fractura). Para elastómeros es la temperatura del vidrio T_g por debajo de T_g dejan de ser elásticos y se vuelven duros y, a menudo, quebradizos[3].

1.4.4 Conductividad térmica

La velocidad a la que el calor se conduce a través de un sólido en estado estacionario (lo que significa que el perfil de temperatura no cambia con el tiempo) se mide mediante la conductividad térmica λ (W/m.K). La Figura 1.4 muestra cómo se mide: registrando el flujo de calor q (W/m²) que fluye a través del material desde una superficie a mayor temperatura T_1 hasta una más baja en T_2 separada por una distancia x . La conductividad se calcula a partir de la Ley de Fourier:

$$q = -\lambda \frac{dT}{dx} = \lambda \frac{(T_1 - T_2)}{x} \quad (1.2)$$

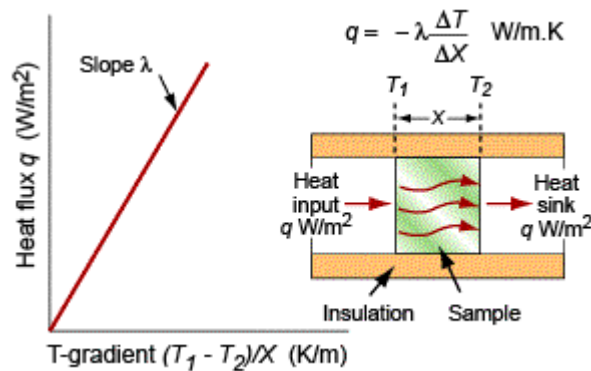


Figura 1.4. Medición de la conductividad térmica. [4]

Profundizando: ¿Cómo conducen el calor los materiales? El calor se transmite a través de los sólidos de tres formas: mediante vibraciones térmicas; por el movimiento de electrones libres en los metales y, si son transparentes, por radiación. La transmisión por vibraciones térmicas implica la propagación de ondas elásticas, como se muestra en la Figura 1.5 y se describe más detalladamente en calor específico. Cuando se calienta un sólido, el calor entra en forma de paquetes de ondas elásticas o fonones. Los fonones viajan a través de la materia y, como toda onda elástica, se mueven con la velocidad del sonido c_0 . Si esto es así, ¿Por qué el calor no se difunde a la misma velocidad? Esto se debe a que los fonones viajan solo una corta distancia antes de ser dispersados por la más mínima irregularidad en la red de átomos a través de la cual se mueven, incluso por otros fonones. En promedio, recorren una distancia llamada camino libre medio l_m antes de rebotar en algo, y este camino es corto: normalmente menos de 0,01 micrones (10^{-8} m).[2]

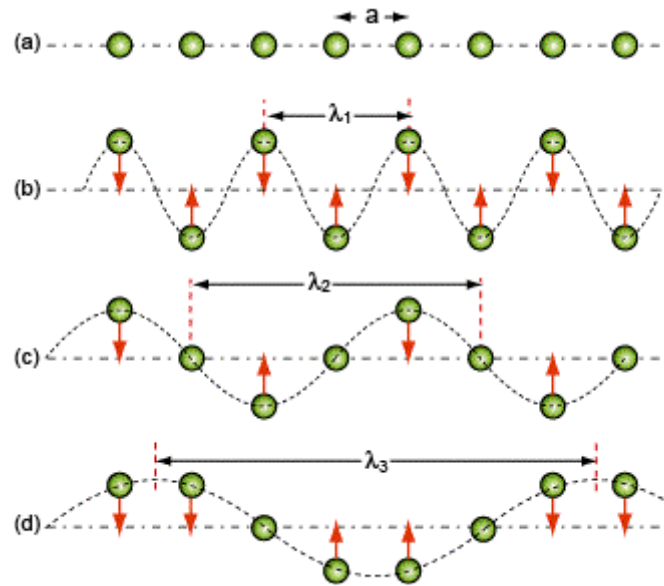


Figura 1.5. Energía térmica atómica [4]

La energía térmica implica vibraciones atómicas. Hay un modo longitudinal de vibración y dos modos transversales, uno de los cuales se muestra aquí. la longitud de onda significativa más corta $\lambda_1 = 2a$ mostrado en b)

Calculamos la conductividad utilizando un modelo de flujo neto, de la misma manera que se calcularía la velocidad a la que se acumulan los automóviles en un estacionamiento contando la velocidad a la que entran y restando la velocidad a la que salen. La conducción de fonones se puede entender de manera similar, como lo sugiere la Figura 1.6. Aquí una varilla con sección transversal unitaria lleva un gradiente de temperatura uniforme $\frac{dT}{dx}$ entre sus extremos. Los fonones que contiene tienen 6 grados de libertad de movimiento (pueden viajar en las direcciones $\pm x, \pm y, \pm z$). Centrarse en el plano medio M-M. En promedio, 1/6 de los fonones se mueven en la dirección $+x$; aquellos que se encuentren a una distancia l_m del plano lo cruzarán de izquierda a derecha antes de dispersarse, llevando consigo una energía $p C_p (T + \Delta T)$ donde T es la temperatura en el plano M-M y $\Delta T = (dT/dx) l_m$. Otro 1/6 de los fonones se mueven en $-x$ a la dirección M-M y cruzan de derecha a izquierda llevando una energía $p C_p (T - \Delta T)$. Por lo tanto, el flujo de energía $J/m^2 \cdot s$ a través de la unidad de área de M-M por segundo es:

$$q = -\frac{1}{6} p C_p c_0 \left(T + \frac{dT}{dx} l_m \right) + \frac{1}{6} p C_p c_0 \left(T - \frac{dT}{dx} l_m \right) = -\frac{1}{3} p C_p l_m c_0 \frac{dT}{dx} \quad (1.3)$$

Comparando esto con la definición de conductividad térmica, se da que la conductividad viene dada por:

$$\lambda = \frac{1}{3} p C_p l_m c_0 \quad (1.4)$$

Las ondas elásticas contribuyen poco a la conductividad de metales puros, como el cobre o el aluminio porque los electrones libres transportan el calor más rápidamente. La ecuación todavía se aplica por ahora C_p , c_0 y l_m se convierten en la capacidad térmica, la velocidad y el camino libre medio de los electrones. Los electrones libres también conducen electricidad, por lo que los metales con alta conductividad eléctrica también tienen una alta conductividad térmica (ley de Wiedemann-Franz) ver Resistividad eléctrica.[2]

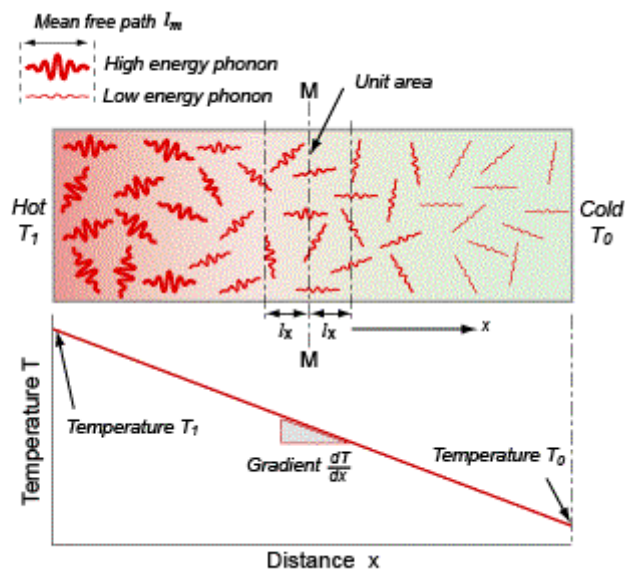


Figura 1.6. Transmisión de calor por el movimiento de fonones. [4]

Para un sólido dado se dan la capacidad calorífica C_p , la densidad p y la velocidad del sonido $c_0 \approx \sqrt{E/p}$. Eso deja el camino libre medio l_m de los fonones o en los metales de los electrones. Esto se logra mediante la introducción de centros de dispersión, como átomos de impurezas o partículas finamente dispersas. Así, la conductividad del hierro puro es de 80 W/m.K, mientras que la del acero inoxidable (hierro con hasta un 30% de

níquel y cromo) es de solo 18 W/m.K. Ciertos materiales pueden existir en estado vítreo, y aquí la naturaleza desordenada del vidrio convierte a cada molécula en un centro de dispersión y el camino libre medio se reduce a un par de espaciamentos de átomos.

Por supuesto, no estamos restringidos a sólidos completamente densos, lo que hace que ρ , sea una posible variable después de todo. Los mejores aislantes térmicos son materiales muy porosos (espumas de baja densidad, tejidos aislantes, corcho, lana aislante, etc.) que aprovechan la baja conductividad del aire en calma (0,02 W/m.K).[4]

1.4.5 Capacidad calorífica específica.

Es la energía para calentar 1 kg en 1°C se llama capacidad calorífica específica o calor específico, y como la medición suele realizarse a presión constante (presión atmosférica) se le asigna el símbolo C_p . Sus unidades son J/kg.K. Cuando se trata de gases, es más común medir la capacidad calorífica a volumen constante (símbolo C_v) y para los gases esto difiere de C_p . Para los sólidos la diferencia es tan pequeña que puede ignorarse, y así lo haremos, simplemente llamando a la capacidad calorífica específica C_p . Se mide mediante la técnica de calorimetría, que también es la forma estándar de medir la temperatura del vidrio T_g .

La Figura 1.7 muestra cómo, en principio, se hace esto. Se bombea una cantidad medida de energía (en este caso, energía eléctrica) a una muestra de material de masa conocida. Se mide el aumento de temperatura. La capacidad calorífica específica es la energía necesaria para elevar la temperatura de un kilogramo de material en 1 °C. Los calorímetros reales son mucho más complicados que esto, pero el principio es el mismo.[5]

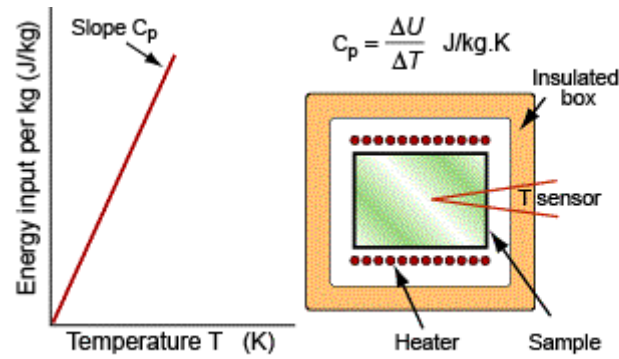


Figura 1.7. Medición de capacidad específica [4]

El calor son átomos en movimiento. En los sólidos, los átomos vibran alrededor de sus posiciones medias con una amplitud que aumenta con la temperatura. Los átomos en los sólidos no pueden vibrar independientemente unos de otros, sino que están acoplados por sus enlaces interatómicos; las vibraciones son como ondas elásticas estacionarias. A lo largo de cualquier fila de átomos existe la posibilidad de un modo longitudinal y dos modos transversales, como en la Figura 1.8. Algunos de ellos tienen longitudes de onda cortas y alta energía, otras longitudes de onda largas y energía más baja, tres de los cuales se muestran en la Figura 1.9. La longitud de onda más corta posible λ_1 , es apenas el doble del espaciado atómico; las otras vibraciones tienen longitudes de onda más largas. En un sólido con N átomos hay N longitudes de onda discretas, y cada una tiene un modo longitudinal y dos modos transversales, $3N$ modos en total. Sus amplitudes son tales que, en promedio, cada una tiene energía donde es la constante de Boltzmann, $1,38 \times 10^{-23}$ J/K. Si el volumen ocupado por un átomo es Ω , entonces el número de átomos por unidad de volumen es $N = 1/\Omega$ y la energía térmica total por unidad de volumen en el material es $3kT/\Omega$. La capacidad calorífica por unidad de volumen es pC_p es el cambio en esta energía por cada grado de cambio de temperatura, dando por:

$$pC_p = \frac{3k}{\Omega} J/m^3 K \quad (1.5)$$

Los volúmenes atómicos no varían mucho; todos se encuentran dentro de un factor de 3 del valor $2 \times 10^{-29}/m^3$, lo que da una capacidad calorífica volumétrica.

