



universidad
de león



Escuela de Ingenierías

Industrial, Informática y Aeroespacial

GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL

Trabajo de Fin de Grado

ANÁLISIS DE RESISTENCIA A LA EROSIÓN TÉRMICA Y
TRANSFERENCIA DE CALOR DE MATERIALES
COMPUESTOS DE MATRIZ METÁLICA EN TOBERA DE
MOTOR AERORREACTOR

ANALYSIS OF RESISTANCE TO THERMAL EROSION AND
HEAT TRANSFER OF METAL MATRIX COMPOSITES IN A
JET ENGINE EXHAUST NOZZLE

Autor: Carlos Vega Cabello
Tutor: María Ángeles Castro Sastre

(Septiembre, 2022)

UNIVERSIDAD DE LEÓN Escuela de Ingenierías Industrial, Informática y Aeroespacial	
GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL Trabajo de Fin de Grado	
ALUMNO: Carlos Vega Cabello	
TUTOR: M ^a Angeles Castro Sastre	
TÍTULO: Análisis de resistencia a la erosión térmica y transferencia de calor de materiales compuestos de matriz metálica en tobera de motor aerorreactor	
CONVOCATORIA: Septiembre, 2022	
RESUMEN: <p>La tobera de un motor aerorreactor se ve sometida a condiciones de servicio críticas. Las temperaturas elevadas que adquiere el flujo de aire durante la combustión se transmiten a las paredes de la tobera por mecanismos de transferencia de calor, conducción y convección. Es necesario realizar un análisis exhaustivo de los materiales seleccionados para la fabricación de la tobera, con el objetivo de cumplir los requisitos establecidos para resistir la temperatura, las tensiones térmicas inducidas y fenómenos derivados de la exposición permanente. Choque térmico, termofluencia, expansión, contracción térmica y fatiga son algunos de los procesos que aceleran la degradación de la sección de escape de un turborreactor. Los materiales con las propiedades más adecuadas son los materiales compuestos de matriz metálica. Se realizará un estudio para seleccionar las aleaciones y los refuerzos que formarán estos materiales compuestos, en función de su morfología, propiedades demandadas, características finales y técnicas y procesos de fabricación aplicados. Con el software de simulación de dinámica de fluidos computacional (CFD) ANSYS Fluent® se realiza una simulación de transferencia de calor, por convección del fluido de trabajo a la pared interna, por conducción a través del material, y por transmisión mixta convección-radiación con el entorno. Para finalizar se analizan los resultados obtenidos de cada material compuesto y se comparan las propiedades y el comportamiento frente a la degradación.</p>	
Palabras clave: Degradación térmica, transferencia de calor, materiales compuestos de matriz metálica, simulación CFD, convección, conducción, radiación, fabricación.	
Firma del alumno:	VºBº Tutor/es:

UNIVERSIDAD DE LEÓN Escuela de Ingenierías Industrial, Informática y Aeroespacial	
GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL Trabajo de Fin de Grado	
STUDENT: Carlos Vega Cabello	
MENTOR: M ^a Angeles Castro Sastre	
TITLE: Analysis of resistance to thermal erosion and heat transfer of metal matrix composites (MCMM) in a jet engine exhaust nozzle	
ANNOUNCEMENT: September, 2022	
<p>ABSTRACT: The nozzle of a jet engine is subjected to critical service conditions. The high temperatures acquired by the air flow during combustion are transmitted to the nozzle parts by heat transfer mechanisms, conduction and convection. It is necessary to carry out an exhaustive analysis of the materials selected for the manufacture of the nozzle, in order to meet the requirements to resist temperature, induced thermal stresses and the phenomena derived from permanent exposure. Thermal shock, creep, thermal expansion, contraction and fatigue are some of the processes that accelerate the degradation of the exhaust section of a turbojet. The materials with the most suitable properties are metal matrix composite materials. A study will be carried out to select the alloys and reinforcements that will form these composite materials, based on their morphology, required properties, final characteristics and applied manufacturing techniques and processes. With the ANSYS Fluent® computational fluid dynamics (CFD) simulation software, a simulation of heat transfer is carried out, by convection of the working fluid to the internal wall, by conduction through the material, and by mixed convection-radiation transmission. with the environment. Finally, the results obtained from each composite material are analysed and the properties and behaviour against degradation are compared.</p>	
<p>Key words: thermal erosion, heat transfer, metal matrix composite material, CFD simulation, convection, conduction, radiation, manufacturing.</p>	
Firma del alumno:	VºBº Tutor/es:

Índice de figuras

Figura 4.1 Capacidad calorífica en función de la temperatura para metales. (Fuente: [5])

Figura 4.2 Curva de separación entre átomos frente a energía potencial en sólidos cuando se produce dilatación térmica (a) y cuando no (b), (Fuente: [4]).

Figura 4.3 Choque térmico debido a las restricciones de expansión térmica (Fuente: [4])

Figura 4.4 Curva de termofluencia y deformación producida. (Fuente: [5])

Figura 4.5 Energía de activación de autodifusión, Q_{AD} , frente a energía de activación de termofluencia, Q_c . (Fuente: [4]).

Figura 5.1 Evolución de la capa límite de velocidad (Fuente: [16]).

Figura 5.2 Capa límite térmica sobre placa plana. (Fuente: [10])

Figura 6.1 Clasificación de materiales compuestos según refuerzos. (Fuente: [4])

Figura 6.2. Patrón de deformación de una matriz que rodea a una fibra sometida a un esfuerzo de tracción. (Fuente: [10])

Figura 6.3 Perfiles esfuerzo-posición en diferentes situaciones de l_c de un compuesto reforzado con fibra (Fuente: [10])

Figura 6.4 Representación de fibras continuas alineadas (a), discontinuas alineadas (b) y discontinuas orientadas aleatoriamente (c).

Figura 6.5 Módulo elástico (superior) y resistencia a tracción (inferior) en función de la temperatura de Inconel 718. (Fuente: [27])

Figura 6.6 Módulo elástico (superior) y resistencia a tracción (inferior) en función de la temperatura de Waspaloy. (Fuente: [27])

Figura 6.7 Diagrama de fases Ti-Al (Fuente: [29])

Figura 6.8 Comparación de resistencia específica en función de temperatura de compuesto intermetálico Ti_3Al con y sin refuerzo de fibras SiC. (Fuente: [32])

Figura 6.9 Esquema gráfico de un sistema SPS (Fuente: [47])

Figura 7.1 Fotografía del motor GE CJ610-4, con perspectiva de la tobera. (Fuente: [54])

Figura 7.2 Ventana de variables de entrada para la resolución del ciclo, GasTurb.

Figura 7.3 Tabla de resultados del ciclo termodinámico.

Figura 7.4 Dibujo geométrico de la tobera (en mm).

Figura 7.5 Dominio y condiciones de contorno.

Figura 7.6 Interfaz conforme entre mallado estructurado y desestructurado.

Figura 7.7 Mallado de capa límite utilizando Bias Factor.

Figura 8.1 Conductividad térmica en función de la temperatura de Waspaloy reforzado (FRS) (Fuente: [37]).

Figura 8.2 Distribución de temperaturas en la tobera para superaleación Waspaloy.

Figura 8.3 Gráfico de temperatura de pared a lo largo del eje longitudinal de la tobera para superaleación Waspaloy.

Figura 8.4 Distribución de temperaturas en la tobera para compuesto 50% vol. W-Waspaloy.

Figura 8.5 Gráfico de temperatura de pared a lo largo del eje longitudinal de la tobera para compuesto 50% vol. W-Waspaloy.

Figura 8.6 Gráfico comparativo de temperatura de pared en superaleación Waspaloy y Waspaloy reforzada.

Figura 8.7 Distribución de temperaturas en la tobera para Ti-6Al-4V.

Figura 8.8 Gráfico de temperatura de pared a lo largo del eje longitudinal de la tobera para Ti-6Al-4V.

Figura 8.9 Distribución de temperaturas en la tobera para 10%TiC-Ti-6Al-4V.

Figura 8.10 Gráfico de temperatura de pared a lo largo del eje longitudinal de la tobera para 10%TiC-Ti-6Al-4V.

Figura 8.11 Distribución de temperaturas en la tobera para 20%TiC-Ti-6Al-4V.

Figura 8.12 Gráfico de temperatura de pared a lo largo del eje longitudinal de la tobera para 20%TiC-Ti-6Al-4V.

Figura 8.13 Gráfico comparativo de temperatura de pared en las tres aleaciones Ti-6Al-4V.

Figura 8.14 Gráfico comparativo de temperatura de pared en ambos materiales.

Figura 8.15 N.º de ciclos de vida útil en función de rango de esfuerzos (resistencia a fatiga) para superaleación Waspaloy.

Figura 8.16 Comparación resistencia a fatiga frente a ciclos para falla del material compuesto W- Waspaloy

Figura 8.17 Resistencia a tracción en función de la temperatura para compuesto Waspaloy reforzado.

Figura 8.18 Resistencia a tracción en función de la temperatura para superaleación Waspaloy.

Figura 8.19 Resistencia a tracción en función de la temperatura para aleaciones Ti-6Al-4V. (Fuente: [43])

Índice de tablas

Tabla 6.1 Comparación de propiedades térmicas y mecánicas de aleaciones de aluminio interesantes. (Fuente: [21] [22])

Tabla 6.2 Comparación de propiedades térmicas y mecánicas de aleaciones de titanio interesantes. (Fuente: [24], [26], [27])

Tabla 6.3 Comparación de propiedades térmicas y mecánicas de superaleaciones. (Fuente: [30] [27])

Tabla 7.1 Condiciones de contorno.

Tabla 7.2 Parámetros de calidad del mallado.

Tabla 7.3 Valores de entrada para condiciones de contorno

Tabla 8.1 Propiedades térmicas del Waspaloy (Fuente: [27] [37])

Tabla 8.2 Propiedades térmicas del Ti-6Al-4V (Fuente: [27]).

Tabla 8.3 Resistencia a fatiga para 10^7 ciclos de aleaciones Ti-6Al-4V (Fuente:[14]).

Glosario de siglas y acrónimos

AM: Additive Manufacturing.

CAD: Computer Aided Design.

CFD: Computational Fluid Dynamics.

CTE: Coefficient of Thermal Expansion.

CVD: Chemical Vapor Deposition.

DLD: Laser cladding / Direct Laser Deposition.

EBM: Electron Beam Melting.

GE: General Electric.

MCMM: Materiales Compuestos de Matriz Metálica.

MPA: Polvos Elementales.

PPA: Polvos Prealeados.

PVD: Physical Vapor Deposition.

SHS: Self-propagating High-temperature Synthesis.

SLM: Selective Laser Melting.

SLS: Selective Laser Sintering.

SPS: Spark Plasma Sintering.

Índice de contenidos

Resumen

Abstract

Índice de figuras

Índice de tablas

Glosario de siglas y acrónimos

Índice de figuras	7
Índice de tablas	10
1. Introducción	17
2. Objetivos.....	18
3. Principio de funcionamiento de una tobera	19
4. Propiedades térmicas de los materiales	21
4.1. Capacidad calorífica y calor específico	21
4.2. Dilatación térmica.....	23
4.3. Conductividad térmica.....	26
4.4. Tensiones térmicas.....	26
4.4.1. Tensiones térmicas producidas por restricciones de dilatación y contracción.	27
4.4.2. Tensiones térmicas producidas por gradientes de temperatura...	27
4.5. Choque térmico.....	27
4.6. Termofluencia	29
5. Transferencia de calor	33
5.1. Consideraciones generales	33
5.2. Difusión térmica	34
5.3. Conducción	35

5.3.1. Ley de Fourier	35
5.3.2. Ecuación diferencial de la conducción	36
5.4. Convección	37
5.4.1. Transferencia de calor en la capa límite	38
5.4.2. Convección natural.....	40
5.4.3. Convección forzada	41
5.5. Radiación	41
5.5.1. Modelo físico	41
5.5.2. Ley de Planck	42
5.5.3. Ley de Stefan-Boltzmann.....	42
5.5.4. Emisividad y ley de Kirchoff	43
6. Materiales compuestos.....	44
6.1. Consideraciones generales de los materiales compuestos.....	44
6.1.1. Composición de los materiales compuestos.	44
6.1.2. Clasificación de materiales compuestos.	45
6.2. Materiales compuestos de matriz metálica.....	55
6.2.1. Selección de matrices para MCMM.	55
6.2.2. Interfase matriz-refuerzo.	66
6.2.3. Refuerzos en MCMM.	67
6.3. Metodología de los procesos de fabricación	71
6.3.1. Procesamiento en estado sólido.....	71
6.3.2. Procesamiento en estado líquido	76
6.3.3. Fabricación aditiva	78
6.4. Selección de materiales definitivos.....	80
7. Simulación CFD.....	83
7.1 Introducción	83
7.2 Preprocesado.....	84

7.2.1. Planteamiento del problema	84
7.2.2. Condiciones de operación	85
7.2.3. Geometría de la tobera.....	87
7.2.4. Dominio y condiciones de contorno.....	88
7.2.5. Mallado.....	89
7.2.6. Modelos físicos	93
7.4. Cálculo y simulación en ANSYS Fluent®.	97
8. Resultados	100
8.1. Información general.....	100
8.2. Distribución de temperatura.....	102
8.2.1. Waspaloy / 50%W-Waspaloy	102
8.2.2. Ti-6Al-4V / TiC-Ti-6Al-4V.....	105
8.3. Análisis y contexto	109
9. Conclusiones.....	115
Bibliografía.....	117
Bibliografía	
Anexos	

1. Introducción

La tobera de un motor aerorreactor es el componente encargado de la producción de empuje para la propulsión de la aeronave. Transforma en energía cinética la energía de los gases restantes procedentes de la cámara de combustión que no han sido utilizados para el movimiento de la turbina, disminuyendo su presión y temperatura.

Las temperaturas que se alcanzan en la tobera son muy elevadas, por lo que este proceso requiere unas características muy concretas de los materiales para soportar la temperatura y la presión del ciclo. Como objetivo de este trabajo se estudiará la degradación producida en el material por acción de la temperatura, así como la transmisión de calor a través del material.