$$pC_p \approx 2 \times 10^6 J/m^3 K \quad (1.6)$$

Si se dibuja C_p vs ρ usando el programa CES se puede encontrar una muy buena aproximación

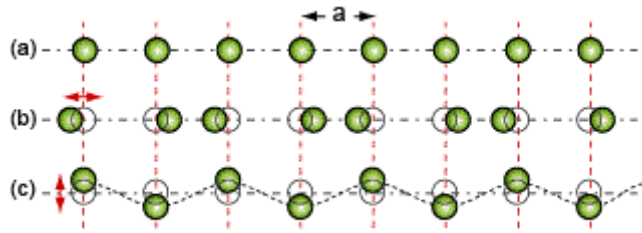


Figura 1.8. (a) fila de átomos en reposo. (b) ondas longitudinales. (c) ondas transversales [4]

Manipulación de la capacidad calorífica. La capacidad calorífica es como el módulo o el punto de fusión: depende de la rigidez y la fuerza de los enlaces atómicos. No hay mucho que pueda hacer al respecto, por lo que la capacidad calorífica por unidad de peso C_p , para un material determinado está fuera de control. Por otro lado, la capacidad calorífica por unidad de volumen ρC_p se puede reducir simplemente cambiando la densidad, creando una estructura porosa o similar a una espuma, lo que resulta útil cuando se desea una estructura que se caliente o enfríe rápidamente.[3]

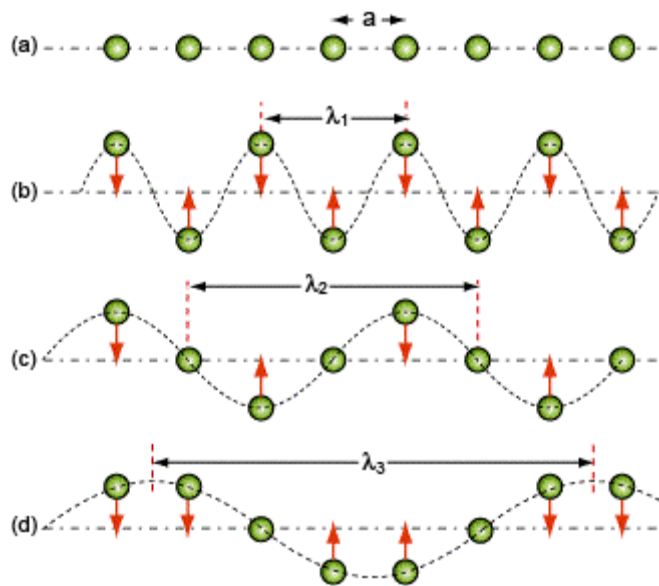


Figura 1.9. La energía térmica implica vibraciones reticulares con longitudes de onda que tienen las energías más altas [4]

1.4.6 Coeficiente de expansión térmica

La mayoría de los materiales se expanden cuando se calientan. La tensión térmica por grado de cambio de temperatura se mide mediante el coeficiente de expansión térmica lineal (unidades: K^{-1} o, más convenientemente, como "micro deformación/C" o $10^{-6}C^{-1}$). Se define por

$$\alpha = \frac{1}{L} \frac{dL}{dT} \quad (1.7)$$

donde L es una dimensión lineal del cuerpo. Se mide de la manera que se muestra en la Figura 1.10, midiendo el cambio en las dimensiones de una muestra de prueba con el cambio de temperatura. Si el material es térmicamente isotrópico, la expansión de volumen, por grado, es 3α . Si es anisotrópico, se requieren dos o más coeficientes y la expansión del volumen se convierte en la suma de las principales deformaciones térmicas.[3]

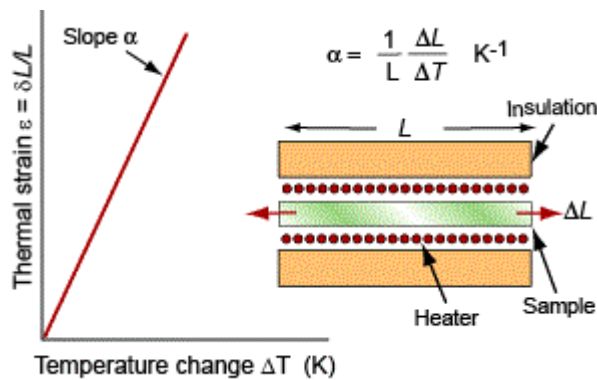


Figura 1.10. Medición del coeficiente térmico de expansión [4]

Si un sólido se expande cuando se calienta (y casi todos lo hacen), debe ser porque los átomos se están separando cada vez más. Lo asimétrico muestra cómo sucede esto. La curva fuerza-espaciamento no es del todo recta; los enlaces se vuelven más rígidos cuando los átomos se juntan y menos rígidos cuando se separan. Los átomos vibran de la manera descrita en calor específico, es decir, oscilando alrededor de un espaciamento medio que aumenta con la amplitud de la oscilación y, por tanto, con el aumento de la temperatura. Entonces la expansión térmica es un efecto no lineal si los enlaces entre átomos fueran resortes lineales, no habría expansión.[4]

Cuanto más rígidos son los resortes, más pronunciada es la curva fuerza-desplazamiento y más estrecho es el pozo de energía en el que se asienta el átomo y menor es el margen de expansión. Así, los materiales con módulo alto (resortes rígidos)

tienen un coeficiente de expansión bajo, aquellos con módulo bajo (resortes blandos) tienen un coeficiente alto. Es un hecho empírico que todos los sólidos se expanden aproximadamente en la misma medida al calentarse desde el cero absoluto hasta su punto de fusión: alrededor del 2%. El coeficiente de expansión es la expansión por grado, lo que significa que

$$\alpha \propto 1/T_m \quad (1.8)$$

El acero, con un punto de fusión de unos 1500°C, tiene $\alpha = 18 \times 10^{-6}/C$ mientras que el polietileno, con un punto de fusión de unos 150°C, se expande diez veces más $\alpha = 180 \times 10^{-6}/C$

La expansión, como ya se mencionó, puede generar estrés térmico y causar distorsión, indeseable en mecanismos e instrumentos precisos. Algunos pocos materiales tienen una expansión excepcionalmente baja: el vidrio de borosilicato (Pyrex), la sílice y las fibras de carbono, por ejemplo, pero son difíciles de utilizar en estructuras de ingeniería. Esto ha llevado al desarrollo de aleaciones especiales llamadas Invars de muy baja expansión. Lo logran mediante el truco de equilibrar la expansión térmica (que, de hecho, está ocurriendo) con una constricción causada por la pérdida gradual de magnetismo a medida que el material se calienta. [3]

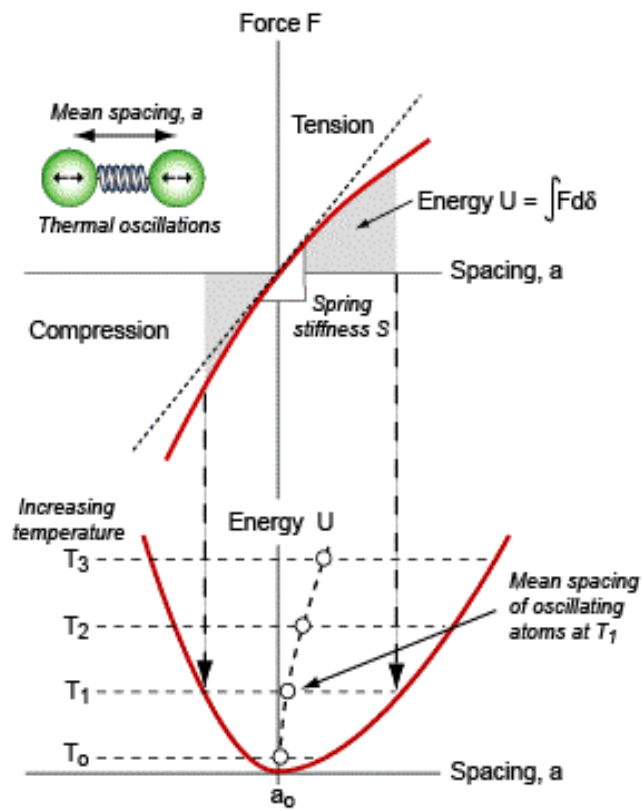


Figura 1.11. La expansión térmica resulta de la oscilación de los átomos en un pozo de energía asimétrico. [4]

2 Metodología [1]

En este capítulo se muestra la metodología del estudio y selección de materiales, y tiene como propósito el entender la importancia de las propiedades térmicas en los materiales a la hora de elegir la mejor opción en la selección del material para su aplicación. Se utilizará el programa CES Edupack para poder comparar cuál es la mejor opción dependiendo de las necesidades del producto.

2.1 Generalidades

Para la metodología se utilizará la conceptualización de la Figura 2.1 iniciando con la recopilación de las propiedades térmicas de los materiales, un análisis de las variantes y parámetros en los que interviene para luego plantear 3 ejemplos en los cuales se definirán las limitaciones, objetivos, variables libres y diseño de la función, por consiguiente se eliminará los materiales que no cumplen con los requisitos del diseño reduciendo la gama de materiales propuestos, seguidamente se los clasificarán usando objetivos y organizando los materiales seleccionados en forma ascendente según el cumplimiento del objetivo para maximizar o minimizarlos seguidamente se validarán los resultados. En caso de que el criterio no se cumpla se volverá a analizar los requerimientos de diseño para seleccionar nuevos objetivos, en caso de que el criterio de mejora sea positivo se hará el análisis de resultados para finalizar el objeto de estudio.

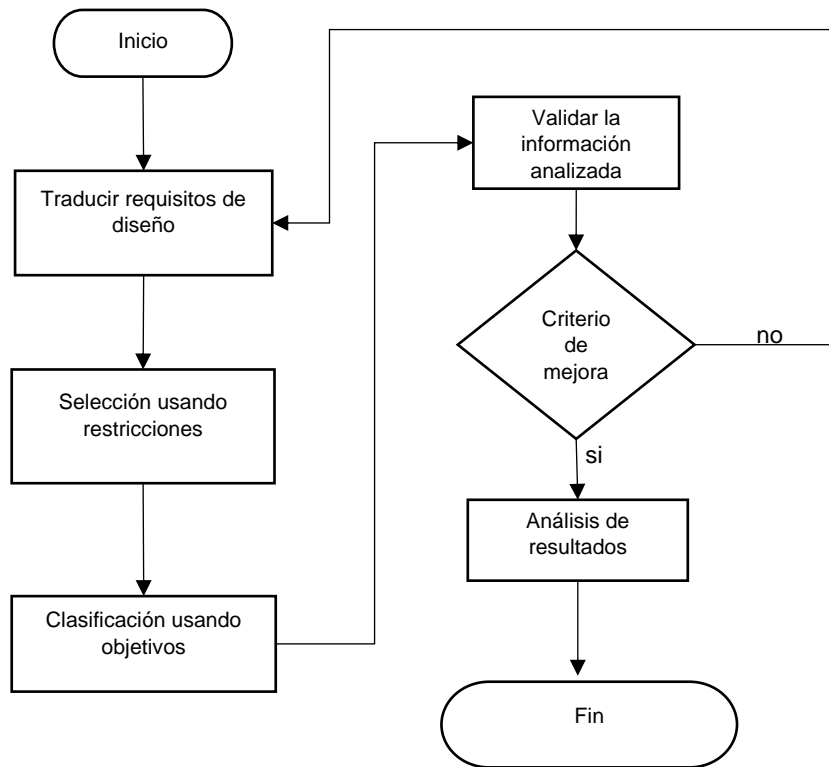


Figura 2.1. Metodología del caso de estudio [1]

2.2 Requerimiento de diseño

Cualquier componente de ingeniería tiene una o más funciones: soportar una carga, contener una presión, transmitir calor, etc. Al diseñar el componente, el diseñador tiene un objetivo: hacerlo lo más barato posible, lo más liviano, lo más seguro, o tal vez alguna combinación de estos. Esto debe lograrse sujeto a restricciones: que ciertas dimensiones sean fijas, que el componente debe soportar la carga o presión dada sin fallar, que pueda funcionar en un cierto rango de temperatura y en un entorno determinado, y muchas más. Función, objetivo y restricciones (Tabla 2.1) definen las condiciones límite para seleccionar un material y, en el caso de componentes de carga, una forma para su sección transversal.

Tabla 2.1. Requerimientos de diseño.

Función	¿Qué hace el componente?
Objetivo	¿Qué se debe maximizar o minimizar?
Restricciones	¿Qué condiciones no negociables deben cumplirse? ¿Qué condiciones negociables pero deseables...?

(Fuente:[6])

Algunas restricciones se traducen directamente en límites simples de las propiedades de los materiales. Si el componente debe funcionar a 250 °C, se eliminan todos los materiales con una temperatura máxima de servicio inferior a ésta.

2.3 Índice de desempeño generalizado

Para maximizar o minimizar un requisito de diseño se debe tener en cuenta el índice de desempeño, el diseño de un componente mecánico se especifica por tres cosas: los requisitos funcionales (la necesidad de soportar cargas, transmitir calor, almacenar energía elástica o térmica, etc.), la geometría y las propiedades del material del que está hecho, incluidas su costo. El rendimiento del elemento se puede describir mediante una ecuación con la forma general.

$$p = f(F, G, M) \quad (2.1)$$

donde p describe el aspecto del rendimiento del componente que se va a optimizar: su masa, volumen, coste o vida, por ejemplo; y f () significa 'una función de'. Se puede considerar que el diseño óptimo es la selección del material y la geometría que maximizan (o minimizan) p. La optimización está sujeta a restricciones, algunas de ellas impuestas por las propiedades del material.

Se dice que los tres grupos de parámetros son 'separables' cuando la ecuación se puede escribir

$$p = f_1(F) \cdot f_2(G) \cdot f_3(M) \quad (2.2)$$

donde f_1 , f_2 y f_3 son funciones. Cuando los grupos son separables, la elección óptima del material se vuelve independiente de los detalles del diseño. El material óptimo es el mismo para todas las geometrías G y todos los valores de los requisitos funcionales F . Entonces se puede identificar el material óptimo sin resolver el problema de diseño completo, o incluso conocer todos los detalles de F y G . Esto permite una enorme simplificación: el rendimiento para todos F y G se maximiza con $f_3(M)$, lo que se denomina "índice de rendimiento". La experiencia demuestra que los grupos suelen ser separables, como lo demuestran los siguientes ejemplos.

Cada combinación de función, objetivo y restricción conduce a un índice material. El índice es característico de la combinación. En la Figura 2.2 se puede observar que la selección de una viga de peso mínimo sujeta a una restricción de rigidez requiere la maximización del índice de desempeño $M = \frac{E^{1/2}}{\rho}$. Los siguientes ejemplos muestran cómo se deriva algunos de los índices. [3]

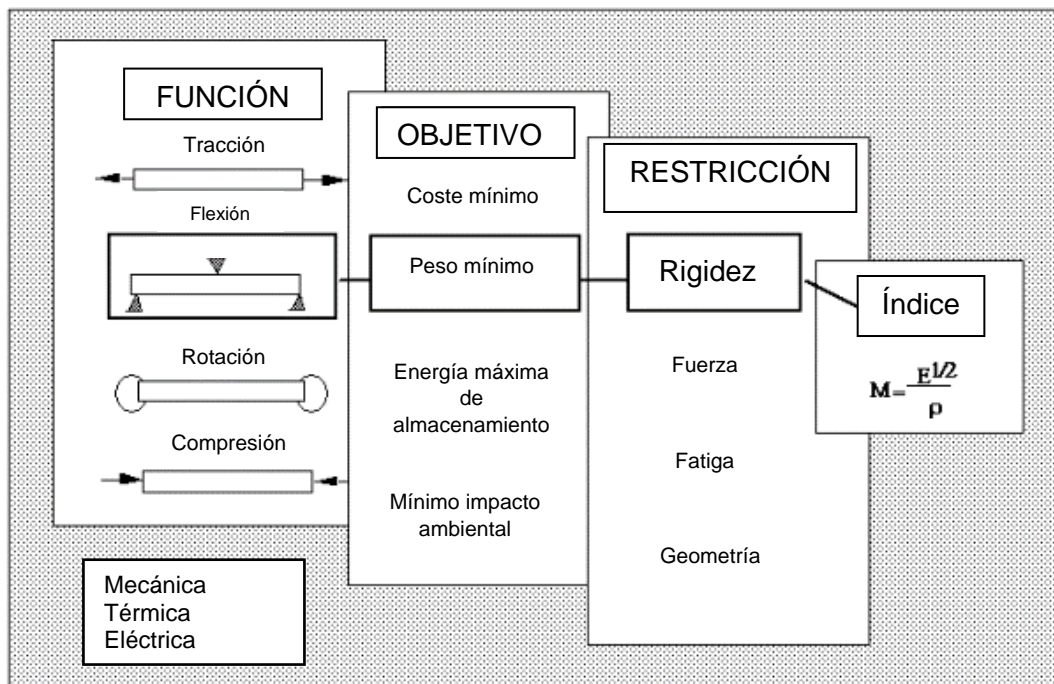


Figura 2.2. Índice de desempeño [3]

2.3.1 Ejemplo de cálculo del índice de desempeño

Cálculo del índice de desempeño para materiales de almacenamiento térmico baratos

Se requiere un material para el núcleo de un calentador de almacenamiento térmico (uno que se calienta por la noche usando electricidad barata y libera calor durante el día). El bajo costo es esencial. Se busca un índice de rendimiento que caracterice los materiales que más energía térmica pueden almacenar por coste unitario.

Tabla 2.2. Requerimientos de diseño para el ejemplo de índice de desempeño

Función	Medio de almacenamiento de calor
Objetivo	Maximizar la energía térmica almacenada por coste unitario de material
Restricciones	Temperatura adecuada de trabajo $100^{\circ}\text{C} < T_{\text{max}} < 150^{\circ}\text{C}$

(Fuente: [3])

La energía térmica E almacenada en una masa m de sólido cuando se calienta a través de un intervalo de temperatura ΔT es

$$E = mC_p\Delta T \quad (2.3)$$

Donde C_p es la capacidad calorífica del sólido.

El costo del material es

$$C = mC_m \quad (2.4)$$

Donde C_m es el costo por kg de sólido.

Por lo tanto, la energía almacenada por costo unitario es

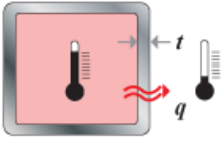
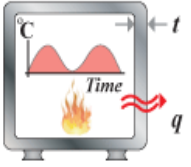
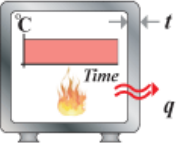
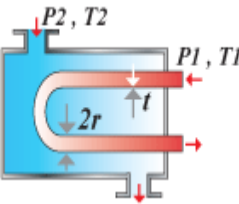
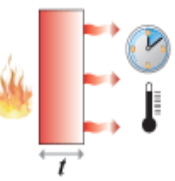
$$\frac{E}{C} = \frac{C_p}{C_m} \Delta T \quad (2.5)$$

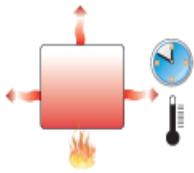
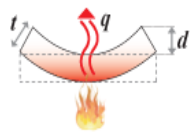

Se prescribe la cantidad ΔT , es un requisito funcional, en este caso de 100 a 150°C . El término restante a la derecha (entre paréntesis) es el índice de desempeño. El costo de energía por unidad se maximiza maximizando.[7]

$$M = \frac{C_p}{C_m} \quad (2.6)$$

2.4 Tabla de índices de desempeño en el Diseño Termo Mecánico

Tabla 2.3. Índice de desempeño por diseño Termo Mecánico

FUNCIÓN Y RESTRICCIONES		MAXIMIZAR	MINIMIZAR	
Aislamiento térmico, transición		Optimizar la estabilidad térmica; diferencia de temperatura, tiempo fijo; espesor libre.	$1 / a$ $= \rho C_p / \lambda$	$a = \lambda / \rho C_p$
Aislamiento térmico, calentamiento cíclico.		Optimizar el consumo de energía por ciclo; aumento de temperatura, tiempo de ciclo fijo; espesor de pared libre.	$(\sqrt{a}) / \lambda = (\lambda \rho C_p)^{-1/2}$	$\lambda / (\sqrt{a}) = (\lambda \rho C_p)^{1/2}$
		Optimizar la masa; aumento de temperatura, tiempo de ciclo, espesor de pared fijo.	$(\sqrt{a}) / \lambda = ((\rho C_p) / \lambda)^{1/2}$	$\lambda / (\sqrt{a}) = (\lambda / (\rho C_p))^{1/2}$
Aislamiento térmico, estado estacionario		Optimizar la masa; flujo de calor mínimo en estado estacionario; espesor especificado	ρ / λ	λ / ρ
Tubos intercambiadores de calor		Flujo de calor máximo por unidad de área; sin fallo bajo Δp	$\lambda \sigma y$	$1 / \lambda \sigma y$
		Optimizar la masa; flujo de calor máximo por unidad de masa; diferencia de presión y temperatura, radio del tubo fijo; espesor de pared libre	$\sigma^2 y \lambda / \rho$	$\rho / \sigma^2 y \lambda$
Almacenamiento de energía térmica a corto plazo.		Optimizar la energía almacenada para un tiempo y un aumento de temperatura determinados	$\lambda / (\sqrt{a}) = (\lambda \rho C_p)^{1/2}$	$(\sqrt{a}) / \lambda = 1 / (\lambda \rho C_p)^{1/2}$

		Maximizar la energía almacenada para un tiempo y un aumento de temperatura determinados.	$1 / (\rho \sqrt{a}) = (C_p / \lambda \rho)^{1/2}$	$\rho \sqrt{a} = (\lambda \rho / C_p)^{1/2}$
Almacenamiento de energía térmica a largo plazo		Energía máxima almacenada / costo unitario de material (calentadores de almacenamiento)	C_p / C_m	C_m / C_p
Estabilidad térmica		Minimizar la distorsión térmica para un flujo de calor dado	λ / α	α / λ
Resistencia al choque térmico		Cambio máximo en la temperatura de la superficie; sin fallos	$\sigma_y / E \alpha$	$E \alpha / \sigma_y$
Disipadores de calor		Flujo de calor máximo por unidad de volumen; expansión limitada	$\lambda / \Delta \alpha$	$\Delta \alpha / \lambda$
		Flujo de calor máximo por unidad de masa; expansión limitada	$\lambda / \rho \Delta \alpha$	$\rho \Delta \alpha / \lambda$

(Fuente:[6])

Tabla 2.4. Variables de índice de desempeño Termo Mecánico.