En la primera parte del trabajo se estudiarán los diferentes parámetros de la degradación térmica y transferencia de calor desde un marco teórico, tensiones térmicas producidas por restricciones mecánicas, expansión y deformación térmica, abrasión por temperatura extrema, además de transmisión de calor por convección y/o radiación y efectos y consecuencias en la eficiencia del proceso.

Seguidamente, se seleccionarán diferentes materiales con características potenciales para la fabricación de la tobera, que cumplan con los requisitos de resistencia térmica, se analizarán sus características. Posteriormente se aplicarán en el proceso de simulación para determinar cuál o cuáles son óptimos.

Para el desarrollo de este trabajo se partirá de un diseño de tobera convergente estándar ya que no es objetivo del trabajo el diseño de esta, sino analizar su comportamiento en situaciones de operación propias del componente. Además, se utilizará una tobera de motor turborreactor puro de área fija por motivos de complejidad.

2. Objetivos

- Analizar el comportamiento térmico de una tobera convergente fija de un motor turborreactor puro.
- Analizar parámetros térmicos y de transmisión de calor que puedan afectar a la vida útil del componente.
- Realizar investigación detallada de los procesos de fabricación de los materiales compuestos de matriz metálica (MCMM).
- Clasificar y seleccionar los refuerzos más adecuados para cada material e indicar cuales son potencialmente óptimos para su uso en la tobera en función de las propiedades mecánicas y térmicas que presentan.
- Aplicar conocimiento adquirido a diferentes materiales compuestos de matriz metálica aptos para el desempeño de las operaciones requeridas
- Analizar conclusiones y seleccionar materiales óptimos para resistencia térmica.
- Simular resultados a través de ANSYS Fluent®.
- Obtener situaciones de temperatura en régimen estacionario.
- Realizar conclusiones adecuadas de los datos obtenidos. Poner en perspectiva los resultados de transferencia de calor frente a propiedades mecánicas y fenómenos de degradación.

3. Principio de funcionamiento de una tobera

La tobera conforma toda una sección de escape del motor aerorreactor, subdividida en el cono de escape y la cubierta o sección convergente que conforma la propia tobera. El cono de escape es el encargado de la uniformidad del flujo de aire a la salida de la turbina. Reduce la velocidad del fluido hasta \sim Mach 0,5 para minimizar la turbulencia y evitar la reentrada del flujo en la turbina [1].

El principio básico de funcionamiento de una tobera consiste en la aceleración del flujo de aire que atraviesa el motor aerorreactor procedente de la cámara de combustión a presión y temperatura muy elevadas. Según lo establecido por la tercera ley de Newton, el incremento de velocidad en el flujo que se expulsa por la tobera generará un empuje de la aeronave en sentido opuesto por el principio de acción-reacción. Por la primera ley de la termodinámica se debe producir una conservación de la energía, por lo que para aumentar la velocidad de salida del aire tiene que producirse un cambio en la entalpía, es decir, reducirse la presión y la temperatura. Esta transformación de presión en velocidad viene definida por la ecuación de continuidad a través del principio de Bernoulli. Tanto la ecuación de continuidad, como las ecuaciones de conservación de la energía y de la cantidad de movimiento se describirán con más detalle en el capítulo 7, apartado 7.2.6 Modelos físicos [1] [2].

Se plantea un volumen de control conformado por las paredes físicas de la tobera y las áreas o secciones de entrada y salida como tapas imaginarias. En este volumen de control es posible considerar un estado estacionario ya que la tobera es un dispositivo de flujo permanente. Esto quiere decir que las propiedades del fluido no cambian con el tiempo a lo largo de la tobera. De esta manera se puede establecer un sistema estacionario, incompresible dado que al trabajar con una tobera convergente los gases de escape siempre alcanzarán velocidades subsónicas. Además, la masa, el volumen y la energía

permanecerán constantes como se demuestra con las ecuaciones de continuidad y de conservación de la energía (primera ley de la termodinámica).

Esta teoría es aplicable en el rango subsónico de velocidades, ya que si el aire se expande hasta alcanzar un número de Mach (M) $M=1$, se necesitaría seguidamente un conducto divergente para que este se siguiera expandiendo y así continuar aumentando su velocidad. Como ya hemos mencionado en la introducción, en este trabajo se utilizará únicamente tobera de sección convergente [3].

De manera ideal la tobera se considera isentrópica, es un proceso reversible, y adiabática, es decir, se considera que el flujo de calor a través de las paredes del sistema es nulo. Sin embargo, aunque se considere que la velocidad del flujo de aire a través de la tobera es lo suficientemente elevada para que las pérdidas térmicas sean despreciables y a efectos termodinámicos la transferencia de calor a través de las paredes del sistema se suponga nula, es necesario analizar como este fenómeno afecta a los materiales que componen la tobera. El comportamiento de estos materiales frente a las altas temperaturas repercutirá significativamente en el rendimiento del motor [1] [3].

4. Propiedades térmicas de los materiales

En este capítulo se realizará un estudio de las propiedades térmicas que presentan los materiales y que determinan las cualidades y el comportamiento de cada uno para resistir la degradación.

4.1. Capacidad calorífica y calor específico

La capacidad calorífica de un sólido es la propiedad que mide la capacidad de este para absorber calor de su entorno, es decir, es la cantidad de energía calorífica transmitida para aumentar la temperatura del cuerpo o sistema en una unidad. Se formula de la siguiente manera:

$$C = \frac{dQ}{dT} \quad (4.1)$$

$$Q = C \cdot \Delta T \quad (4.2)$$

y se expresa normalmente en función de moles de material, J/mol-K.

Sin embargo, es común usar el calor específico, que representa la capacidad de un objeto para almacenar calor, es decir, propiedad calorífica por unidad de masa,

$$c = \frac{C}{m} \text{ (J/kg - K)} \quad (4.3)$$

De esta manera podemos expresar la capacidad calorífica por unidad de masa, tal que:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T \quad (4.4)$$

lo que nos indica la cantidad de calor que es necesario aplicar para aumentar en un grado Kelvin la temperatura de un kilogramo de masa de sustancia.

Dependiendo de si realizamos las mediciones del calor específico a volumen o presión constante, obtendremos valores correspondientes representados por C_v y C_p respectivamente [4].

Capacidad calorífica vibracional

En los sólidos, la absorción de energía en forma de calor se produce a través del incremento de la energía vibracional de los átomos. El calor específico se ve afectado mayoritariamente por las vibraciones de fonones, los cuales se propagan por la red cristalina del sólido como un movimiento vibratorio o modo normal, en el cual las ondas oscilan con la misma frecuencia [5].

Podemos describir algunas propiedades térmicas de forma dual onda-partícula, a través de los fonones. Los fonones son análogos de los electrones en cuanto a su caracterización como partícula con energía propia o como onda con longitud y frecuencia establecidas. De esta manera los fonones interactúan con otros fonones y así transmiten su energía en cadena de manera continua en forma de calor [6]. A la temperatura del cero absoluto (0K) no existen fonones, pero al aplicar calor a los átomos de un material, estos ganan energía térmica y vibran a una amplitud y frecuencia determinadas [6].

Esta vibración se transmite de unos átomos a otros adyacentes, produciéndose una onda elástica que es el fonón. Al ser una onda podemos determinar su energía en función de su longitud de onda a través de la ecuación de Planck, la cual describe la proporcionalidad de la energía en función de su frecuencia de oscilación multiplicado por la constante de Planck (h) [5]:

$$E = h \frac{c}{\lambda} = h \cdot \nu \quad (4.5)$$

Esta energía vibracional que contribuye al calor específico a volumen constante varía con la temperatura en sólidos cristalinos, como son los metales, según describe la figura 4.1. En el cero absoluto la capacidad calorífica a volumen constante C_v es nula, aunque aumenta rápidamente con la temperatura. El modelo de Debye describe la contribución de los fonones a la capacidad calorífica en sólidos

En la figura 4.1 se muestra como por encima de la temperatura de Debye θ_D (representada por una línea horizontal discontinua) descrita en este método, la capacidad calorífica se va estabilizando, deja de depender de la temperatura y se aproxima al valor $3R$, siendo R la constante de los gases [4].

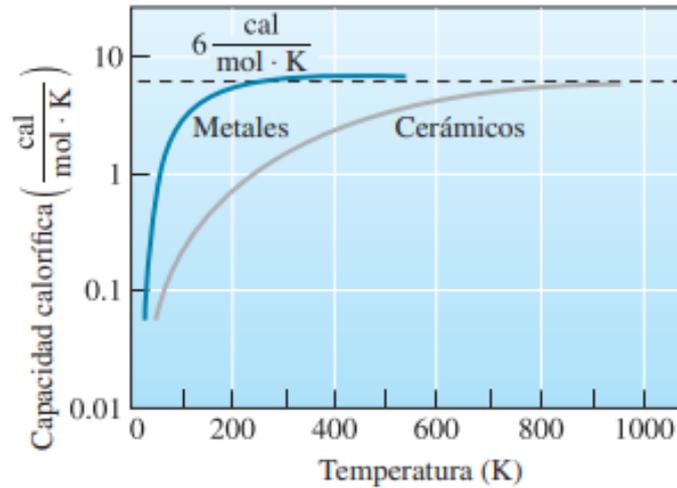


Figura 4.1 Capacidad calorífica en función de la temperatura para metales.
(Fuente: [5])

La capacidad calorífica de los materiales también está relacionada con la contribución de los electrones libres, los cuales aumentan su energía cinética al absorber energía. Sin embargo, esta contribución electrónica es prácticamente despreciable frente a la energía vibracional de fonones.

4.2. Dilatación térmica

Es el proceso de cambio en longitud de un material al ser calentado o enfriado, y se expresa de la siguiente manera:

$$\frac{l_f - l_0}{l_0} = \alpha_l(T_f - T_0) \rightarrow \frac{\Delta l}{l_0} = \alpha_l \Delta T \quad (4.6)$$

Se produce al realizarse cambios en la separación media entre átomos contiguos del material. Al aumentar la temperatura, los átomos absorben calor, por lo que la energía cinética vibracional de las moléculas también se incrementa. De esta forma aumenta la amplitud del movimiento vibracional, así como la frecuencia. Se obtiene una expansión del cuerpo al crecer la distancia entre moléculas.

Para poder explicar mejor este fenómeno se utiliza la figura 4.2. En ella se observa como a la temperatura del cero absoluto, y como ya se ha expuesto

con anterioridad en el apartado 4.1, la energía vibracional es mínima (E_1), no hay existencia de fonones. Al aumentar la temperatura aumenta la energía vibracional (E_2 , E_3).

La amplitud media de energía vibracional de cada átomo es la anchura de la curva a la temperatura determinada, y la distancia media entre átomos está representada por el punto medio, r_1 , r_2 y r_3 respectivamente. En la figura 4.2b vemos una curva simétrica por lo que la distancia media no varía. Para que se produzca dilatación térmica debe haber una asimetría en la curva de energía potencial, viéndose desplazada la distancia media entre átomos, como se muestra en la figura 4.2a [4].

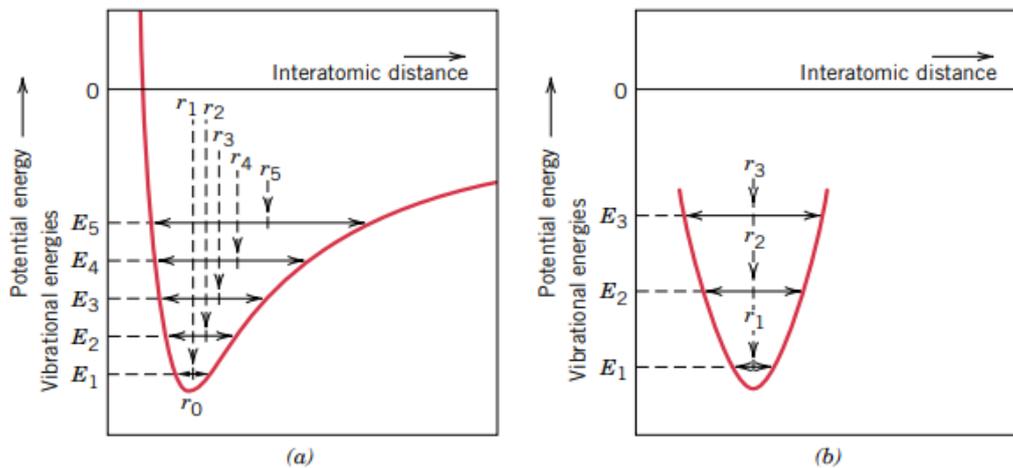


Figura 4.2 Curva de separación entre átomos frente a energía potencial en sólidos cuando se produce dilatación térmica (a) y cuando no (b), (Fuente: [4]).

Cuanto mayor es la energía de enlace entre átomos del material más profunda, estrecha y simétrica será la curva de energía potencial lo que se traduce en un incremento menor en la separación media entre átomos ante un cierto aumento de temperatura [4]. De esta forma, materiales como los metales, cuyos átomos están unidos mediante enlace metálico, poseen energías de enlace menores que las pertenecientes a enlaces covalentes e iónicos de materiales cerámicos o vidrios. Aplicado a la figura 4.2, se traduce en pozos de energía más simétricos cuanto mayor es la energía de enlace, que repercutirá en aumentos de distancia

interatómica menores. Por esta razón, los metales tendrán un coeficiente de dilatación térmica mayor que vidrios y cerámicos, aunque menor que el de los polímeros, ya que este coeficiente tiende a ser inversamente proporcional a la profundidad de la curva de energía potencial. Este comportamiento se puede relacionar también con la temperatura de fusión. Materiales con un coeficiente de dilatación térmica bajo tendrá un punto de fusión elevado [7].

El coeficiente de dilatación térmica (α) es un parámetro que se utiliza para indicar el grado de dilatación de un material al ser calentado, es decir, refleja la relación entre el aumento de dimensiones y el incremento de temperatura. Sus unidades son del inverso de la temperatura ($^{\circ}\text{C}^{-1}$):

$$\alpha = \frac{dL}{LdT} \quad (4.7)$$

Este coeficiente puede ser lineal, si el cambio en longitud se produce en una sola dimensión, de dilatación de área si el cambio producido es de superficie:

$$A_f = A_0 [1 + \gamma \cdot A (T_f - T_0)] \quad (4.8)$$

en cuyo caso el valor será dos veces el coeficiente lineal, $\gamma=2\alpha$, y un coeficiente volumétrico para cambios en volumen, que se calcula a partir de la siguiente formula:

$$\frac{\Delta V}{V_0} = \alpha_v \cdot \Delta T \quad (4.9)$$

Se debe tener en cuenta varios factores a la hora de analizar el coeficiente de dilatación térmica. Primero, es importante conocer la orientación del material con el que se trabaja. Los materiales anisotrópicos son aquellos que varían en sus propiedades tanto térmicas como mecánicas dependiendo de la dirección cristalográfica a través de la cual sean medidas. En cambio, un material isotrópico es el que mantiene propiedades iguales en cualquier dirección de análisis.

Por otro lado, es importante destacar que el coeficiente de dilatación térmica es dependiente de la temperatura, por lo que para trabajar con él es necesario seleccionar un rango determinado de temperaturas [7].

Si el material es isotrópico, podemos simplificar el valor de α_v como el triple del coeficiente lineal α . En el caso que se presenta, una sección de tobera sufrirá procesos de expansión tanto en dirección radial como axial. [4]

4.3. Conductividad térmica

La conductividad térmica es la capacidad de un material para transportar el calor de regiones a temperaturas elevadas a regiones de baja temperatura. Se define a través de la siguiente expresión:

$$q = -k \frac{dT}{dx} \quad (4.10)$$

donde k es la conductividad térmica del material, con unidades $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$, multiplicada por el gradiente de temperatura a lo largo del material conductor, y q indica el flujo de calor (calor que atraviesa una superficie perpendicular a la dirección del flujo por unidad de tiempo), con dimensiones de $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$. Esta ecuación representa el flujo de calor estable en el tiempo, es decir, en una situación estacionaria. El signo negativo indica que el sentido del flujo de calor, de caliente a frío, es contrario al gradiente de temperaturas.

La conductividad térmica de un material, es decir, el transporte de calor a través de un cuerpo se debe a los dos mecanismos desarrollados en el apartado de capacidad calorífica, vibraciones de la red (fonones) y electrones libres [4].

Los electrones libres, al ganar energía cinética se desplazan a zonas de menor temperatura, transfiriendo la energía a los átomos contiguos. La cantidad de energía que estos electrones transfieren dependerá del tipo de material, pues afecta la cantidad de electrones libres excitados, así como su movilidad. La suma de ambos constituye la conductividad térmica total [5].

4.4. Tensiones térmicas

Las tensiones térmicas son esfuerzos producidos en un cuerpo debido a variaciones de temperatura. Será necesario analizar estas tensiones de origen térmico, pues podrían desembocar en situaciones de fractura o deformación plástica, no deseables en la situación expuesta.

4.4.1. Tensiones térmicas producidas por restricciones de dilatación y contracción.

Estas tensiones solo se producirán si aplicamos restricciones mecánicas al material, como por ejemplo ensamblajes o extremos fijos, ya que, de lo contrario el cuerpo se dilatará y/o contraerá libremente. En caso de tensiones térmicas producidas a partir de dilatación y contracción restringidas, la tensión resultante (σ) debido a una variación de temperatura

$$\sigma = \alpha \cdot E \cdot \Delta T \quad (4.11)$$

donde α es el coeficiente lineal de dilatación, E es el módulo de elasticidad o módulo de Young y ΔT será la variación de temperatura desde la temperatura inicial hasta temperatura final. En este caso, al producirse un calentamiento, la tensión será de compresión, puesto que la dilatación está restringida, por lo que consecuentemente al enfriar, se producirá un esfuerzo de tracción [4].

4.4.2. Tensiones térmicas producidas por gradientes de temperatura.

Estas tensiones resultan de una distribución de temperaturas que no es uniforme en todo el volumen del componente, debido a su forma, conductividad térmica y velocidad del cambio de temperatura. La temperatura externa del cuerpo varía más rápidamente que la interna ante un cambio brusco de temperatura ya sea por calentamiento o enfriamiento, lo que produce un gradiente de temperatura que puede ocasionar tensiones térmicas internas.

Si calentamos una pieza, el exterior se dilatará más que el interior, y estos cambios dimensionales en volúmenes en contacto dentro de la misma pieza originan las tensiones. Esfuerzos de compresión en la superficie son contrarrestados por tracciones en el interior. Para una situación de enfriamiento el comportamiento del cuerpo será el opuesto, la superficie se someterá a un esfuerzo de tracción [5].

4.5. Choque térmico

El choque térmico es un problema que se produce con ciertos materiales a altas temperaturas. Es la fractura parcial o completa del material derivada de una carga mecánica como consecuencia de un cambio repentino en la temperatura.

Por lo general, está relacionado con la conductividad y la dilatación térmica. Si se impide una expansión térmica estable y uniforme pueden producirse fallas en el material, al igual que si un cambio brusco de temperaturas genera un gradiente de temperatura brusco, con las consecuentes tensiones internas, como se explicó en el apartado anterior de expansión térmica.

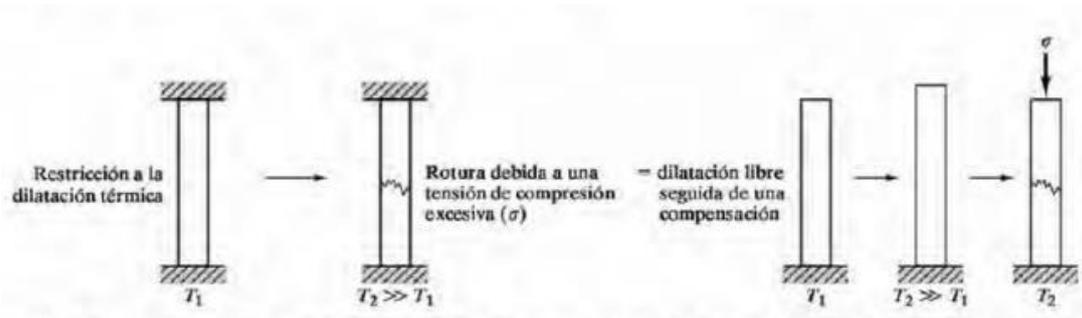


Figura 4.3 Choque térmico debido a las restricciones de expansión térmica
(Fuente: [4])

La figura 4.3 muestra el comportamiento de una barra ante la situación antes mencionada. El material se encuentra fijo cuando se aumenta la temperatura, se restringe la dilatación. Este fenómeno es equivalente a permitir una dilatación térmica en el mismo cuerpo y posteriormente aplicar una fuerza de compresión para recuperar las dimensiones previas a la expansión térmica [4].

Por otro lado, también se puede producir choque térmico del material aunque no existan restricciones, si en el material se crean gradientes de temperatura derivados de una conductividad térmica finita. Si la superficie de un material a alta temperatura se enfría rápidamente, aparecen tensiones de tracción en la superficie, la cual induce tensiones de compresión en el interior del material, a una temperatura todavía elevada, lo que deriva en fractura frágil en forma de grietas.

Los factores que más afectan a la producción de choque térmico son:

- Coeficiente de dilatación térmica: cuanto menor sea, menores serán los cambios dimensionales permitidos, por lo que la resistencia a choque térmico será menor.

- Conductividad térmica: una elevada conductividad térmica, favorece la conducción de calor a través del cuerpo y la eliminación de gradientes de temperatura, por lo que aumenta la capacidad de resistencia al choque térmico, como es el caso de los metales.
- Módulo de elasticidad: un módulo de elasticidad menor permitirá mayores deformaciones antes de alcanzar la fractura. Del mismo modo, un esfuerzo a la fractura elevado permitirá alcanzar mayores deformaciones previas a la tensión crítica.
- Calor específico: también influye en la resistencia al choque térmico. Cuanto más elevado sea el valor del calor específico, menor será la resistencia al choque térmico. El cambio de temperatura producido por una cantidad establecida de calor suministrado afectará a una sección menor del material cerca de la superficie, por lo que el gradiente de temperaturas entre el interior del cuerpo y la superficie será mayor.

Para poder cuantificar la resistencia al choque térmico de los materiales se puede utilizar el parámetro de choque térmico R , que depende de los factores expuestos previamente,

$$R = \frac{\sigma_f \cdot k(1 - \nu)}{E \cdot \alpha} \quad (4.12)$$

σ_f es el esfuerzo a fractura del material, ν es la razón de Poisson [8], que relaciona la deformación lateral con la deformación elástica longitudinal provocada por esfuerzos de tensión o compresión, k la conductividad térmica, E el módulo de elasticidad y α el coeficiente lineal de dilatación térmica. Este parámetro indica la variación máxima de temperatura permitida antes de producirse la fractura, y cuanto más elevado sea mayor resistencia al choque térmico tendrá el material. En el caso de los metales, el riesgo de fractura por choque térmico es bajo dada su elevada ductilidad que permita la deformación [5].

4.6. Termofluencia

La termofluencia es la deformación permanente y dependiente del tiempo cuando un material es sometido a cargas y esfuerzos constantes a temperaturas

elevadas. Aunque las tensiones a las que se someta el material sean inferiores a su límite elástico, la exposición a temperaturas elevadas puede reducir la resistencia a la deformación y producirse la fluencia. En materiales metálicos comienza a ser importante a partir de 0,4 veces la temperatura de fusión del material. Algunos fenómenos que contribuyen a que se produzca la termofluencia son la difusión y el desplazamiento de dislocaciones y límites de grano.

Si la velocidad de fluencia es alta y las temperaturas de operación son ciertamente bajas, se produce una ruptura por esfuerzo dúctil en un corto período de tiempo, acompañada de múltiples grietas. Si la temperatura de operación es alta y la velocidad de fluencia es menor que en el supuesto anterior, entonces se producirá una ruptura por esfuerzo de tipo frágil [5] [9].

La temperatura elevada afecta a las dislocaciones del material, los átomos se mueven por difusión desde o hacia la línea de dislocaciones, provocando un movimiento perpendicular de estas en vez de paralelo, lo que desemboca en un deslizamiento continuo y en deformaciones adicionales.

Como se observa en la figura 4.4, durante la primera etapa de la deformación, las dislocaciones se deslizan debido a obstáculos en la estructura cristalina. La segunda etapa o fase estacionaria comienza cuando estas dislocaciones se desplazan al mismo ritmo que son bloqueadas por otras imperfecciones de la red [5]. Este estado estacionario es explicable por los procesos de endurecimiento por deformación y recuperación. En el endurecimiento por deformación, el material se hace más resistente y duro por acción de la deformación plástica, aunque se ve perjudicado en su ductilidad. En la restauración por recuperación, parte de la energía almacenada debido a la deformación es liberada por el movimiento y la reducción del número de dislocaciones. El material recupera prácticamente en su totalidad las propiedades térmicas previas a la deformación [4]. En la tercera etapa se produce un incremento del esfuerzo acompañado de una deformación rápida, lo que provoca la falla o ruptura del material.

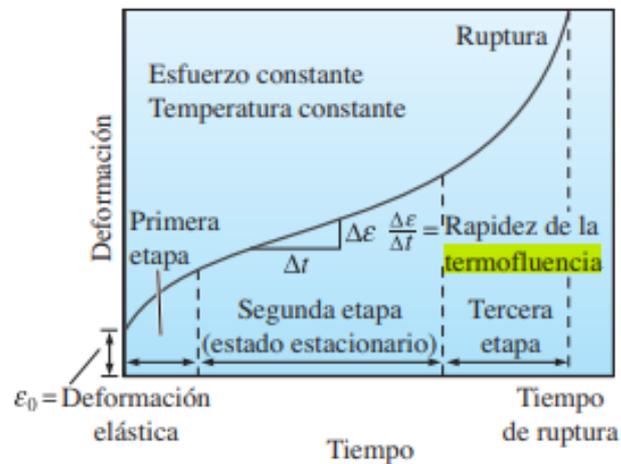


Figura 4.4 Curva de termofluencia y deformación producida. (Fuente: [5])

Existen dos mecanismos a través de los cuales se produce la termofluencia, termofluencia por dislocaciones o por difusión.

Termofluencia por dislocaciones.

La termofluencia por dislocaciones se debe al desplazamiento del plano de dislocación hasta otro plano paralelo, es decir, perpendicular a su dirección de desplazamiento habitual, produciendo la difusión de vacancias. Este tipo de difusión se debe al cambio de posición de los átomos, desde su posición reticular normal a posiciones vacías o “vacantes” dentro de la red cristalina. Este fenómeno denominado autodifusión, genera flujos de átomos y vacancia contrapuestos, ya que las vacancias se desplazan en sentido contrario a los átomos al ir ocupando estos los espacios vacíos [5].

Termofluencia por difusión.

La termofluencia por difusión se produce debido al desplazamiento de vacancias tanto en límites de grano como a través del grano. En situaciones de temperaturas altas y cuando las tensiones aplicadas no son muy elevadas, como es el caso de toberas de escape, predomina la termofluencia por difusión a través del propio grano, y recibe el nombre de termofluencia por difusión de tipo Navarro-Herring [4]:

$$\dot{\epsilon} = A_2 \frac{\sigma}{d^2 T} e^{-\left(\frac{Q}{RT}\right)} \quad (4.13)$$

donde ϵ es la velocidad de deformación, σ representa la tensión ejercida sobre el cuerpo, A_2 es una constante del material, d el diámetro del grano y Q la energía de activación para la difusión. La ecuación 4.13 sigue la estructura de relación de Arrhenius, ya que es un proceso térmicamente activado, y se observa que cuanto mayor sea el tamaño de grano, d , menor será la velocidad de deformación.

Para la mayor parte de los metales, los valores de energía de activación de la autodifusión suelen coincidir con los pertenecientes a la energía de activación de la termofluencia, como se puede observar en la figura 4.5 [9]. Esto refleja la importancia de la difusión en los procesos de termofluencia.