Símbolo	Significado
λ	conductividad térmica
a	difusividad térmica
C_p	capacidad calorífica específica
C_m	precio del material (\$/kg*)
$C_m \rho$	precio del material por unidad de volumen)
α	coeficiente de expansión térmica
E	módulo de Young
ρ	densidad
σ_y	resistencia a la rotura (el límite elástico para metales y polímeros dúctiles

(Fuente:[6])

2.5 Tubería de intercambiador de calor de grado marino, Ejemplo 1

2.5.1 Requerimientos de diseño en el del intercambiador de calor

Seleccionar el material con el cual se fabricará la tubería que componen los intercambiadores de calor de grado marino. Los tubos de conductividad térmica de $204 \text{ W/m}\cdot\text{C}$ y por ellos viajara agua salada a presión de 300 MPa y $208 \text{ }^\circ\text{C}$.

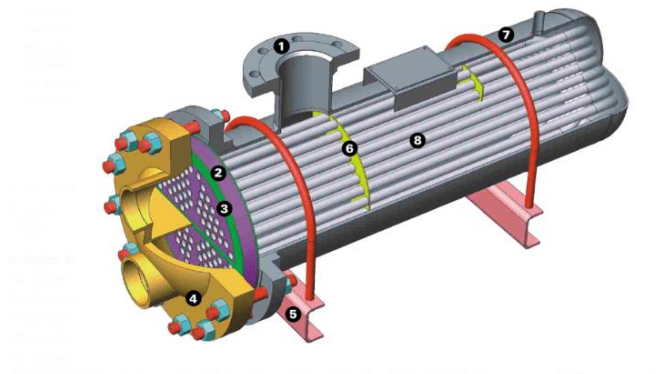


Figura 2.3. Intercambiador de calor [8]

Tabla 2.5. Requerimientos de diseño en la tubería del intercambiador de calor, ejemplo 1

	Lenguaje común	Propiedad	signo	Valor
Funciones	Transferir el calor	Conductividad térmica	\geq	$204 \text{ W/m}\cdot\text{C}$.
Restricciones necesarias	Soportar altas temperaturas	Temperatura máxima de servicio	$>$	$208 \text{ }^\circ\text{C}$.
	Controlar corrosión	Resistencia a la corrosión	----	Comportamiento excelente
	Soportar alta presión en el interior del tubo	Esfuerzo de fluencia	\geq	300 MPa
Objetivo	Disminuir el peso	Densidad	----	Minimizar
	Reducir el precio	Precio	----	Minimizar

(Fuente: Propia)

2.5.2 Selección usando restricciones

Para esta sección se disminuye el mundo de materiales a no ferrosos y aceros inoxidable en el programa CES EDUPACK ya que estos son más resistentes a la corrosión.

En el programa CES seleccionamos la etapa Avanzado Level 3 como se aprecia en la Figura 2.4.



Figura 2.4. Interfaz Ces Edupack
(Fuente: Propia)

En la Figura 2.5 se selecciona la opción de grafico la opción límites.

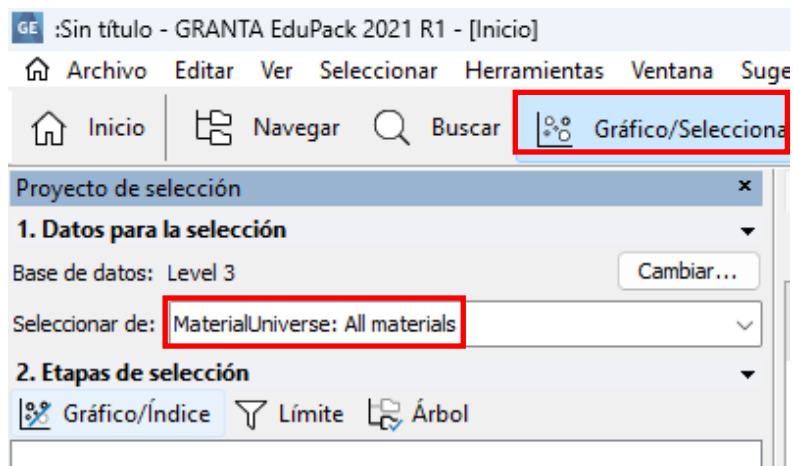


Figura 2.5. Selección de materiales utilizando el comando límites / restricciones
(Fuente: Propia)

Se define un conjunto de materiales para reducir el número de posibilidades y que los resultados sean más exactos.

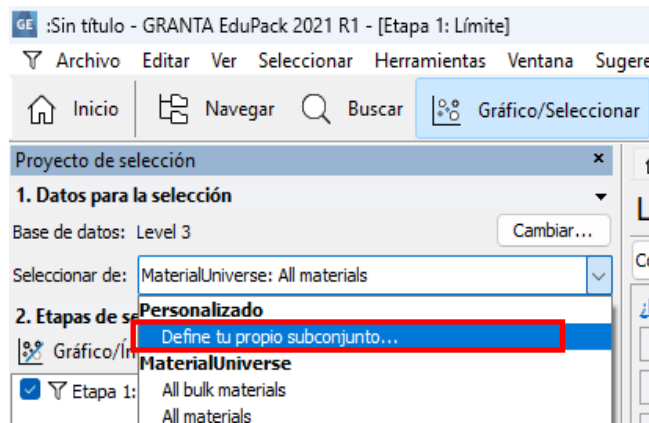


Figura 2.6. Subconjunto de materiales a seleccionar
(Fuente: Propia)

Se selecciona los aceros inoxidable y los metales no ferrosos, ya que estos son adecuados para el trabajo bajo el agua.

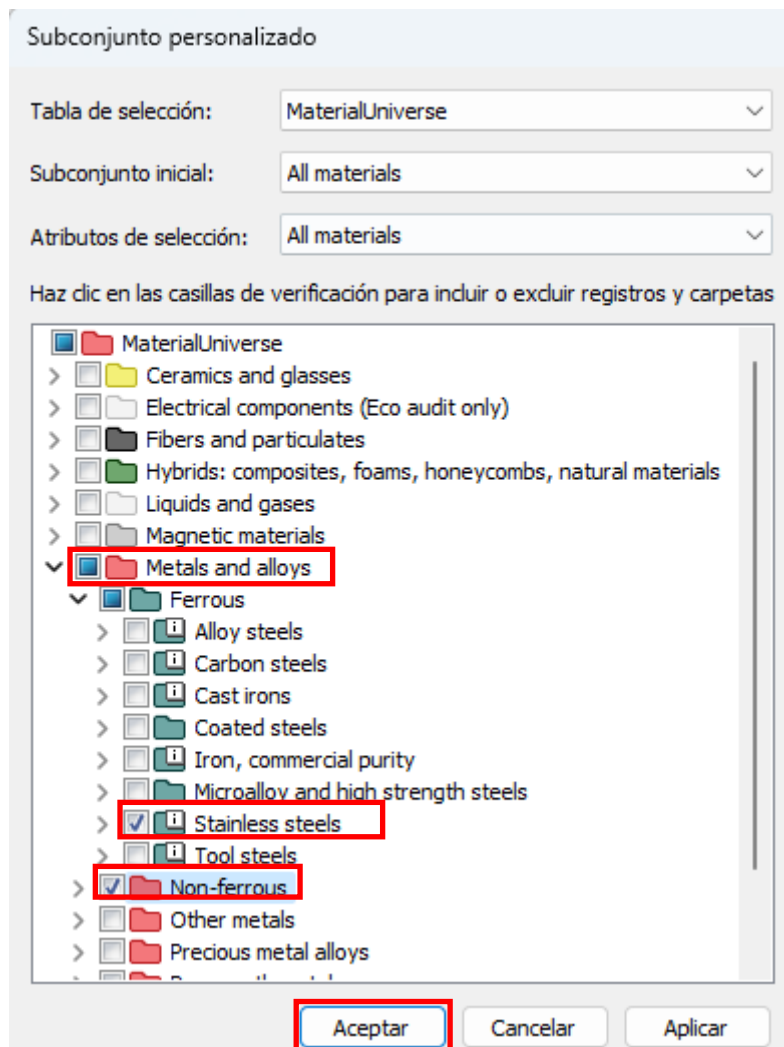


Figura 2.7. Lista de materiales seleccionados para la corrosión
(Fuente: Propia)

2.5.3 Clasificación usando objetivos

Accediendo a la sección de gráficos, como en la Figura 2.5 en la opción de limite se puede delimitar los materiales por medio de las condiciones a las que está sometida la pieza. En la Figura 2.8, la selección es por las propiedades mecánicas.

	Existe	Mínimo	Máximo	
Young's modulus	<input type="checkbox"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	GPa
Specific stiffness	<input type="checkbox"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	MN.m/kg
Yield strength (elastic limit)	<input type="checkbox"/>	300	<input type="text"/>	MPa
Tensile strength	<input type="checkbox"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	MPa
Specific strength	<input type="checkbox"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	kN.m/kg

Figura 2.8. Limitación de diseño por propiedades mecánicas
(Fuente: Propia)

Se limita por propiedades térmicas según las condiciones del problema.

Inicio | Etapa 1 x

No ferrosos y aceros inoxidable

Configuración | Aplicar | Borrar

► Impact & fracture properties

▼ Thermal properties

	Existe	Mínimo	Máximo	
Melting point	<input type="checkbox"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	°C
Glass temperature	<input type="checkbox"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	°C
Maximum service temperature	<input type="checkbox"/>	208	<input type="text"/>	°C
Minimum service temperature	<input type="checkbox"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	°C
Thermal conductivity	<input type="checkbox"/>	204	<input type="text"/>	W/m.°C
Thermal conductivity with temperature	<input type="checkbox"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	W/m.°C
Specific heat capacity	<input type="checkbox"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	J/kg.°C
Specific heat capacity with temperature	<input type="checkbox"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	J/kg.°C
Thermal expansion coefficient	<input type="checkbox"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	µstrain/°C
Thermal expansion coefficient with temperature	<input type="checkbox"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	µstrain/°C
Thermal expansion coefficient with temperature_Reference temp	<input type="checkbox"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	°C
Thermal shock resistance	<input type="checkbox"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	°C
Thermal distortion resistance	<input type="checkbox"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	MW/m

Figura 2.9. Propiedades térmicas utilizadas en la selección de materiales.
(Fuente: Propia)

Limitación de los materiales por su condición de resistir la corrosión y se aplica todas estas condiciones para analizar los resultados.