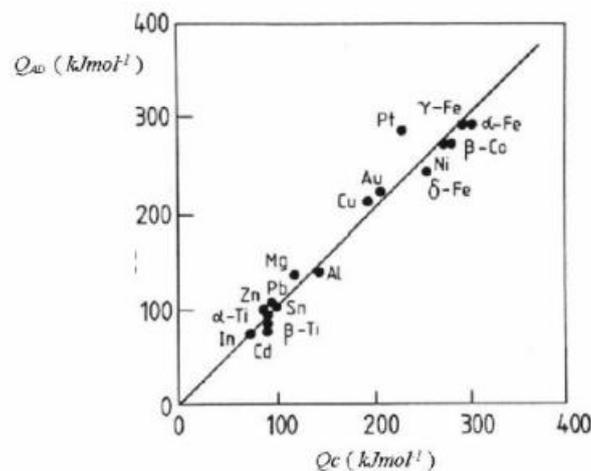


Figura 4.5 Energía de activación de autodifusión, Q_{AD} , frente a energía de activación de termofluencia, Q_C . (Fuente: [4]).

Materiales con temperatura de fusión elevada son favorables para la termofluencia ya que se ven afectados por este fenómeno a temperaturas superiores. De la misma forma, un material con elevado módulo elástico se traduce en pendientes pronunciadas de la recta esfuerzo-deformación, por lo que será necesario alcanzar valores más elevados de esfuerzos para producirse una separación entre átomos [5].

5. Transferencia de calor

5.1. Consideraciones generales

Para analizar la transferencia de calor que se produce desde el fluido en movimiento hacia las paredes de la tobera y posteriormente a través del propio material se debe resolver la ecuación de conservación de la energía como ya se ha presentado con anterioridad en este trabajo.

La tobera se comporta de forma adiabática, como se ha expuesto en el capítulo 3, por lo que el flujo neto de calor a través de las paredes se considera despreciable o prácticamente nulo a efectos termodinámicos del sistema. Sin embargo, el material sufre un aumento de temperatura debido a la fricción con el fluido y a la transferencia de calor que se produce entre este y las paredes de la tobera, por lo que no puede obviarse.

Para calcular la temperatura que alcanzará el material de la se tendrá en cuenta, por un lado, la transferencia de calor por convección desde el fluido de trabajo, en este caso el aire caliente procedente de la cámara de combustión del turborreactor, hasta la pared interna de la tobera y posteriormente la transmisión por conducción a través del material en la dirección axial. El componente de transferencia de calor mediante radiación que se pueda producir será insignificante en comparación a la magnitud de la convección para las temperaturas de servicio en las que se plantea el desarrollo de este trabajo [10].

Según el perfil de velocidades de la capa límite la velocidad del aire inmediatamente en contacto con la pared interna de la tobera es nula debido a la viscosidad, por lo que al ser un fluido estacionario la transferencia de calor de esta zona será por conducción. [11]

5.2. Difusión térmica

La transferencia de calor puede venir acompañada en ocasiones por procesos de transferencia de masa. La difusión es un fenómeno de movimiento o transporte de materia producido generalmente por gradientes de concentración inducidos en el fluido. La difusión trata de equilibrar las concentraciones transfiriendo materia de las zonas de alta concentración a zonas de baja concentración.

En el caso que se presenta, gradientes de temperatura pueden provocar también transferencia de materia, sin necesidad de haber un gradiente de concentraciones. A este proceso se le denomina difusión térmica, y se produce porque los átomos de regiones con temperaturas más elevadas tienen un movimiento o agitación térmica mayor que los átomos de zonas de temperaturas más bajas, por lo que se puede apreciar un flujo de partículas entre regiones [12].

En la difusión térmica, la densidad del flujo de difusión, es decir, la cantidad de materia que atraviesa transversalmente una superficie dada por unidad de tiempo, representada por j_T , se expresará tal que

$$j_T = \alpha_T \frac{1}{T} \frac{dT}{dn} \quad (5.1)$$

Donde α_T es el coeficiente de difusión térmica. Este coeficiente dependerá fuertemente de las concentraciones de especies, si estas disminuyen significativamente también lo hará el coeficiente de difusión térmica, puesto que si se reduce la presencia del elemento no podrá producirse tampoco su difusión.

Por lo general, en medios gaseosos, la difusión térmica se contrarrestará con la difusión convencional, ya que regiones a diferentes temperaturas generarán concentraciones dispares, que a su vez intentarán ser equilibradas por la propia difusión.

5.3. Conducción

Como se explicó en el apartado 4.3 Conductividad térmica del capítulo anterior, la transmisión de calor por el mecanismo de conducción se debe a la temperatura diferencial entre dos partículas en contacto. Es necesario que se cumplan ciertas condiciones en el material o en el elemento del que se quiere analizar la transmisión de calor [13].

- Se considera el material o los materiales en contacto como un medio continuo de transmisión, sin necesidad de describir el comportamiento atómico.
- Este medio presenta propiedades homogéneas e isotrópicas.
- No se tendrán en cuenta las variaciones volumétricas a causa de la temperatura, por ser despreciables en comparación al volumen de control.
- La generación de energía desde el interior del volumen será uniforme en todas las direcciones de transmisión.

5.3.1. Ley de Fourier

Para que se produzca transmisión de calor debe haber un desequilibrio en la distribución de temperaturas. Para un proceso estacionario y unidimensional, la distribución de temperaturas viene determinada por las superficies isotermas, lugares geométricos del volumen acotado que se encuentran a la misma temperatura. La transmisión de calor se producirá en dirección transversal ya que es donde existe el gradiente de temperaturas necesario para darse el fenómeno de conducción.

De esta forma, La ley de Fourier explica que el calor que atraviesa una superficie isoterma en un diferencial de tiempo será directamente proporcional al gradiente de temperaturas y que dependerá de la conductividad térmica del material

$$q = -k \cdot A \cdot \nabla T \quad (5.2)$$

para todas las direcciones de transmisión, y

$$q = -k_x \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} \quad (5.2)$$

para conducción unidimensional [12].

5.3.2. Ecuación diferencial de la conducción

Según el primer principio de la termodinámica, la variación de energía interna en un volumen de control es

$$dU = \delta Q_1 + \delta Q_2 \quad (5.3)$$

donde δQ_1 indica el calor neto que el volumen sólido intercambia con el entorno, y δQ_2 el calor suministrado por fuentes internas del objeto.

Partiendo del teorema de Gauss o teorema de la divergencia [14], es posible derivar el calor neto absorbido por el volumen de control, con criterio de signos contrario se obtiene el calor intercambiado con el exterior

$$-\frac{\delta Q_1}{dt} = \oint \vec{q} d\vec{S} = \int_V \vec{\nabla} \cdot \vec{q} dV \quad (5.4)$$

$$\delta Q_1 = - \left[\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right] dx dy dz dt \quad (5.5)$$

La ecuación 5.3 indica el balance de calor a través de todas las superficies de un volumen diferencial de control.

Ahora se expresa q_v como la potencia calorífica volumétrica aportada por la fuente interna de calor del volumen de control dv , es decir

$$\delta Q_2 = q_v dv dt = q_v dx dy dz dt \quad (5.6)$$

Si el cambio en la energía interna en un instante t se expresa como

$$dU = dC_v \cdot dT = dC_v \frac{dT}{dt} dt = \rho \cdot dv \cdot c_v \frac{dT}{dt} dt \quad (5.7)$$

donde C_v representa la capacidad calorífica del volumen de control en función del calor específico a volumen constante c_v y la densidad ρ . Sustituyendo las ecuaciones 5.5, 5.6 y 5.7 en la expresión de variación de energía (ecuación 5.3) y simplificando se obtiene la ecuación diferencial de transferencia de calor por conducción en procesos a volumen constante [15].

$$\rho \cdot c_v \frac{dT}{dt} = -\vec{\nabla} \vec{q} + q_v \quad (5.8)$$

Para un proceso estacionario en el que no existe variación de la temperatura con el tiempo, el término izquierdo de la ecuación será nulo. Si además suponemos que la generación interna de calor $\vec{\nabla} \vec{q}$ es nula, obtenemos una reducción significativa del equilibrio de energía, descrito solo por el intercambio de calor con el entorno.

5.4. Convección

Este mecanismo característico de los fluidos genera la transmisión de calor debido al movimiento de las moléculas que conforman el fluido. Si existe una diferencia de temperaturas entre una superficie en contacto con un fluido y el propio fluido, entonces se producirá intercambio de calor por convección, descrito por la ley de enfriamiento de Newton

$$q = h \cdot A \cdot (T - T_f) \quad (5.9)$$

Donde T es la temperatura del sólido, T_f la temperatura global del fluido, A el área en contacto y h el parámetro promedio a lo largo de toda la superficie del coeficiente de convección.

Para la obtención del coeficiente de convección se recurre al número de Nusselt, que es un parámetro sin dimensiones que depende de la conductividad térmica del material (k), de la longitud que caracteriza el problema y del propio coeficiente de convección

$$Nu = \frac{h \cdot L}{\lambda} \quad (5.10)$$

Por otro lado, el número de Reynolds detalla la relación entre las fuerzas viscosas y las fuerzas de inercia del fluido para determinar si el problema se desarrolla en régimen laminar en el que las capas del fluido están ordenadas, o turbulento, en el que predomina un desorden generaliza de las líneas de flujo, y varía según la fórmula

$$Re = \frac{\rho \cdot U_\infty \cdot c}{\mu} \quad (5.13)$$

donde ρ es la densidad, c la dimensión característica, U_∞ la velocidad del fluido y μ la viscosidad dinámica [12] [16].

5.4.1. Transferencia de calor en la capa límite

La capa límite es la región del fluido más cercana a la pared o superficie sólida del material. En la misma superficie se aplica la condición de contorno de no deslizamiento. Esto quiere decir que debido a la fricción del fluido entre la capa inmediatamente en contacto con el sólido y la pared, las fuerzas viscosas que se generan predominan sobre la inercia del fluido y provocan que este se frene hasta estar en reposo en esa zona concreta. En las capas a continuación de la capa límite la fricción es todavía importante y el fluido se encuentra en régimen laminar como muestra la figura 5.1, por lo que se puede producir transmisión de calor por conducción a través de esta capa y el sólido. El espesor de la capa límite (δ) se puede acotar de forma aproximada como la distancia a la pared desde el punto en el cual la velocidad del fluido es un 99% la velocidad global de la corriente, aunque dependiendo de la fuente consultada este valor puede reducirse hasta el 95% [11].

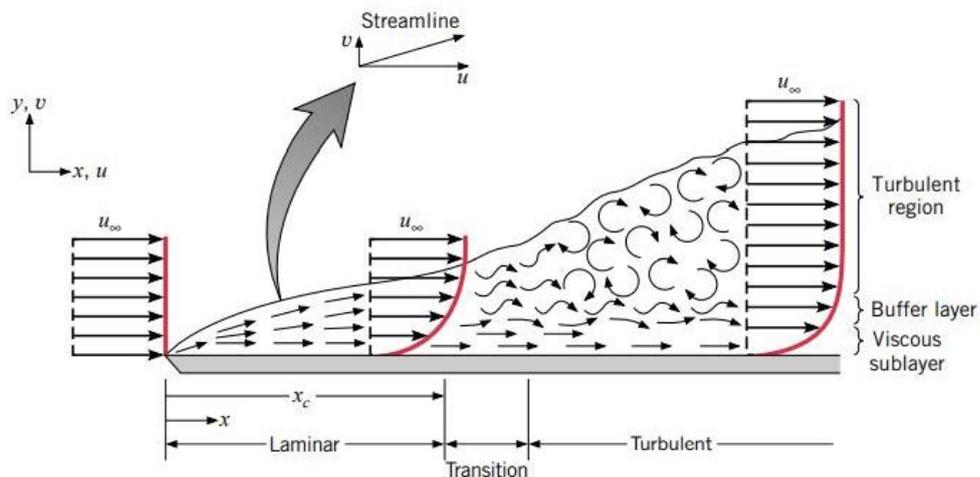


Figura 5.1 Evolución de la capa límite de velocidad (Fuente: [16]).

También es posible definir la capa límite de forma más precisa teniendo en cuenta que al producirse un gradiente de velocidades debido a la viscosidad, también se verán reducidos el flujo másico y la cantidad de movimiento del fluido en esa zona. Se determina así, el espesor de desplazamiento de la capa límite como la distancia desde la pared hasta el punto en el cual se mantendría

el flujo másico real bajo una condición de no viscosidad, y análogamente, el espesor de cantidad de movimiento como la distancia desde la pared al punto donde se mantiene el flujo de cantidad de movimiento, también bajo la suposición de viscosidad nula.

En la región de la capa límite también se produce un gradiente de temperatura debido a la transferencia de calor entre la capa límite en estado laminar y la pared sólida. Las partículas del fluido que se encuentran en contacto con la pared transmitirán calor al material por conducción y difusión. A su vez las capas de fluido contiguas también se equilibrarán térmicamente por conducción y difusión, configurando la capa límite térmica [11].

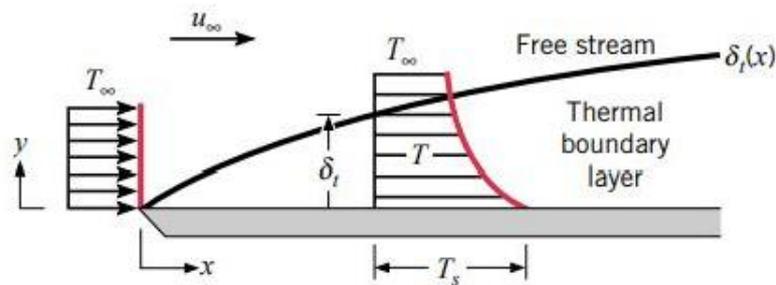


Figura 5.2 Capa límite térmica sobre placa plana. (Fuente: [10])

El espesor de esta capa (δ_t), Figura 5.2, se definirá de manera análoga a la capa límite de velocidad, la distancia entre la pared y el punto en el que se alcance el 99% de la temperatura global del fluido.