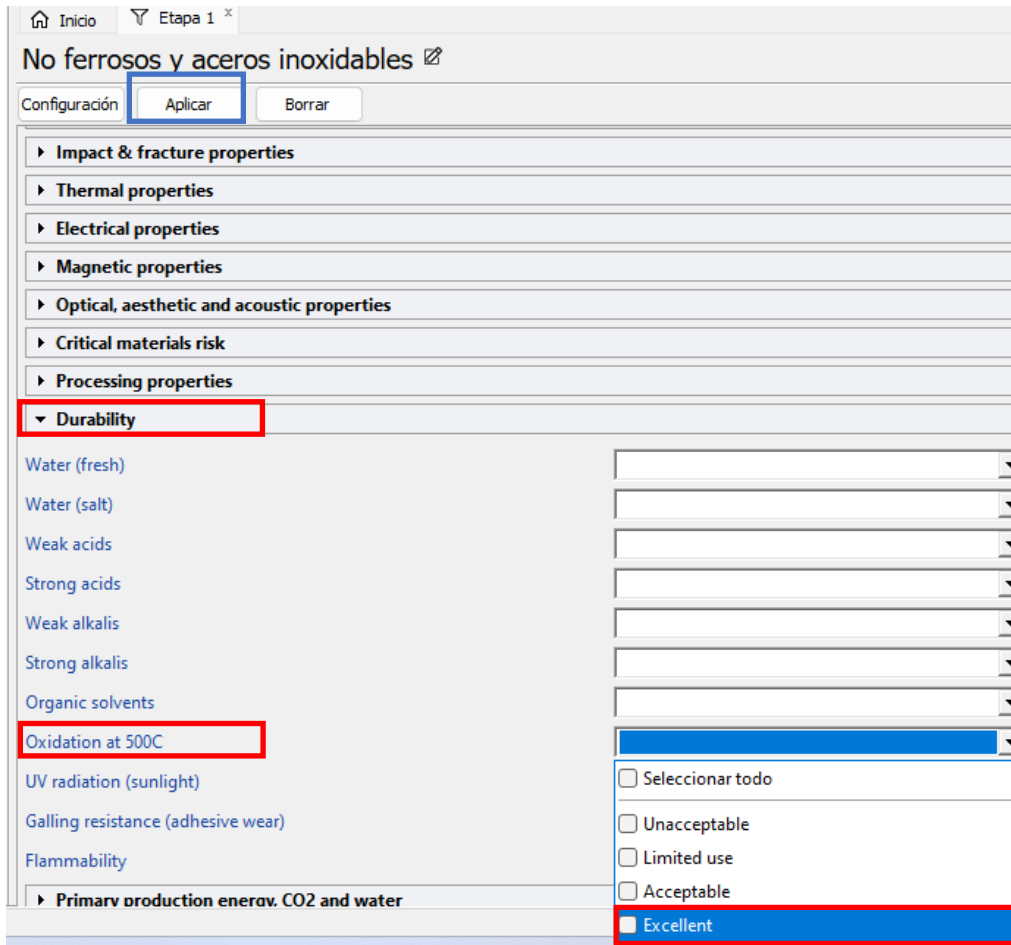


Figura 2.10. Límite de diseño por corrosión
(Fuente: Propia)

En la sección de gráficos, se escoge la opción en el eje x, la oxidación.

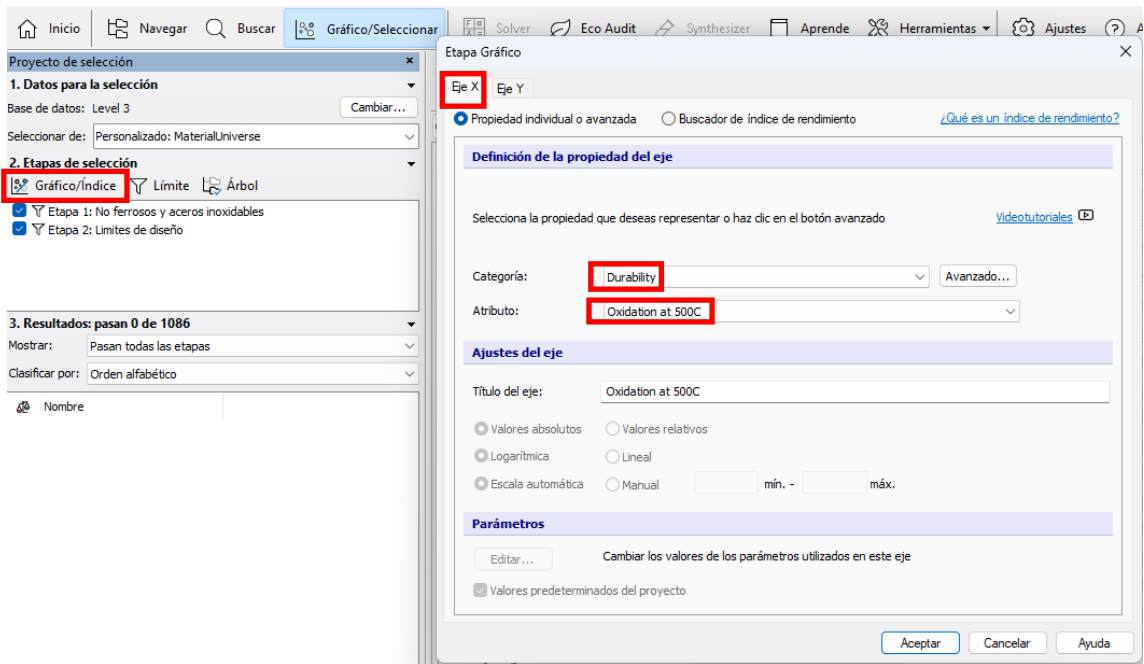


Figura 2.11. Selección para el eje x de la gráfica por la oxidación (Fuente: Propia)

En el eje y se eligió la opción de agua salada.

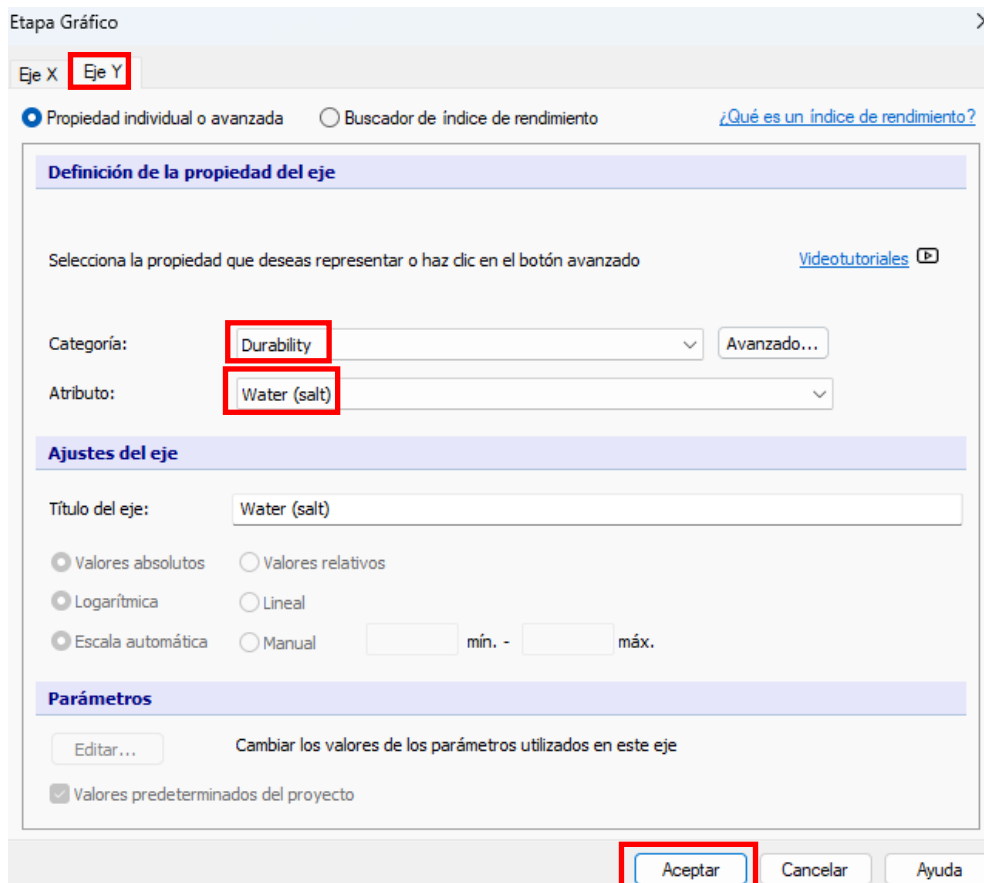


Figura 2.12. Selección del componente del eje y por corrosión (Fuente: Propia)

En la Figura 2.13 se puede observar que 9 son los materiales más aptos para el intercambiador de calor.

Water (salt)	Excellent	0	2	9	0
	Acceptable	0	0	0	0
	Limited use	0	0	0	0
	Unacceptable	0	0	0	0
		Unacceptable	Limited use	Acceptable	Excellent
		Oxidation at 500C			

Figura 2.13. Oxidación Vs Agua salada
(Fuente: Propia)

Por último, en la Figura 2.14 se observa que dependiendo de la importancia de los objetivos se tienen algunas opciones en este caso el AIBeMet 162.

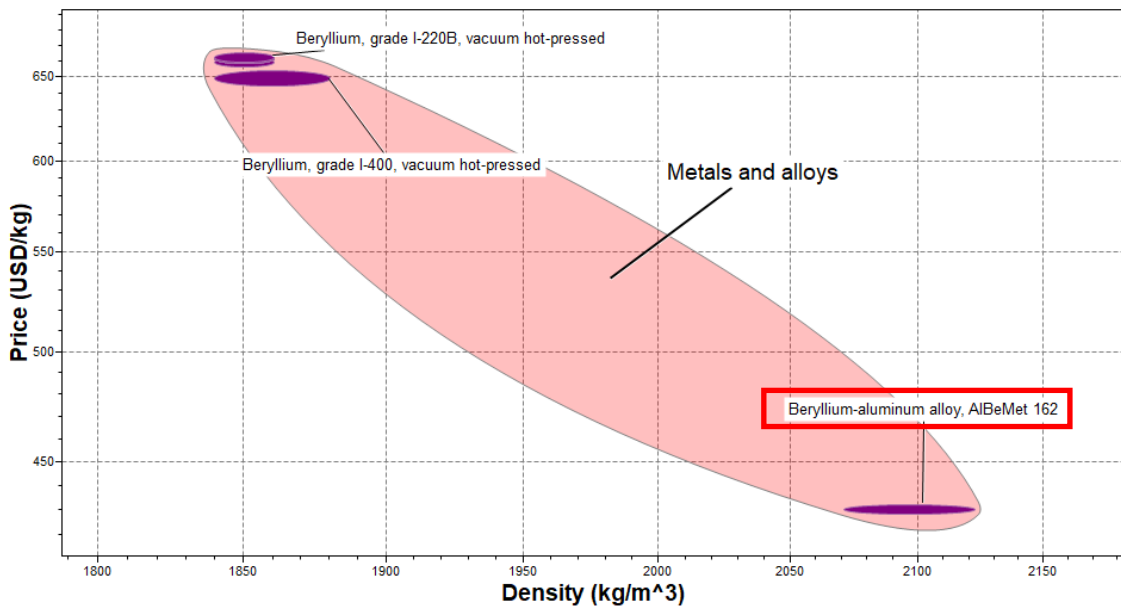


Figura 2.14. Densidad vs precio
(Fuente: Propia)

2.6 Eje cilíndrico para caja de cambios, Ejemplo 2

2.6.1 Requerimientos de diseño para el eje cilíndrico

Se busca un nuevo material en la creación de barras cilíndricas para el eje de caja de cambios

En la actualidad se fabrican del acero YS330 hot rolled. El material es en forma de cilindro sometido a torsión con una cierta geometría exterior para la selección de las distintas marchas del coche.

El material debe tener una resistencia a tracción mínima de 300 MPa, tener un comportamiento a compuestos orgánicos excelentes y tener una buena resistencia al desgaste. La temperatura de trabajo del componen es de -10°C a más de 90°C. Se desea minimizar la masa del componente manteniendo la rigidez del mismo.

Tabla 2.6. Requerimientos de diseño del eje cilíndrico.

	Lenguaje común	Propiedad	signo	Valor
Funciones	Trabajar bajo torsión	Resistencia a la tracción	\geq	300MPa.
Restricciones necesarias	Soportar rango de temperaturas	Temperatura máxima de servicio	\leq	90 °C.
		Temperatura mínima de servicio	\geq	-10 °C
	Controlar desgaste	Resistencia al desgaste a componentes orgánicos	----	Comportamiento excelente
	Resistir el desgaste	Dureza alta	----	145 HV
Objetivo	Disminuir el peso	Densidad	----	Minimizar
	Reducir el precio	Precio	----	Minimizar

(Fuente: Propia)



Figura 2.15. Eje cilíndrico ([9])

The gearbox casing houses the gear clusters and differential. The RB6 casing is extremely low and compact to optimise the airflow at the rear of the car.

- 1 Gearbox casing
- 2 Gear selector barrel
- 3 Clutch housing
- 4 Hydraulic manifold
- 5 Gear clusters
- 6 Driveshaft
- 7 Differential
- 8 Suspension pick-up bracket

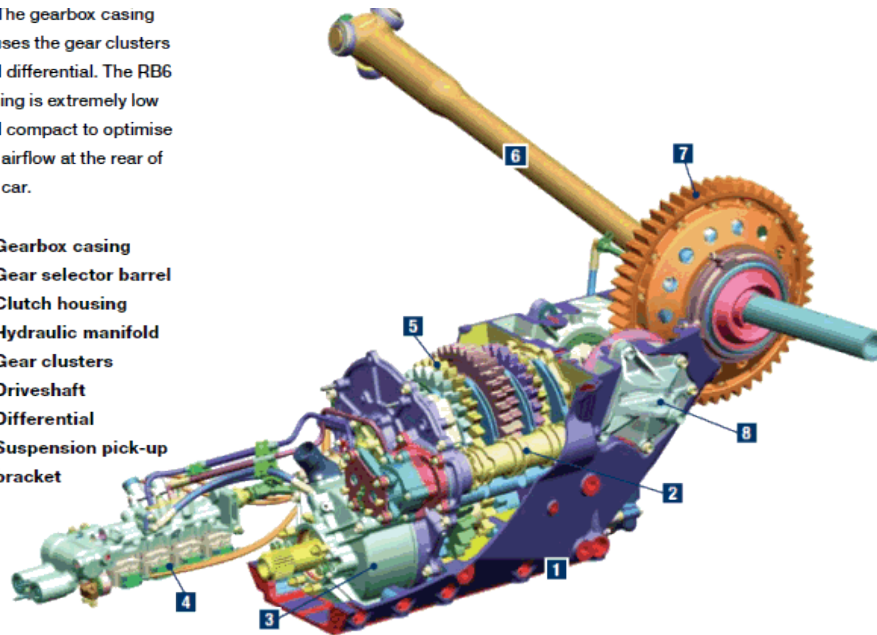


Figura 2.16. Caja de cambios del Red Bull Racing RB6
(Fuente:[9])

2.6.2 Selección usando restricciones

En la Figura 2.17 se obtiene los materiales elegidos por medio de las condiciones a las que va a estar sometido el material, en este caso por propiedades térmicas y mecánicas.

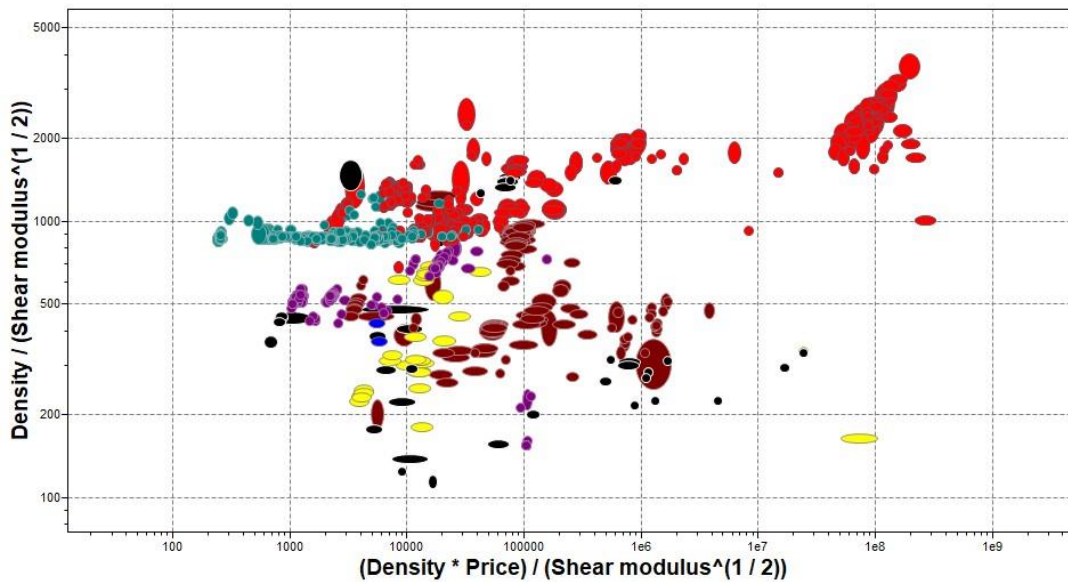


Figura 2.17. Índice para minimizar el precio vs el índice para minimizar el peso
(Fuente: Propia)

2.6.3 Clasificación usando objetivos

Según el Anexo I, Se grafica la densidad vs el precio en donde los posibles materiales son los que más se acercan a la curva amarilla de la Figura 2.18

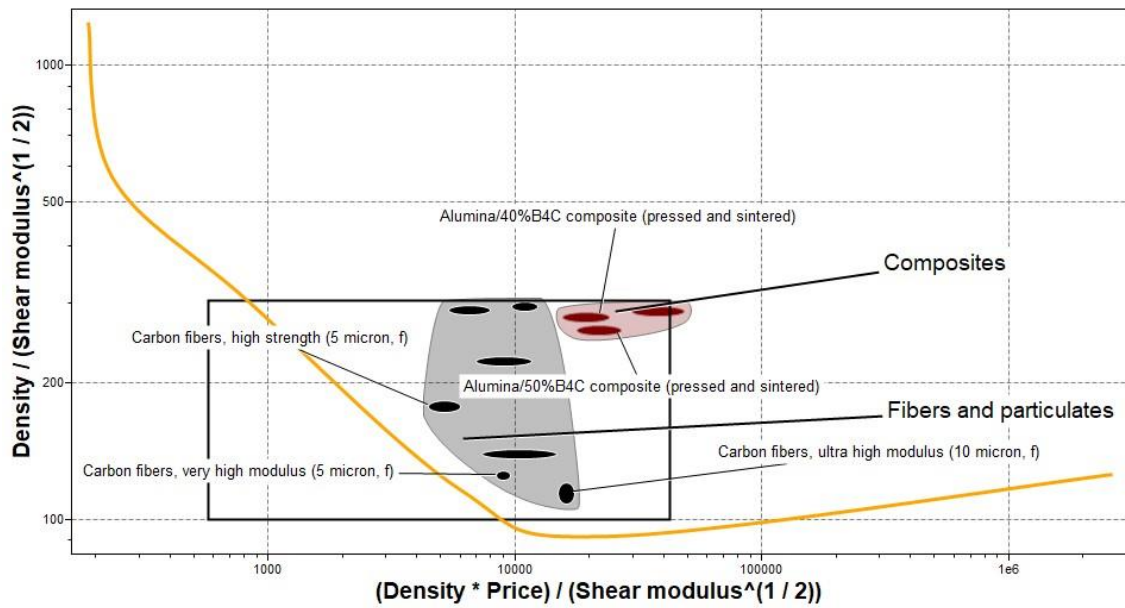


Figura 2.18. Posibles materiales para el diseño
(Fuente: Propia)

Por la Figura 2.18 se tiene una lista de posibles materiales en basándose en las condiciones de diseño y por sus objetivos a minimizar para la barra cilíndrica siendo la fibra de carbono una de las mejores opciones.

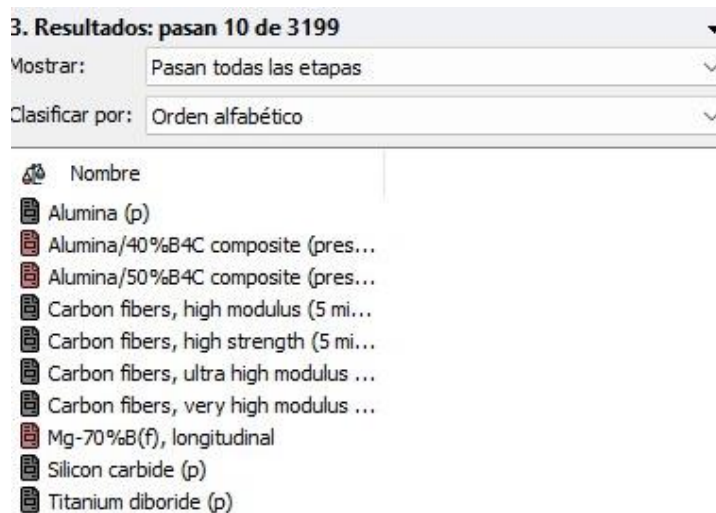


Figura 2.19. Lista de los posibles materiales
(Fuente: Propia)

2.7 Estructura del ala de un avión, Ejemplo 3

2.7.1 Requerimientos de diseño para la estructura del ala de un avión

Se busca seleccionar el material para la fabricación de la estructura del ala de un avión. Estas están en contacto con el combustible de la aeronave (queroseno) y son las encargadas de soportar los esfuerzos causados por las altas presiones que se generan durante el vuelo. Las temperaturas a la que se expone el ala pueden llegar a los $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Este material debe tener la dureza mínima de 280 HV