El número de Prandtl es un parámetro adimensional que se encarga de relacionar los espesores de la capa límite de velocidad y de temperatura.

$$\text{Pr} = \frac{C_p \cdot \mu}{k} \quad (5.12)$$

donde C_p es el calor específico, μ la viscosidad dinámica, y k la conductividad térmica.

En función del valor que adopte indicara la predominancia del tipo de difusión sobre el fluido. Para valores menores de 1, como el caso del aire a temperatura

ambiente, la difusión térmica prevalecerá sobre la difusión por concentraciones [12].

5.4.2. Convección natural

La convección natural se produce cuando un gradiente de temperaturas induce una diferencia de densidades en el fluido que originan el movimiento de este. Un objeto a una temperatura determinada se encuentra en un ambiente donde la temperatura del aire es inferior.

En la capa límite se produce una transferencia de calor por conducción de la pared del objeto al aire produciendo su aumento de temperatura en la región localizada adyacente a la pared. Esta masa de aire caliente, disminuye su densidad según la relación de los gases ideales, y por tanto asciende en la atmósfera. El espacio que queda libre es ocupado por otra masa de aire con una temperatura menor, originándose así una corriente de convección [17].

Para la convección natural el número de Nusselt se expresa en función del número de Prandtl y el número de Grashoff. Este último describe el comportamiento de la capa límite a partir de las fuerzas de flotación, que determinan el efecto de recirculación del fluido debido al aumento de su temperatura, y las fuerzas viscosas, y se expresa

$$Gr = \frac{\beta \cdot g \cdot \Delta T \cdot L^3 \cdot \rho^2}{\mu^2} \quad (5.13)$$

donde β es el coeficiente de expansión volumétrica. Los números de Prandtl y Grashoff se pueden escribir como producto, cuyo resultado es el número de Rayleigh (Ra) [11].

La convección natural será aplicable, como condición de contorno y junto a la radiación, a la pared externa de la tobera que se encuentra en contacto con el aire del ambiente para obtener los resultados de transferencia de calor. La correlación más adecuada para describir este proceso será el número de Nusselt en función del número de Prandtl y Grashoff, de la siguiente forma

$$Nu = 0,47 \cdot (Pr \cdot Gr)^{0,25} \quad (5.14)$$

También se debe analizar la proporción Gr/Re^2 para saber si la convección natural es despreciable sobre la forzada, sucediendo así cuando $Gr/Re^2 \ll 1$.

5.4.3. Convección forzada

La convección forzada se produce debido a corrientes que han sido provocadas de forma externa. Normalmente este proceso se describe a partir de correlaciones entre los números que ya se han descrito con anterioridad, en las que el Nusselt se expresa en función de los números de Reynolds y Prandtl multiplicados por una constante C,

$$Nu = C \cdot Re^m \cdot Pr^n \quad (5.15)$$

En el problema presentado en este trabajo, la convección forzada vendría descrita por la correlación de Dittus-boëlter para flujo turbulento en el interior de tubos

$$Nu = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,3} \quad (5.16)$$

puesto que es una situación de enfriamiento [10] [12].

5.5. Radiación

La transmisión de calor por radiación se realiza cuando un elemento cede parte de su calor a través de ondas electromagnéticas que se expanden sin necesitar un medio físico. El material absorbe esta energía para posteriormente emitirla a través de los átomos mediante fotones. La radiación es un fenómeno que se hace más predominante cuanto mayor es la temperatura, aunque por norma general se suele despreciar frente a la contribución de la conducción y convección. En este trabajo solo se tendrá en cuenta la radiación de la pared externa con el ambiente como condición de contorno de la tobera. La radiación del fluido interior no se calculará por razones de complejidad.

5.5.1. Modelo físico

La radiación térmica se propaga a través de ondas electromagnéticas en la región infrarroja a la velocidad de la luz, y que queda determinada por la frecuencia de la radiación (ν) y la longitud de onda (λ) de la forma

$$c = \lambda \cdot \nu \quad (5.17)$$

La energía transmitida se expresa según la teoría onda-partícula,

$$E = h \cdot \nu \quad (5.18)$$

siendo h la constante de Planck. La propagación de la radiación se considera como una partícula que tiene energía y masa determinadas.

Existen varios coeficientes que describen el comportamiento de la radiación al interactuar con un cuerpo.

- Factor de absorción (a): indica la proporción de energía incidente que es absorbida por el elemento
- Factor de reflexión (r): proporción entre energía incidente y energía reflejada por la superficie del cuerpo.
- Factor de emisión (e): proporción entre energía incidente y energía transmitida por el cuerpo.

Estos tres factores se relacionan entre si mediante un equilibrio energético, la suma de los tres debe ser igual a la radiación total que incide sobre el cuerpo

$$a + r + e = 1 \quad (5.19)$$

Para un cuerpo opaco, la radiación emitida será nula, para un cuerpo reflector perfecto, los factores de emisión y absorción serán cero, y para un cuerpo negro que absorbe toda la energía que incide sobre él, el factor de reflexión y de emisión serán nulos [12].

5.5.2. Ley de Planck

Un cuerpo negro es aquel que absorbe la totalidad de la energía que incide sobre él en todo el espectro de radiación. La ley de Planck permite determinar la intensidad de la radiación que emiten los cuerpos negros, según la expresión

$$E(\lambda, T) = \frac{\frac{2\pi c^2 h}{\lambda^5}}{e^{\left(\frac{hc}{k_B T \lambda}\right)} - 1} \quad (5.20)$$

siendo c la velocidad de la luz en el vacío, k_B la constante de Boltzmann ($1,381 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$) y h la constante de Planck ($6,625 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}^{-1}$) [12].

5.5.3. Ley de Stefan-Boltzmann

El poder emisor de un cuerpo se define como la potencia que este objeto irradia a una temperatura determinada y en todas direcciones y longitudes de onda del volumen que le rodea desde una superficie unitaria. Si esta superficie tiene un comportamiento de cuerpo negro, entonces su poder emisor se

calculará a partir de la integración de la ley de Planck en todo el espectro de longitudes de onda

$$E^0(T) = \int_0^{\infty} E_{\lambda}^0(\lambda, T) d\lambda \quad (5.21)$$

obteniendo la ley de Stefan-Boltzmann

$$E^0(T) = \sigma \cdot T^4 \quad (5.4)$$

Donde σ es la constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$). Si se analiza la ecuación 5.21, se puede observar que la constante de Boltzmann es tan pequeña que a bajas temperaturas no permite una radiación térmica significativa. Sin embargo, al aumentar considerablemente la temperatura, el término cuadrático consigue que la radiación predomine sobre otros fenómenos, como convección y conducción.

5.5.4. Emisividad y ley de Kirchoff

Se define emisividad total de un cuerpo no negro como el cociente entre el poder emisivo de este cuerpo no negro, E , y el perteneciente a un cuerpo negro en las mismas condiciones de temperatura e intervalo del espectro de ondas, E^0 .

$$\epsilon_{\lambda} = \frac{E(T)}{E^0(T)} = \frac{\int_0^{\infty} \epsilon_{\lambda} \cdot E_{\lambda}^0(\lambda, T) d\lambda}{\sigma \cdot T^4} \quad (5.5)$$

De la ecuación 5.22 se deduce que el poder emisivo para un cuerpo cualquiera vendrá dado por

$$E(T) = \epsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (5.6)$$

La ley de Kirchoff expone que un cuerpo que esté en equilibrio térmico con el ambiente en el que se encuentra tendrá emisividad y capacidad de absorción iguales. De esta forma, un cuerpo con baja capacidad de absorción también tendrá baja emisividad, y viceversa [12].

6. Materiales compuestos

6.1. Consideraciones generales de los materiales compuestos

Con el objetivo de obtener los materiales con las mejores cualidades para el desempeño de acciones específicas se han desarrollado durante los últimos años los materiales compuestos.

Con carácter generalizado, un material compuesto se define como la unión artificial de dos o más materiales (fases) con el fin de obtener una mejora significativa de las propiedades que no sería posible conseguir con los materiales convencionales simples. Además, cumplen algunas condiciones concretas que los diferencian de otras combinaciones de materiales, como las aleaciones metálicas, las cerámicas y polímeros multifásicos. Estos últimos compuestos también están formados por la unión de varios materiales, pero no cumplen alguno de los requisitos expuestos a continuación, por lo que quedan excluidos de la clasificación de materiales compuestos [18].

Los materiales compuestos deberán tener una separación física y mecánica macroscópicamente apreciable (heterogeneidad), por lo que las propiedades serán diferentes en su volumen. Esta característica es uno de los aspectos más interesantes de los materiales compuestos, puesto que las propiedades aportadas por la matriz se complementarán con las del refuerzo, como se explicará a continuación.

Por otro lado, los materiales presentarán diferencias químicas en sus fases constituyentes, y estarán separadas por una intracara o interfase, lo que los hace insolubles entre sí. Este aspecto genera uno de los principales puntos débiles de los materiales compuestos como es la dificultad de fabricación y la incompatibilidad de algunos materiales [19].

6.1.1. Composición de los materiales compuestos.

Los materiales compuestos están formados por una fase continua, la matriz, y una fase discontinua o dispersa denominada refuerzo.

6.1.1.1. Fase continua, matriz.

La matriz es la fase continua que rodea a la fase discontinua, el refuerzo queda inmerso dentro de la matriz. Principalmente la matriz es la encargada de conferir las propiedades químicas y físicas del compuesto final y soportar los esfuerzos de compresión, así como dar forma y cohesionar el material. También presenta las siguientes características:

Cuando se aplican esfuerzos de tracción sobre el material, la matriz transfiere la carga al refuerzo, por lo que es importante obtener una buena adhesión matriz-refuerzo.

La matriz es la portadora de las propiedades térmicas y del comportamiento químico y eléctrico.

Protege las fibras del refuerzo durante el proceso de manufactura y posteriormente a lo largo de su vida útil.

6.1.1.2. Fase dispersa, material de refuerzo.

Es la fase discontinua añadida a la matriz con el objetivo de complementar principalmente las propiedades mecánicas, aunque también se pueden utilizar para el desarrollo de propiedades térmicas.

Es importante que, en el caso que se presenta, el coeficiente de expansión térmica tenga valores similares en la matriz y en el refuerzo para evitar dilataciones térmicas dispares que conlleven a separaciones en la interfase y en definitiva a fracturas del compuesto [4].

6.1.2. Clasificación de materiales compuestos.

Es posible separar los materiales compuestos atendiendo a los diferentes refuerzos que se pueden utilizar, esquematizados en la figura 6.1.

6.1.2.1. Materiales compuestos reforzados con partículas.

Los materiales compuestos reforzados con partículas son aquellos en los que el refuerzo es un material duro que se encuentra repartido de manera uniforme en forma de partículas y envuelto por una matriz más blanda. Esta combinación de matriz-refuerzo se seleccionan mayoritariamente por ser combinaciones poco usuales y no tanto por sus propiedades mecánicas. A su vez, podemos

diferenciar dos tipos de refuerzo con partículas atendiendo al tamaño y naturaleza de estas.

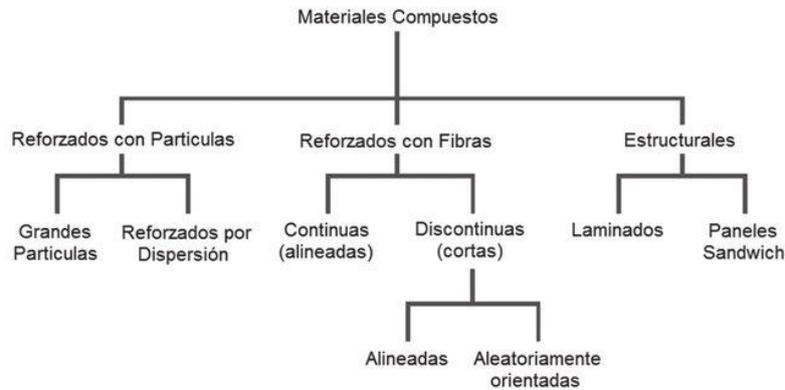


Figura 6.1 Clasificación de materiales compuestos según refuerzos. (Fuente: [4])

6.1.2.1.1. Materiales compuestos endurecidos por dispersión.

En aquellos compuestos reforzados por dispersión las partículas son de un tamaño de entre 10 y 100 nanómetros (nm, 1×10^{-9} m) generalmente, pudiendo llegar hasta los 250 nm, pero las interacciones partícula-matriz se producirán siempre a escala molecular o incluso atómica. La matriz es la encargada de aguantar las cargas, mientras las partículas inertes impiden el deslizamiento de dislocaciones, aumentando de esta manera el límite elástico y disminuyendo el riesgo de sufrir deformación plástica y en definitiva fluencia a elevadas temperaturas, en relación con lo expuesto en el apartado de termofluencia perteneciente al capítulo de este documento. Esta mejora de la resistencia se mantendrá a altas temperaturas ya que las partículas seleccionadas tendrán una escasa reactividad con la matriz [4].

Cabe destacar la importancia de que los componentes no reaccionen químicamente entre ellos, al igual que la solubilidad matriz-partícula. Una baja solubilidad, sin llegar a ser nula, favorecerá la unión entre fases.

6.1.2.1.2. Materiales compuestos reforzados con partículas grandes.

Este tipo de refuerzo se caracteriza por no poder apreciar las interacciones entre la matriz y el refuerzo (partícula) a nivel molecular, solo macroscópicamente. Las partículas presentan frecuentemente dimensiones muy aproximadas, equiaxiales, y mejorarán la efectividad del refuerzo con la disminución del tamaño y el aumento de la homogeneidad [18].

Por otro lado, se produce una mejora de las propiedades mecánicas del material al aumentar la cantidad de partículas, es decir las propiedades mecánicas dependen de la fracción volumétrica de cada una de las fases constituyentes, V_n . Estas relaciones se expresan mediante la regla de las mezclas. Así, la densidad de un material compuesto particulado, ρ_c , formado por n -constituyentes con densidades ρ_n será

$$\rho_c = \sum (f_i \cdot \rho_i) = V_1\rho_1 + V_2\rho_2 + \dots + V_n\rho_n \quad (6.1)$$

Si analizamos el módulo elástico a partir de la regla de las mezclas se obtiene que el módulo de elasticidad del compuesto, E_c , dependerá en gran medida de las fracciones volumétricas de cada fase. Estas ecuaciones indican un valor máximo,

$$E_c = E_m \cdot V_m + E_p \cdot V_p \quad (6.2)$$

y un valor mínimo,

$$E_c = \frac{E_m \cdot E_p}{V_m \cdot E_p + V_p \cdot E_m} \quad (6.3)$$

Los subíndices m y p indican matriz y partícula respectivamente [4] [7].

6.1.2.2. Materiales compuestos reforzados con fibras.

Los materiales compuestos reforzados con fibras son los más extendidos y con mayor importancia en el ámbito industrial y de ingeniería.

Se fabrican con el fin de aumentar la rigidez y resistencia a la tracción, pero al utilizar materiales de baja densidad tanto en la matriz como en el refuerzo, se obtienen excelentes valores de resistencia y módulo elástico específicos. Para poder clasificarlos se debe estudiar la morfología, longitud y orientación de las fibras dentro de la matriz.

6.1.2.2.1. Longitud y diámetro de la fibra.

Para determinar las propiedades mecánicas del compuesto influyen no solo las propias características de la fibra, sino también la interacción de esta con la matriz a través de la interfase.

Al producirse la transferencia de cargas desde la matriz a las fibras del refuerzo tras aplicar un esfuerzo de tracción, la unión de la matriz con la fibra en los extremos finaliza y comienza una deformación de la matriz en el eje longitudinal de la fibra, como se indica en la figura 6.2. Por lo tanto, no existe transferencia de carga desde la matriz en los extremos de la fibra. Así, la configuración ideal será la que contenga menor número de extremos en las fibras, es decir, aquellas de mayor longitud [5].

Para poder medir la tensión máxima que es posible aplicar sobre el compuesto, se debe establecer una proporción dimensional adecuada para las fibras y analizar la longitud crítica, que varía en función de la resistencia a tracción, σ_f , de la resistencia de la unión entre fases, τ_c , y del diámetro de la fibra, d , de la forma

$$l_c = \frac{\sigma_f \cdot d}{2\tau_c} \quad (6.4)$$

Dependiendo de la longitud de la fibra seleccionada se pueden producir tres situaciones distintas. Si la longitud es igual a la longitud crítica solo se obtendrá una carga máxima en el centro axial de la fibra.

Para longitudes superiores a la longitud crítica, aumenta gradualmente la efectividad del refuerzo ya que se obtiene la carga máxima en una sección mayor de la fibra. En casos donde la longitud de la fibra es muy superior a la longitud crítica, aproximadamente $l > 15 l_c$, las fibras actúan como fibras continuas [4].

Cuanto menor sea la longitud de la fibra respecto de la longitud crítica, mayor deformación sufrirá la matriz y no se producirá transferencia de cargas hacia la fibra, por lo que el refuerzo será ineficaz. Las situaciones comentadas se encuentran representadas en la figura 6.3.

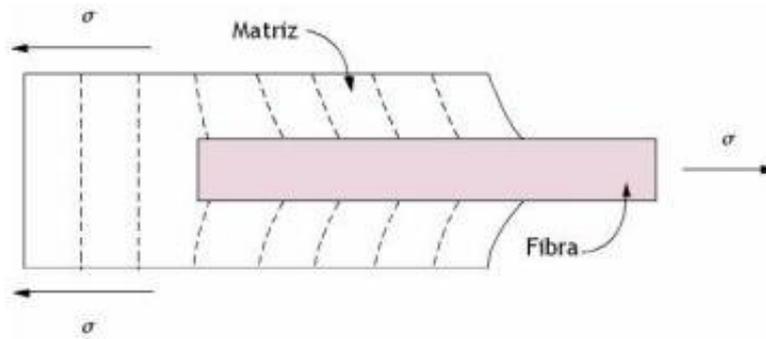


Figura 6.2. Patrón de deformación de una matriz que rodea a una fibra sometida a un esfuerzo de tracción. (Fuente: [10])

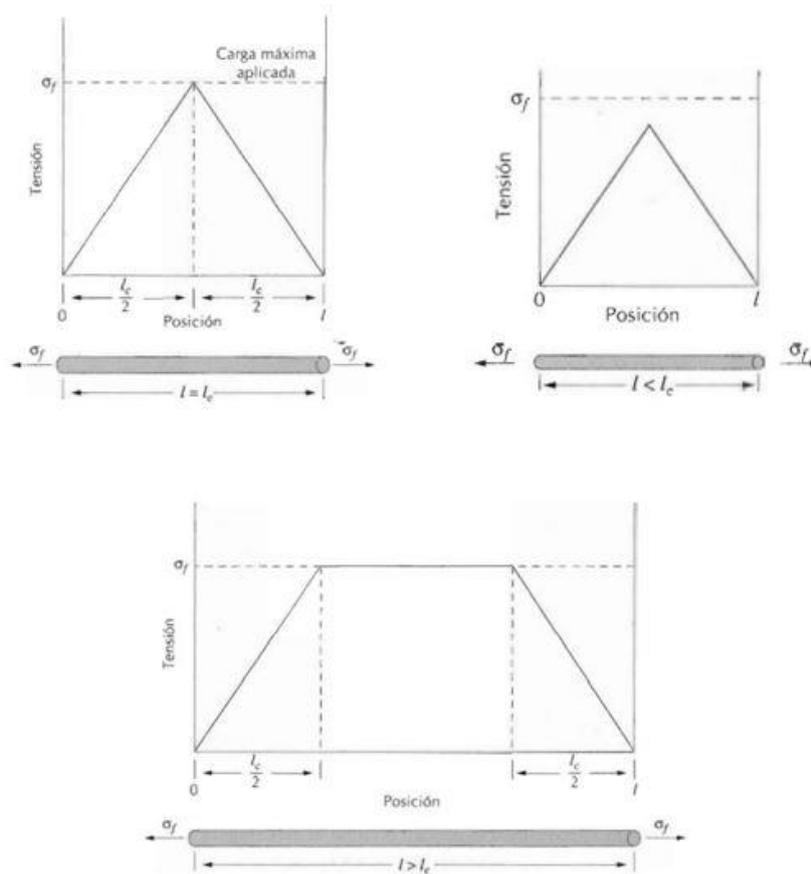


Figura 6.3 Perfiles esfuerzo-posición en diferentes situaciones de l_c de un compuesto reforzado con fibra (Fuente: [10])

El diámetro de las fibras es también un aspecto importante para tener en cuenta al evaluar las propiedades del compuesto. Una fibra con un diámetro menor será menos propensa a sufrir agrietamientos o imperfecciones en la

superficie que puedan provocar una rotura. En función de la magnitud del diámetro las fibras se pueden clasificar en tres grupos: alambres, whiskers o bigotes y fibras. Los whiskers suelen ser materiales cristalinos y se caracterizan por ser los de menor diámetro. Poseen excelentes valores de resistencia debido a la práctica ausencia de imperfecciones, pero su uso no está muy extendido debido a su alto coste y dificultad de manufactura. Las fibras están conformadas por materiales de tipo policristalino o amorfo y tienen diámetros pequeños, aunque superiores a los whiskers. Los alambres son los de mayor diámetro y su coste de fabricación es el más asequible

6.1.2.2.2. Orientación y concentración de la fibra.

Las propiedades del compuesto variarán según la disposición de las fibras en la fase continua. Si la fracción de volumen de las fibras aumenta, se producirá una mejora en las propiedades mecánicas del compuesto como la resistencia y/o la rigidez, tal y como describe la regla de las mezclas, hasta encontrar un límite cercano al 80%, donde la matriz es incapaz de recubrir totalmente a las fibras.

En cuanto a la orientación, las fibras en sus diferentes configuraciones presentarán un determinado carácter anisótropo, es decir, la magnitud de sus propiedades varía significativamente dependiendo de la dirección en la que se analicen. Por esta razón es interesante componer dichas fibras de forma superpuesta en diferentes direcciones para obtener buenos patrones de resistencia en cualquier orientación.

6.1.2.2.3. Materiales compuestos con fibras continuas alineadas.

De nuevo, la regla de las mezclas describe con exactitud la densidad del compuesto:

$$\rho_c = V_m \cdot \rho_m + V_f \cdot \rho_f \quad (6.5)$$

Así como otras propiedades de interés como su conductividad térmica.

$$k_c = V_m \cdot k_m + V_f \cdot k_f \quad (6.6)$$

Donde k_m y k_f son las conductividades térmicas de la matriz y la fibra respectivamente [5]. Sin embargo, si las fibras no se encuentran alineadas

unidireccionalmente o no son continuas, la regla de las mezclas no describirá con exactitud las propiedades mecano-térmicas del compuesto.

- Cargas longitudinales. Un material compuesto con fibras alineadas presenta carácter anisotrópico, por tanto, se considera que el esfuerzo se aplica en la dirección longitudinal o dirección en la que se alinean las fibras con la matriz, suponiendo una deformación igual en ambas fases. Así, la carga final del material compuesto, F_c , se podrá escribir como suma de las cargas soportadas por matriz y fibra, F_m y F_f respectivamente. Si se define cada carga como el producto del esfuerzo correspondiente por su área de aplicación, se obtiene la siguiente expresión:

$$\sigma_c \cdot A_c = \sigma_m \cdot A_m + \sigma_f \cdot A_f \quad (6.7)$$

Al dividir por la sección de área del compuesto se consigue las relaciones o fracciones de área de cada fase, y además estableciendo una longitud idéntica para matriz y fibra, las fracciones de área serán equivalentes a las respectivas fracciones de volumen. Así,

$$\sigma_c = \sigma_m \frac{A_m}{A_c} + \sigma_f \frac{A_f}{A_c} \quad (6.8)$$

$$\sigma_c = \sigma_m V_m + \sigma_f V_f \quad (6.9)$$

Como ya se indicó en este mismo subapartado, se supone isodeformación entre matriz y fibra, por lo que es posible dividir la ecuación 6.6 por la respectiva deformación de cada término:

$$\epsilon_c = \epsilon_m = \epsilon_f \quad (6.10)$$

$$\frac{\sigma_c}{\epsilon_c} = \frac{\sigma_m}{\epsilon_m} V_m + \frac{\sigma_f}{\epsilon_f} V_f \quad (6.11)$$

Si las deformaciones de cada fase y del compuesto son elásticas, se puede afirmar entonces que el módulo elástico E se expresa tal que $E = \sigma/\epsilon$ para cada fase respectiva. Sustituyendo finalmente se obtiene

$$E_c = E_m \cdot V_m + E_f \cdot V_f \quad (6.12)$$

El módulo de elástico de un material compuesto reforzado con fibras continuas será proporcional a la suma de los módulos elásticos de cada fase multiplicado por las respectivas fracciones volumétricas. Se puede observar que la ecuación 6.12 es equivalente a la ecuación 6.1, valor máximo de la regla de las mezclas para materiales compuestos reforzados con partículas [4].

Cuando el esfuerzo al que se someta el compuesto alcance valores muy elevados la matriz sufrirá deformación y dejará de contribuir a la rigidez, por lo que el módulo de elasticidad del material pasará a expresarse únicamente en función de la fibra:

$$E_c = E_f \cdot V_f \quad (6.13)$$

- Cargas transversales. En este caso la carga aplicará de forma perpendicular al eje longitudinal alineado de las fibras, por lo que los esfuerzos a los que se encuentran sometidos el compuesto y las fases son iguales y se le denomina estado isotensionado. La deformación del compuesta vendrá dada por la expresión

$$\epsilon_c = \epsilon_m V_m + \epsilon_f V_f \quad (6.14)$$

la cual puede simplificarse, al igual que el caso anterior, sustituyendo $\epsilon = \sigma/E$ y dividiendo por el esfuerzo σ :

$$\frac{1}{E_c} = \frac{V_m}{E_m} + \frac{V_f}{E_f} \quad (6.15)$$

que transformada a

$$E_c = \frac{E_m \cdot E_f}{(1 - V_f)E_f + V_f \cdot E_m} \quad (6.16)$$

Lo que deja a la vista de nuevo la equivalencia en este caso con el valor mínimo de la regla de las mezclas para compuestos reforzados con partículas. El refuerzo de compuestos con fibras continuas alineadas en la dirección transversal no se realiza frecuentemente ya que se puede producir la rotura del material al aplicar cargas de tracción bajas [4] [5].

6.1.2.2.4. Materiales compuestos con fibras discontinuas alineadas.

Por norma general, los refuerzos con fibras discontinuas no son tan eficaces como los refuerzos de fibras continuas. Sin embargo, se pueden obtener mejoras sustanciales en la resistencia a tracción, por encima incluso de los refuerzos anteriormente mencionados.

Para valores de longitudes superiores a la longitud crítica, la resistencia a la tracción del material compuesto, $(TS)_c$ se expresa como

$$(TS)_c = (TS)_f \cdot V_f \left(1 - \frac{l_c}{2l}\right) + (TS)_m \cdot V_m \quad (6.17)$$

siendo $(TS)_f$ la resistencia a la fractura de la fibra y $(TS)_m$ la tensión soportada por la matriz en la rotura del compuesto.

En caso de que la longitud de la fibra sea inferior a la longitud crítica la resistencia a tracción longitudinal vendrá descrita por la expresión

$$(TS)_c = V_f \frac{l\tau_c}{d} + (TS)_m(1 - V_f) \quad (6.18)$$

donde τ_c es la resistencia de la unión interfásica y d el diámetro de la fibra.

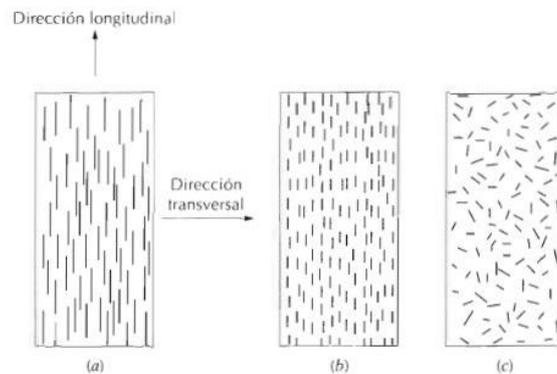


Figura 6.4 Representación de fibras continuas alineadas (a), discontinuas alineadas (b) y discontinuas orientadas aleatoriamente (c).