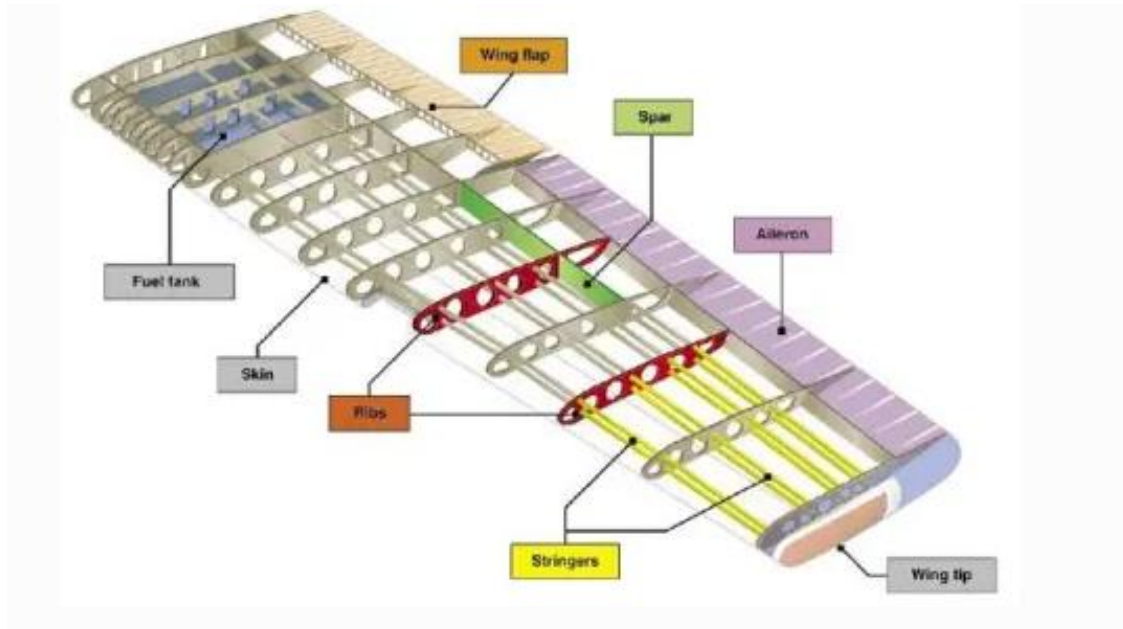


Figura 2.20. Estructura del ala de un avión [10]

Tabla 2.7. Requerimientos de diseño en la estructura del ala de un avión, Ejemplo 3

	Lenguaje común	Propiedad	signo	Valor
Funciones	Transferir calor	Conductividad térmica	\geq	$25W/m^{\circ}\text{C}$.
Restricciones necesarias	Trabajar en rango de temperaturas	Temperatura máxima de servicio	$>$	$200\text{ }^{\circ}\text{C}$.
		Temperatura mínima de servicio	\geq	-50°C
	Resistir la deformación	Dureza del material	\geq	280HV
Objetivo	Alternativas del material a usar			

(Fuente: Propia)

2.7.2 Selección usando restricciones

Con base en las propiedades físicas, eléctricas y térmicas se condiciona los materiales a elegir.

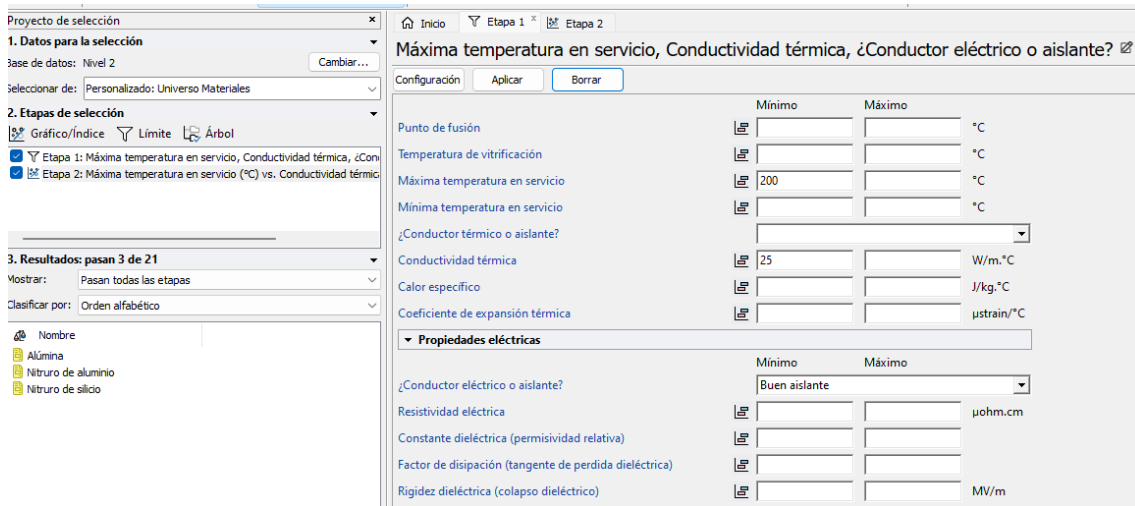


Figura 2.21. Selección usando restricciones mecánicas, eléctricas y térmicas (Fuente: Propia)

2.7.3 Clasificación usando objetivos

El objetivo del diseño es obtener el posible mejor material para que su conductividad térmica y temperatura de servicio sean las mejores, siendo el Nitruro de silicio una de sus mejores opciones.

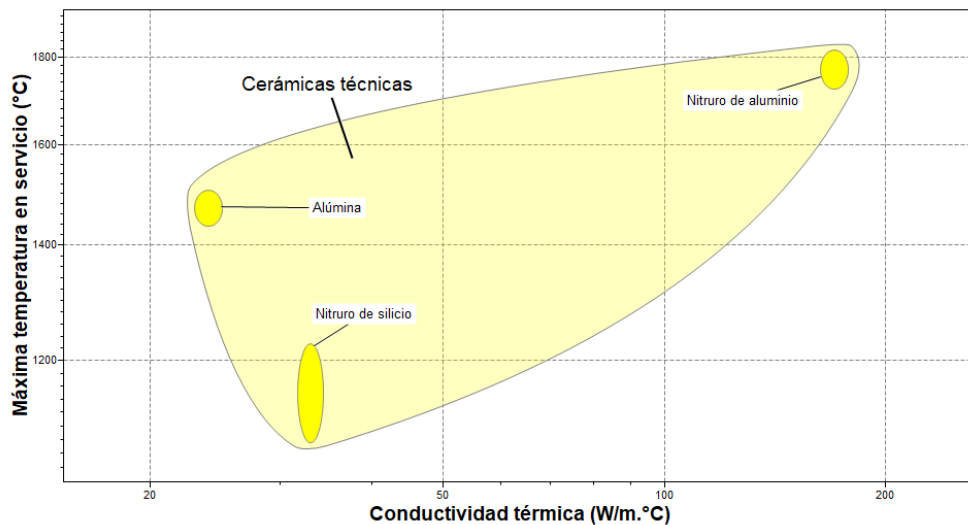


Figura 2.22. Conductividad térmica Vs Temperatura máxima de servicio (Fuente: Propia)

3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

3.1 Resultados

3.1.1 Tubería de intercambiador de calor de grado marino, Ejemplo 1

En la Figura 2.14 se puede apreciar que la mejor opción de material es Beryllium-aluminum alloy, AlBeMet 162 seguidamente de la lista de la Figura 3.1.

Rank	Material
1	Beryllium, grade 0-50, hot isostatically pressed
2	Beryllium, grade I-220B, vacuum hot-pressed
3	Beryllium, grade I-250, hot isostatically pressed
4	Beryllium, grade I-400, vacuum hot-pressed
5	Beryllium, grade I-70A, vacuum hot-pressed
6	Beryllium, grade S-200, extruded
7	Beryllium, grade S-200F, vacuum hot-pressed
8	Beryllium, grade S-200FC, cold isostatically pressed
9	Beryllium, grade S-200FH, hot isostatically pressed
10	Beryllium, grade S-65B, vacuum hot-pressed

Figura 3.1. Mejores alternativas para la selección del material en el ejemplo 1
(Fuente: Propia)

3.1.2 Eje cilíndrico para caja de cambios, Ejemplo 2

Por la Figura 2.18 los mejores materiales son los que se acercan a la curva. Tal es el caso del material Carbon fibers, very high modulus (5 micron, f) seguidamente de la siguiente lista de materiales.

Rank	Material
1	Alumina (p)
2	Alumina/40%B4C composite (pressed and sintered)
3	Alumina/50%B4C composite (pressed and sintered)
4	Carbon fibers, high modulus (5 micron, f)
5	Carbon fibers, high strength (5 micron, f)
6	Carbon fibers, ultra high modulus (10 micron, f)
7	Carbon fibers, very high modulus (5 micron, f)
8	Mg-70%B(f), longitudinal
9	Silicon carbide (p)
10	Titanium diboride (p)

Figura 3.2. Mejores alternativas para la selección del material en el ejemplo 2.
(Fuente: Propia)

3.1.3 Estructura del ala de un avión, Ejemplo 3

Por la Figura 2.22 uno de los materiales a seleccionar es el Nitruro de aluminio porque posee mayor conductividad térmica y mayor temperatura de servicio seguido de la lista siguiente.

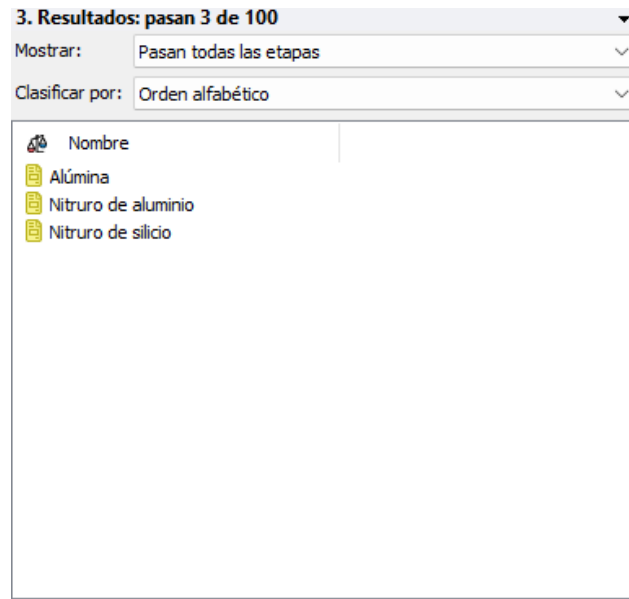


Figura 3.3. Mejores alternativas para la selección del material en el ejemplo 3
(Fuente: Propia)

3.2 Conclusiones

Se siguió la metodología de Ashby para la selección de materiales en los que se involucran las propiedades térmicas.

Se definió las propiedades térmicas más relevantes en el diseño Termo Mecánico.

Se identificó los parámetros de las propiedades térmicas de los materiales que influyen en el índice de rendimiento por diseño termodinámico.

Mediante los gráficos en el programa Ces se puede apreciar cuál material es el adecuado para la elección en su diseño.

En la propiedad de la conductividad térmica se puede concluir que es más alta cuando tiene mayor pureza en su composición, esto debido a que sus espacios atómicos son más compactos y la energía que pasa a través del material en forma de onda tiene menor distancia a recorrer perdiendo poca energía, así como mejores aislantes térmicos son los que tienen mayor porosidad en su estructura y la energía que pasa por el material se disipa en el recorrido de un átomo a otro.

La conductividad térmica se ve afectada por la temperatura, composición del material, densidad, porosidad, humedad y presión. Esta última es más evidente en gases.

La capacidad calorífica específica depende de la composición del material, temperatura, estado físico del material, presión.

Cuando mayor sea el universo de los materiales a elegir, mayor deben ser las restricciones para tener una mejor elección del material.

La forma de la pieza a elegir tiene un aspecto fundamental en la selección del material, ya que de esta depende su índice de rendimiento, ya sea un tirante, una viga o un panel.

3.3 Recomendaciones

Realizar ejemplos en los que se involucre varios índices de rendimiento por diseño termodinámico para un mejor análisis del material a seleccionar.