6.1.2.2.5. Materiales compuestos con fibras discontinuas orientadas aleatoriamente.

En este caso, el módulo elástico del material compuesta se expresa de forma similar a la regla de las mezclas del refuerzo por partículas:

$$E_c = K \cdot E_f \cdot V_f + E_m \cdot V_m \quad (6.19)$$

La magnitud K es un parámetro que varía entre 0.1 y 0.6 y representa la eficiencia de la fibra, la cual varía con la fracción volumétrica de la fibra y con la relación entre módulos elásticos de las fases. Aunque la eficacia de este tipo de refuerzo es inferior al resto, cuenta con propiedades mecánicas de tipo isotrópico, lo que se presenta como una gran ventaja al mantener las características en cualquier dirección de análisis [4] [19].

6.1.2.3. Materiales compuestos estructurales.

Los materiales compuestos estructurales son aquellos que se encuentran formados tanto por materiales compuestos al uso como por materiales homogéneos, y cuyas propiedades varían no solo con el tipo de material, sino con la geometría utilizada en su diseño. Se presentan dos tipos, compuestos estructurales laminares y los paneles sándwich.

6.1.2.3.1. Materiales compuestos laminares.

Este tipo de material está conformado por láminas que presentan valores altos de resistencia, por lo general, en una dirección de preferencia, como puede suceder en las fibras alineadas continuas.

En este caso, se realiza un apilamiento de varias capas, cambiando la dirección con mayor resistencia en cada una. Se obtiene así un material compuesto con una resistencia razonable en todas las direcciones contenidas en el plano de disposición de las láminas, pero inferior en comparación con la resistencia que se obtendría acumulando todas las fibras en una misma dirección.

6.1.2.3.2. Paneles sándwich.

Es un tipo de material compuesto formado por dos paneles o láminas contrapuestos que albergan un núcleo en el espacio intermedio. Las láminas se encargan de resistir las cargas en las direcciones del plano en el que están contenidas, así como esfuerzos perpendiculares de flexión. Por otro lado, el núcleo está fabricado generalmente por un material con menor densidad y rigidez que los paneles y se encarga de resistir las deformaciones transversales a las láminas. También resiste los esfuerzos de cizalladura perpendiculares a los paneles [19].

6.2. Materiales compuestos de matriz metálica

Los materiales compuestos de matriz metálica o MCMM, (del inglés *Metal Matrix Composites*) están compuestos por un metal o aleación de metales en su fase continua y generalmente reforzados con fibras metálicas o cerámicas [5].

La utilización de metales como matriz es interesante por varios aspectos. La ductilidad del metal favorece la fabricación y adaptación al refuerzo. Las temperaturas de operación que pueden alcanzar los MCMM son superiores a las de otros compuestos de diferente matriz, y debido a su menor densidad se consiguen valores de resistencia y modulo elásticos específicos bastante elevados.

De este modo, el principal objetivo de la fabricación materiales compuestos de matriz metálica en comparación con metales, aleaciones base y otros materiales compuestos es mejorar la resistencia a la termofluencia, aumentar la resistencia a fatiga, disminuir el coeficiente de expansión térmica, aumentar la conductividad térmica buscando la máxima transferencia de calor, y en definitiva mantener los mejores requisitos mecano-térmicos al exponerse a elevadas temperaturas [7].

Dentro de la clasificación de MCMM podemos diferenciar entre materiales utilizados para procesos de fabricación en operaciones de desgaste o corte, que son generalmente metales de transición o metales denominados duros, cobalto hierro y níquel entre otros, y un segundo grupo denominado aleaciones ligeras, constituido por aluminio, magnesio y titanio como metales base. Este segundo grupo es de principal interés para el desarrollo de este trabajo ya que cumplen con los requisitos y propiedades descritas con anterioridad, tales como elevada resistencia y modulo específicos gracias a su baja densidad.

6.2.1. Selección de matrices para MCMM.

Como se expuso en el anterior apartado, los metales que desarrollan las cualidades más interesantes en su función de matriz en el material compuesto son titanio, aluminio y magnesio. A continuación, se describen sus características y propiedades, así como posibles combinaciones en aleaciones

para la formación de la fase continua y valoración de compatibilidad con diferentes refuerzos aplicado al sector aeronáutico para la fabricación de componentes de motores y elementos estructurales.

6.2.1.1. Aluminio

El aluminio junto, con algunas de sus aleaciones, es el metal con mayor trayectoria en el ámbito de producción de MCM. Las razones principales de su éxito se deben a su ligereza, coste, facilidad de procesado y eficacia frente a la corrosión por oxidación. Las aleaciones más utilizadas son Al-Cu-Mg (serie 2000), Al-Mg-Si (serie 6000), Al-Zn-Mg-Cu (serie 7000).

Recientemente se están desarrollando aleaciones Al-Li (serie 8000). Al añadir Li en proporciones de 0.5-3.5% se consigue una importante reducción de la densidad del compuesto ya que el litio es el metal más ligero, con una densidad de 0.534 g/cm^3 .

El litio produce un aumento de la rigidez debido a la estabilidad de la aleación, pudiendo elevar hasta un 6% el módulo elástico con la adicción de un 1% de litio. Además, las aleaciones AL-Li mejoran su comportamiento a altas temperaturas en comparación con otras aleaciones similares como las serie 7000. [20]

Algunos de los compuestos de matriz de aluminio más interesantes principalmente a su baja densidad y resistencia específica son:

- Láminas de aleación de aluminio dispuestas en capas intercaladas con fibras continuas de boro. El compuesto se procesa mediante compactación en caliente.
- Aleación de aluminio reforzada con partículas de alúmina, Fabricación por pulvimetalurgia y proceso de infiltración [21].

A continuación se observa en la tabla 6.1 una comparación de propiedades térmicas y mecánicas de las aleaciones descritas.

Tabla 6.3 Comparación de propiedades térmicas y mecánicas de aleaciones de aluminio interesantes. (Fuente: [21] [22])

	Aluminio	7050-T7451	8090-T8771
Composición (%)	Al (+99)	Al (87-90) Zn (5,7-6,7) Mg, Cu (2-2,6)	Al (95) Li (2,2-2,7)
Temperatura de fusión (K)	933	797-908	873
Temperatura máxima de servicio (K)	373	373	380
Densidad (g/cm ³)	2,7	2,83	2,54
Módulo elástico (GPa)	70,6	71,7	77
Resistencia a tracción (MPa)	130-195	524	515
Conductividad térmica (W/mK)	205-213	158-171	95,3
CTE ($\cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$)	23,5	23,5-24,2 (293-573K)	$2,14 \cdot 10^{-6}$
Calor específico (J/kg-K)	900	960-1030	930

6.2.1.2. Titanio

El titanio es un metal de transición que se caracteriza por su buena proporción resistencia-densidad. Debido al elevado punto de fusión mantiene sus propiedades mecánicas al incrementar considerablemente la temperatura, y tiene un excelente comportamiento frente a la corrosión al crear una capa de óxido que lo impermeabiliza y evita la adhesión de residuos. Sin embargo, generalmente sufre problemas de compatibilidad con el refuerzo por su alta reactividad química durante el procesado a altas temperaturas, razón por la cual su procesado mediante pulvimetalurgia es de especial importancia, como se desarrollará en el apartado 6.4 de metodología de los procesos de fabricación. Además, los costes de extracción y manufactura son altos, por lo que el precio final del material compuesto será elevado.

El titanio es el único metal con dimorfismo de los clasificados como ligeros. Su estructura es de tipo hexagonal compacta (HCP) durante la fase α , hasta los 882°C (1155 K), temperatura a la que sufre una transformación alotrópica y pasa a ser estructura cúbica centrada en el cuerpo (BCC), titanio fase β .

6.2.1.2.1 Obtención de titanio- β

Si se realiza una aleación del titanio con alguno de los materiales considerados betágenos, es decir, estabilizadores de la fase β , se podrán obtener aleaciones de titanio- β por transformación de no equilibrio por debajo de la temperatura de transición, o una combinación de ambas (aleaciones α - β) independientemente de la temperatura. Esto se consigue sometiendo el titanio a un proceso de endurecimiento por precipitación. El titanio en fase α se calienta hasta transformarse en titanio- β y a continuación se enfría rápidamente mediante un proceso de templado. Los átomos no son capaces de recuperar por difusión las posiciones previas al calentamiento debido al rápido descenso de la temperatura. Si el porcentaje del aleante estabilizador es lo suficientemente elevado, se puede evitar la formación de martensita y obtener titanio- β de forma metaestable [23].

6.2.1.2.2. Aleaciones de titanio.

6.2.1.2.1. Aleaciones Ti- α

Las aleaciones Ti- α contienen una microestructura conformada casi en su totalidad por elementos de la fase α y no pueden realizarse cambios estructurales mediante tratamiento térmico ya que no se superaría la temperatura de transición (cambiaría el tipo de aleación), por lo que la mejora de propiedades no sería apreciable.

Sin embargo, puede conseguirse un desarrollo de las propiedades mediante endurecimiento por deformación con posterior recocido para eliminar tensiones residuales. Aleaciones con estaño o circonio, y principalmente con aluminio, tienen un comportamiento excelente ante temperaturas elevadas, y poseen una resistencia a la fluencia superior a las de aleaciones β y α - β [24].

6.2.1.2.2. Aleaciones Ti- β

Las aleaciones β , en contraposición con las aleaciones α , pueden ser sometidas a procesos de endurecimiento para la mejora de propiedades, con relación a lo

descrito en el apartado 6.2.1.2. Al ser calentadas de forma moderada o durante procesos de endurecimiento por deformación puede producirse una ligera transformación de fase β a α ya que es la tendencia propia del material para alcanzar el equilibrio. Con esta pequeña dispersión de partículas α se pueden conseguir propiedades interesantes a temperatura ambiente. Sin embargo, por esta misma razón no es una aleación apta para su servicio a altas temperaturas ya que al aumentar la temperatura aumentaría la precipitación de dichas partículas.

6.2.1.2.3. Aleaciones Ti- α - β

La obtención de aleaciones α - β se consigue aplicando proporciones determinadas de elementos que estabilicen la fase β , y realizando un control de temperatura y velocidad de enfriamiento en los procesos térmicos utilizados. Así, se controlará la precipitación deseada de fase α sobre la retención de fase β conseguida con los procesos mencionados en el apartado 6.2.1.2.1.

Estas aleaciones también son propensas a sufrir endurecimiento por precipitación, obteniendo de esta forma una mejora sustancial en la resistencia a termofluencia, principalmente si se añade Si en la aleación en proporciones superiores al 0,1 %, como Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo-0,1Si [25]. Otra aleación, Ti-6Al-4V, es la más utilizada en el sector aeroespacial. La tabla 6.2 sirve como referencia para comparar las propiedades de las aleaciones que se mencionan.

Tabla 6.4 Comparación de propiedades térmicas y mecánicas de aleaciones de titanio interesantes. (Fuente: [24], [26], [27])

	Titanio α	Ti-6Al-4V	Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo-0,2Si
Composición (%)	Ti (+99)	Ti (88-91) Al (5,5-6,75) V (3,5-4,5)	Ti (86) Al (6) Zr (4) Sn, Mo (2) Si (0,2)
Temperatura de fusión (K)	1943	1880-1930	1913
Temperatura máxima de servicio (K)	580	630-670	780-839
Densidad (g/cm ³)	4,51	4,41-4,45	4,52-4,56
Módulo elástico (GPa) Ref. a 770 K	100 (288K)	79-84	86-92
Resistencia a tracción (MPa) Ref. a 770 K	345-500 (288K)	560-715	685-760
Conductividad térmica (W/mK)	20,5-20,7	7,1-7,3	6,9-7,48
CTE ($\cdot 10^{-6} K^{-1}$)	8,5-9,3	8,7-9,1	7,74-8,14
Calor específico (J/kg-K)	535-545	528-548	477-496

6.2.1.3. Magnesio

El magnesio es un metal que destaca por su reducida densidad, es aproximadamente un tercio más ligero que el aluminio, y tiene buena conductividad térmica y coeficiente de expansión térmica reducido. Debido a su estructura cristalina hexagonal, con pocos planos de deslizamiento, posee resistencia y ductilidad relativamente bajas, aunque en aleación con otros metales, mejoran apreciablemente. Sin embargo, sufre problemas importantes frente a la corrosión y un descenso en las propiedades al aumentar significativamente la temperatura. Algunas de las aleaciones más utilizadas en la industria aeronáutica son ZE41A-T5, conformada por un 3,5-% de Zn y hasta un 1% de Zr, o AZ91, combinación de 8,3-9,7% de Al y hasta un 1% de Zn [21] [27]. También se encuentran en desarrollo aleaciones de Mg con materiales denominados tierras raras, tales como Ce, Nd, Y. Las aleaciones base magnesio presentan problemas de resistencia a fluencia. Al aumentar la temperatura se compromete la estabilidad de la reacción, se induce rápidamente el deslizamiento de los límites de grano y el trepado de dislocaciones. De esta forma la temperatura máxima de servicio de las aleaciones de magnesio es casi en su totalidad inferior a los 200°C (473 K), por lo que no serían aptas para su uso como material de tobera [27].

6.2.1.4. Superaleaciones

En este apartado se concentran aquellas aleaciones denominadas de alto rendimiento o superaleaciones, por sus excelentes propiedades mecánicas, resistencia a la corrosión y buen comportamiento a temperaturas muy elevadas, ya que son capaces de operar a temperaturas mucho más cercanas a su punto de fusión que otras aleaciones convencionales. Destaca principalmente la excelente resistencia a sufrir termofluencia y falla por fatiga, son capaces de mantener las propiedades sin sufrir una degradación significativa al estar expuestas a entornos extremos de forma continua. Las superaleaciones se clasifican según el constituyente principal, que son Ni, Fe-Ni o Co [28]. Generalmente la estructura de los elementos base suele ser FCC (cúbica centrada en las caras). Las propiedades de la superaleación no solo dependen de los elementos, sino también del porcentaje de cada componente, así como

de los tratamientos a los que se vea sometida. Las superaleaciones pueden pasar por procesos de endurecimiento por solución sólida o por precipitación.