Utilizar el porcentaje de sustitución para saber si el material al que se sustituye vale la pena cambiarlo. Debido al resultado en ocasiones no conviene cambiar la toda la línea de proceso del material.

Finalmente, se recomienda validar los resultados con la información aportada por empresas.

4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] M. Ashby, "*Materials and the Environment*", 2nd Edition. UK: Elsevier Butterworth Heinemann, 2012.
- [2] M. Andrés, O. Suarez, "*Ciencia e ingeniería de materiales*", 7th Edición. México: Cengage Learning, 2016.
- [3] M. Ashby, "*Materials Selection in Mechanical Design*", 5th edition UK: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2016.
- [4] M. Ashby, H. Shercliff, and D. Cebon, "*Materials: Engineering, Science, Processing and Design*". Oxford: Butterworth-Heinemann, 2019.
- [5] M. Ashby, R. Jones, "*Engineering materials 2: an introduction to microstructures and processing*", UK: Butterworth-Heinemann, 2012.
- [6] Goedkoop, M.J., Demmers, M. and Collignon, M.X. "*Eco-Indicator 95, Manual*", Holland: Netherlands Agency for Energy and the Environment, 1995.
- [7] M. Ashby and D. Jones, "*Engineering materials 1: an introduction to properties, applications, and design*". UK: Butterworth-Heinemann, 2012.
- [8] AIC, "*Intercambiadores de calor.*" Accessed: Jan. 10, 2024. [Online]. Available: <https://aicheatexchangers.com/intercambiadores-de-calor-serie-ps-pw/?lang=es>
- [9] "*Formula1_Dictionary.*" Accessed: Jan. 11, 2024. [Online]. Available: <https://www.formula1-dictionary.net/gearbox.html>
- [10] CONSULTING JMJ & JMJ INVESTMENTS, "*La ingeniería y la física que hacen que los aviones vuelen.*" Accessed: Jan. 09, 2024. [Online]. Available: <https://consultingjnj.wordpress.com/2016/08/22/la-ingenieria-y-la-fisica-que-hacen-que-los-aviones-vuelen/>

5 ANEXOS

Anexo I Ejemplos de limitaciones y objetivos comunes

Common constraints	Common objectives
<p>Must be</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Electrically conducting ■ Optically transparent ■ Corrosion resistant ■ <i>Non-toxic</i> ■ <i>Non-restricted substance</i> ■ <i>Able to be recycled</i> ■ <i>Biodegradable</i> <p>Must meet a target value of</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Stiffness ■ Strength ■ Fracture toughness ■ Thermal conductivity ■ Service temperature 	<p>Minimize</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Cost ■ Mass ■ Volume ■ Thermal losses ■ Electrical losses ■ <i>Resource depletion</i> ■ <i>Energy consumption</i> ■ <i>Carbon emissions</i> ■ <i>Waste</i> ■ <i>Environmental impact</i> ■ <i>Water use</i>

Anexo II Índices de rigidez y diseño con resistencia limitada.

	Configuration	Objective: to minimize				
		Volume	Mass	Embodied energy	Carbon footprint	Material cost
Stiffness-limited design	Tie	$1/E$	ρ/E	$H_m\rho/E$	$CO_2 \cdot \rho/E$	$C_m\rho/E$
	Beam	$1/E^{1/2}$	$\rho/E^{1/2}$	$H_m\rho/E^{1/2}$	$CO_2 \cdot \rho/E^{1/2}$	$C_m\rho/E^{1/2}$
	Panel	$1/E^{1/3}$	$\rho/E^{1/3}$	$H_m\rho/E^{1/3}$	$CO_2 \cdot \rho/E^{1/3}$	$C_m\rho/E^{1/3}$
Strength-limited design	Tie	$1/\sigma_y$	ρ/σ_y	$H_m\rho/\sigma_y$	$CO_2 \cdot \rho/\sigma_y$	$C_m\rho/\sigma_y$
	Beam	$1/\sigma_y^{2/3}$	$\rho/\sigma_y^{2/3}$	$H_m\rho/\sigma_y^{2/3}$	$CO_2 \cdot \rho/\sigma_y^{2/3}$	$C_m\rho/\sigma_y^{2/3}$
	Panel	$1/\sigma_y^{1/2}$	$\rho/\sigma_y^{1/2}$	$H_m\rho/\sigma_y^{1/2}$	$C_m\rho/\sigma_y^{1/2}$	$CO_2 \cdot \rho/\sigma_y^{1/2}$

Density, ρ (kg/m^3); Elastic (Young's) modulus, E (GPa); Yield strength, σ_y (MPa); Carbon footprint CO_2 (kg/kg); Price, C_m (\$/kg); Embodied energy/kg of material, H_m (MJ/kg)

Anexo III Leyes de escalamiento para diseños con rigidez y resistencia limitadas

Configuration		Eco-performance gain by substitution			
		Volume*	Mass*	Embodied energy*	Material cost*
Stiffness-limited design	Tie	$\left(\frac{E_0}{E_1}\right)$	$\frac{\rho_1}{\rho_0} \cdot \left(\frac{E_0}{E_1}\right)$	$\frac{H_{m,1}\rho_1}{H_{m,0}\rho_0} \cdot \left(\frac{E_0}{E_1}\right)$	$\frac{C_{m,1}\rho_1}{C_{m,0}\rho_0} \cdot \left(\frac{E_0}{E_1}\right)$
	Beam	$\left(\frac{E_0}{E_1}\right)^{1/2}$	$\frac{\rho_1}{\rho_0} \cdot \left(\frac{E_0}{E_1}\right)^{1/2}$	$\frac{H_{m,1}\rho_1}{H_{m,0}\rho_0} \cdot \left(\frac{E_0}{E_1}\right)^{1/2}$	$\frac{C_{m,1}\rho_1}{C_{m,0}\rho_0} \cdot \left(\frac{E_0}{E_1}\right)^{1/2}$
	Panel	$\left(\frac{E_0}{E_1}\right)^{1/3}$	$\frac{\rho_1}{\rho_0} \cdot \left(\frac{E_0}{E_1}\right)^{1/3}$	$\frac{H_{m,1}\rho_1}{H_{m,0}\rho_0} \cdot \left(\frac{E_0}{E_1}\right)^{1/3}$	$\frac{C_{m,1}\rho_1}{C_{m,0}\rho_0} \cdot \left(\frac{E_0}{E_1}\right)^{1/3}$
Strength-limited design	Tie	$\left(\frac{\sigma_{y,0}}{\sigma_{y,1}}\right)$	$\frac{\rho_1}{\rho_0} \cdot \left(\frac{\sigma_{y,0}}{\sigma_{y,1}}\right)$	$\frac{H_{m,1}\rho_1}{H_{m,0}\rho_0} \cdot \left(\frac{\sigma_{y,0}}{\sigma_{y,1}}\right)$	$\frac{C_{m,1}\rho_1}{C_{m,0}\rho_0} \cdot \left(\frac{\sigma_{y,0}}{\sigma_{y,1}}\right)$
	Beam	$\left(\frac{\sigma_{y,0}}{\sigma_{y,1}}\right)^{2/3}$	$\frac{\rho_1}{\rho_0} \cdot \left(\frac{\sigma_{y,0}}{\sigma_{y,1}}\right)^{2/3}$	$\frac{H_{m,1}\rho_1}{H_{m,0}\rho_0} \cdot \left(\frac{\sigma_{y,0}}{\sigma_{y,1}}\right)^{2/3}$	$\frac{C_{m,1}\rho_1}{C_{m,0}\rho_0} \cdot \left(\frac{\sigma_{y,0}}{\sigma_{y,1}}\right)^{2/3}$
	Panel	$\left(\frac{\sigma_{y,0}}{\sigma_{y,1}}\right)^{1/2}$	$\frac{\rho_1}{\rho_0} \cdot \left(\frac{\sigma_{y,0}}{\sigma_{y,1}}\right)^{1/2}$	$\frac{H_{m,1}\rho_1}{H_{m,0}\rho_0} \cdot \left(\frac{\sigma_{y,0}}{\sigma_{y,1}}\right)^{1/2}$	$\frac{C_{m,1}\rho_1}{C_{m,0}\rho_0} \cdot \left(\frac{\sigma_{y,0}}{\sigma_{y,1}}\right)^{1/2}$

Anexo IV Leyes de escala para el diseño térmico.

Objective	Eco-performance gain by substitution		
	Fixed steady-state heat loss*	Volume for given heat capacity*	Heat loss in a thermal cycle*
Scaling law	$\frac{t_1}{t_0} = \frac{\lambda_1}{\lambda_0}$	$\frac{V_1}{V_0} = \frac{C_{p,1} \rho_1}{C_{p,0} \rho_0}$	$\frac{Q_1}{Q_0} = \left(\frac{\lambda_1 C_{p,1} \rho_1}{\lambda_0 C_{p,0} \rho_0}\right)^{1/2}$

* Wall thickness t , (m); Volume V , (m^3); Heat Q (kJ)

Anexo V Símbolos utilizados en índices de desempeño de materiales.

Category	Property	Symbol	Units (Metric)	Units (US Customary)
General	Density	ρ	kg/m ³	lb/in ³
	Price	C_m	currency/kg	currency/lb
	Shape factor	ϕ	<i>dimensionless</i>	<i>dimensionless</i>
Mechanical	Young's modulus	E	GPa	10 ⁶ psi
	Shear modulus	G	GPa	10 ⁶ psi
	Bulk modulus	K	GPa	10 ⁶ psi
	Flexural modulus	E_f	GPa	10 ⁶ psi
	Poisson's ratio	ν	<i>dimensionless</i>	<i>dimensionless</i>
	Failure strength (yield, fracture)	σ_y	MPa	ksi
	Fatigue strength	σ_e	MPa	ksi
	Compression strength	σ_c	MPa	ksi
	Flexural strength (modulus of rupture)	σ_f	MPa	ksi
	Hardness	H	Vickers	Vickers
	Fracture toughness	K_{Ic}	MPa.m ^{1/2}	ksi.in ^{1/2}
	Loss coefficient (damping capacity)	η	<i>dimensionless</i>	<i>dimensionless</i>
Thermal	Thermal conductivity	λ	W/m.K	BTU.ft/h.ft ²
	Thermal diffusivity	a	m ² /s	ft ² /s
	Specific heat	C_p	J/kg.K	BTU/lb.F
	Thermal expansion coefficient	α	K ⁻¹	°F ⁻¹

	Difference in thermal conductivity	$\Delta\alpha$	K^{-1}	$^{\circ}F^{-1}$
Electrical	Electrical resistivity	ρ_e	$\mu\Omega.cm$	$\mu\Omega.cm$
	Dielectric constant (relative permittivity)	ϵ_r	<i>dimensionless</i>	<i>dimensionless</i>
	Dissipation factor (dielectric loss tangent)	$\tan \delta$	<i>dimensionless</i>	<i>dimensionless</i>
Eco-properties	Energy required per unit mass to produce material (embodied energy)	H_m	MJ/kg	kcal/lb
	CO ₂ footprint (CO ₂ mass produced per unit mass of material produced)	CO_2	kg/kg	lb/lb
Diffusion	Oxygen permeability	P_{O_2}	$cm^3.mm/(m^2.day.atm)$	$cm^3.mm/(m^2.day.atm)$
	Water vapor transmission rate	VTR	$g.mm/(m^2.day)$	$g.mm/(m^2.day)$