El endurecimiento por solución sólida es un método para mejorar las propiedades, en este caso, de aleaciones con base níquel o cobalto principalmente, que se realiza introduciendo átomos de metales que han sido incluidos en la aleación en huecos vacíos o posiciones intersticiales de la red cristalina, o sustituyéndolos por átomos del elemento base en sus posiciones reticulares. Esta difusión atómica genera interferencias con las dislocaciones del metal original, lo que aumenta la resistencia [4].

Las superaleaciones también pueden sufrir endurecimiento por precipitación. En la matriz se producen precipitados de algunos materiales como boruros y/o carburos metálicos que se encargan de controlar las imperfecciones en el límite de grano y el tamaño de este.

Debido al proceso de endurecimiento por precipitación de una aleación se pueden producir compuestos intermetálicos formados por mínimo dos elementos metálicos que actúan como fase dispersa en la aleación [5]. Al añadir cierta cantidad de un metal, comienza a precipitar una nueva fase desencadenada por la sobresaturación de la matriz, con una estructura cristalina similar a la del elemento base. En el caso de generalmente, aleaciones con base Ni, la solución sólida que hace de matriz (Ni) recibe el nombre de fase gamma (γ), y la fase dispersa que precipita sobre la matriz se denomina fase gamma prima (γ'), normalmente formada por Al o Ti. A continuación, se realizará una comparación entre las propiedades de diferentes superaleaciones aplicadas en la industria aeronáutica [29].

A continuación se representan en la tabla 6.3 las propiedades más interesantes de diferentes superaleaciones utilizadas en la industria aeronáutica. Las figuras 6.5 y 6.6 son representaciones gráficas de propiedades mecánicas como resistencia a tracción y módulo elástico. Es interesante observar como evolucionan sus valores al incrementarse la temperatura de exposición.

Tabla 6.3 Comparación de propiedades térmicas y mecánicas de superaleaciones. (Fuente: [30] [27])

	Hastelloy X	Waspaloy	Inconel 718	MP159
Clasificación	Superaleación base Ni	Superaleación base Ni	Superaleación base Fe-Ni	Superaleación base Co
Proceso térmico	Endurecimiento por solución sólida	Endurecimiento por precipitación	Endurecimiento por precipitación	Endurecimiento por precipitación
Composición (%)	Ni (41-54) Cr (20-23) Fe (17-20) Mo (8-10) Co (0,5-2,5) W (0,2-1)	Ni (50-62) Cr (18-21) Co (12-15) Mo (3,5-5) Ti (2,8-3,2) Al (1,2-1,6)	Ni (50-55) Cr (17-21) Fe (11-25) Mo (2,8-3,3) Nb, Ta (2,4-2,8) Ti (0,65-1,2) Al (0,2-0,8)	Co (34-38) Ni (21-29) Cr (18-20) Fe (8-10) Mo (6-8) Ti (2,5-3,5) Nb (0,25-0,75)
Densidad (g/cm³)	8,18 - 8,26	8,21 - 8,29	8,13 - 8,26	8,32 - 8,4
Punto de fusión (K)	1530 - 1630	1603 - 1630	1530 - 1613	1530 - 1683
T^a máxima de servicio (K)	1300 - 1420	1030 - 1116	905 - 978	605 - 645
Módulo elástico (GPa) Ref. a 770 K	180	188-198 (Figura 6.5)	172 (Figura 6.5)	205 (Ref. a 645 K)
Resistencia a tracción (MPa) Ref. a 770 K	580-640	945-1040 (Figura 6.5)	1190 (Figura 6.5)	1600-1900 (Ref. Máxima)
Conductividad térmica (W/mK)	10,4 - 11,3	11,6 - 12,6	11,6 - 12,6	12 - 13
CTE ($\cdot 10^{-5} K^{-1}$)	1,37-1,44	1,22 - 1,29	1,28-1,34	1,42-1,49
Calor específico (J/kg-K)	481-501	513-534	440 - 458	420 - 460

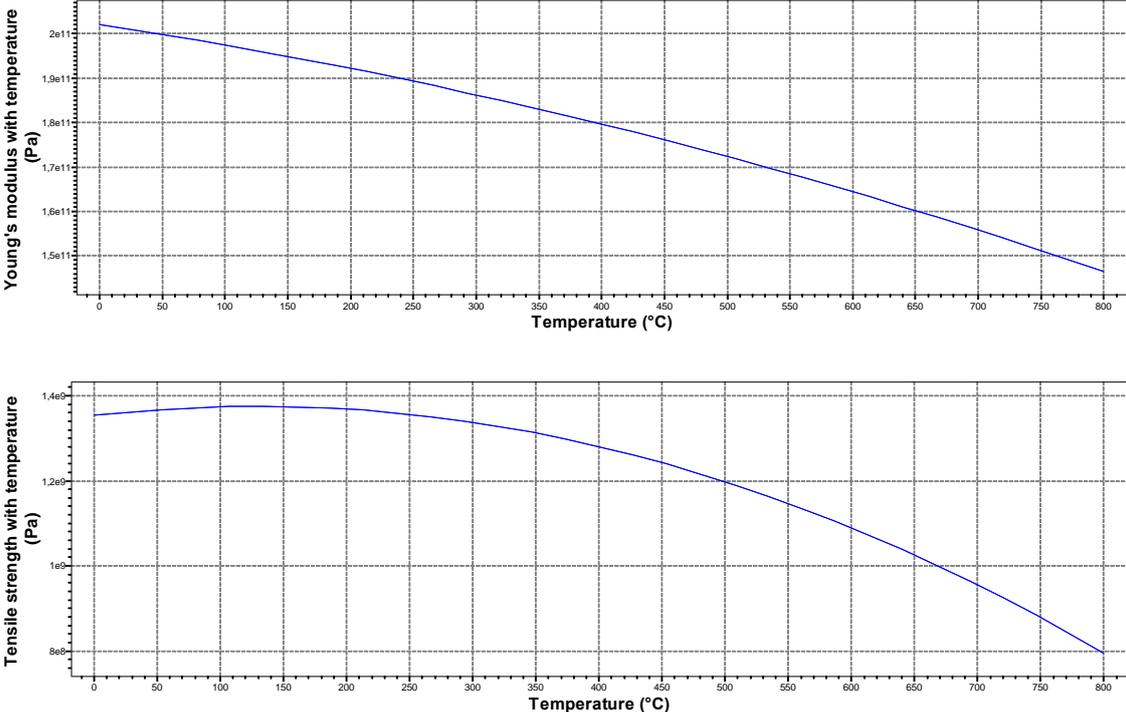


Figura 6.5 Módulo elástico (superior) y resistencia a tracción (inferior) en función de la temperatura de Inconel 718. (Fuente: [27])

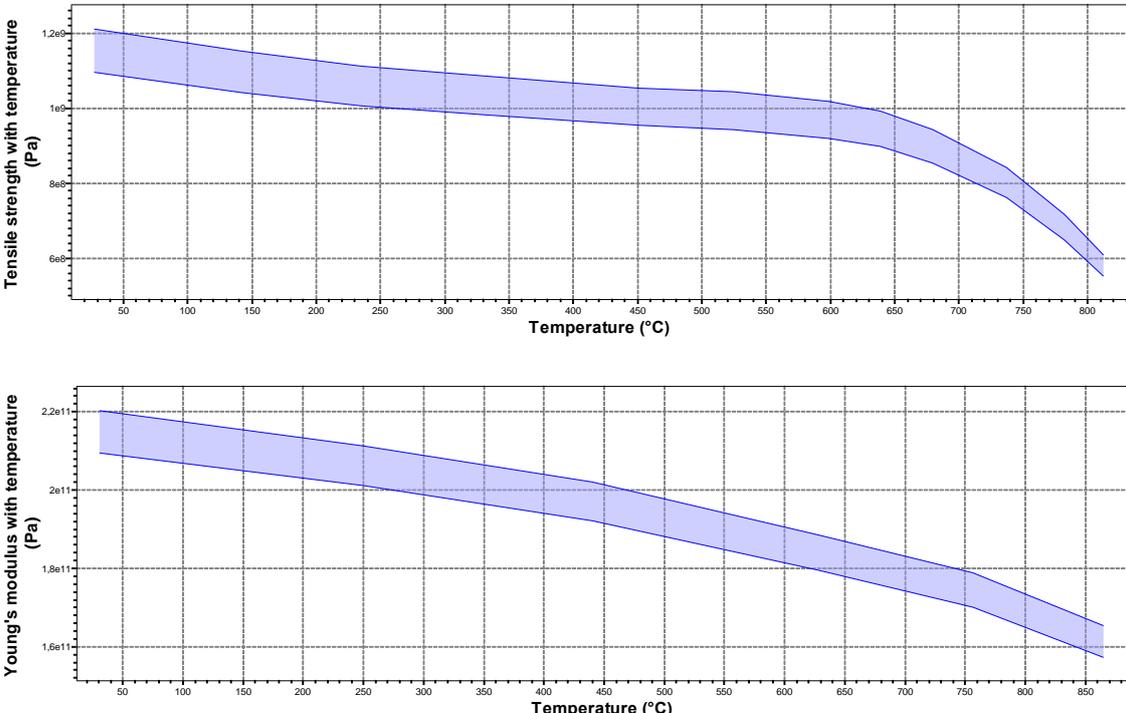


Figura 6.6 Módulo elástico (superior) y resistencia a tracción (inferior) en función de la temperatura de Waspaloy. (Fuente: [27])

6.2.1.5. Compuestos intermetálicos independientes

Es necesario hacer una distinción entre compuestos intermetálicos que conforman la fase dispersa de una superaleación y compuestos intermetálicos independientes, de gran interés por sus propiedades mecano-térmicas. Un caso especial es la aleación Ti-Al. Presenta cualidades similares al titanio, pero con resistencia a fluencia y a corrosión mejoradas.

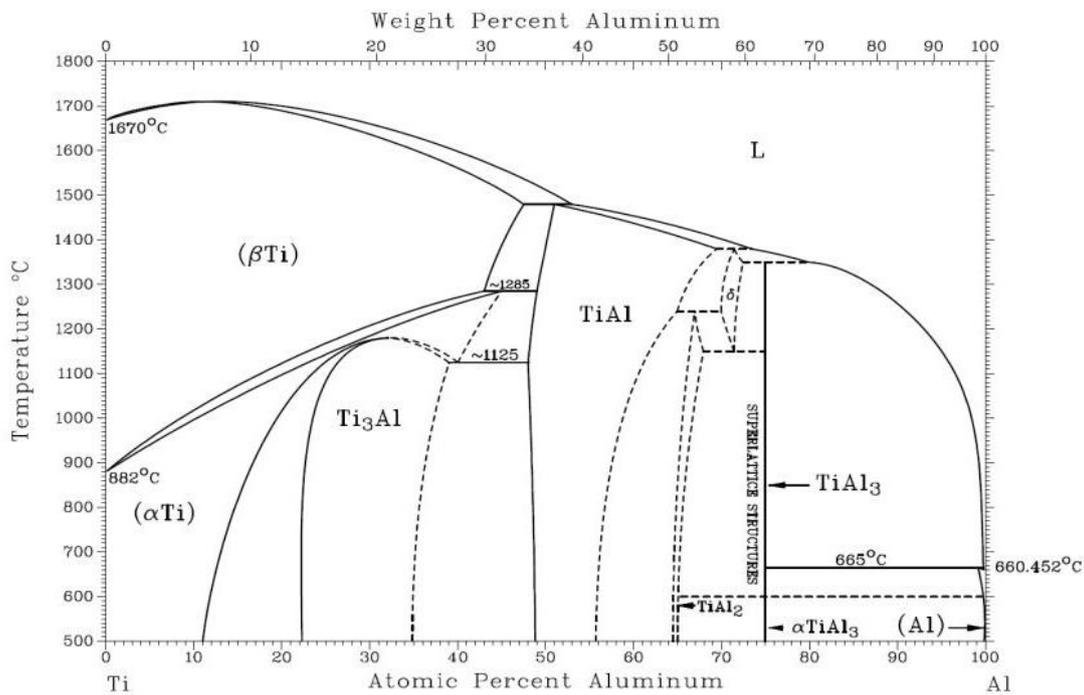


Figura 6.7 Diagrama de fases Ti-Al (Fuente: [29])

Como describe el diagrama de fases del compuesto intermetálico en la figura 6.7, si se tiene un porcentaje en el intervalo 22-48% de aluminio el compuesto obtenido será Ti₃Al. En cambio, para una composición de aluminio comprendida entre valores 48,5-66% se consigue TiAl. Estos valores pueden verse modificados dependiendo de la adicción de materiales como Cr, Mn o Nb, que son estabilizadores de la fase β de Ti y que mejoran ciertas propiedades. El Nb aumenta la ductilidad al introducir sus átomos en posiciones reticulares de la red cristalina del titanio.

Los compuestos intermetálicos utilizados como matriz en MCM son una opción que se ha desarrollado más recientemente. Los aluminuros de titanio TiAl y Ti₃Al ofrecen características aún superiores a aleaciones de titanio convencionales. El refuerzo más indicado es el de fibra continua, ya que mejora el principal punto débil de los compuestos intermetálicos, la baja ductilidad y tenacidad, que dificulta el mecanizado [31]. Se deben tener en cuenta dos importantes factores, similar a otros casos, como es el coeficiente de expansión térmica (CTE), y la compatibilidad matriz-refuerzo, que limitará en mayor o menor medida la temperatura máxima de servicio del material. Una de las principales aplicaciones de refuerzos en aluminuros de titanio intermetálicos es a partir de fibras continuas de SiC a las que se les ha aplicado un recubrimiento de carbono para protegerlas de la reactividad de Ti [26].

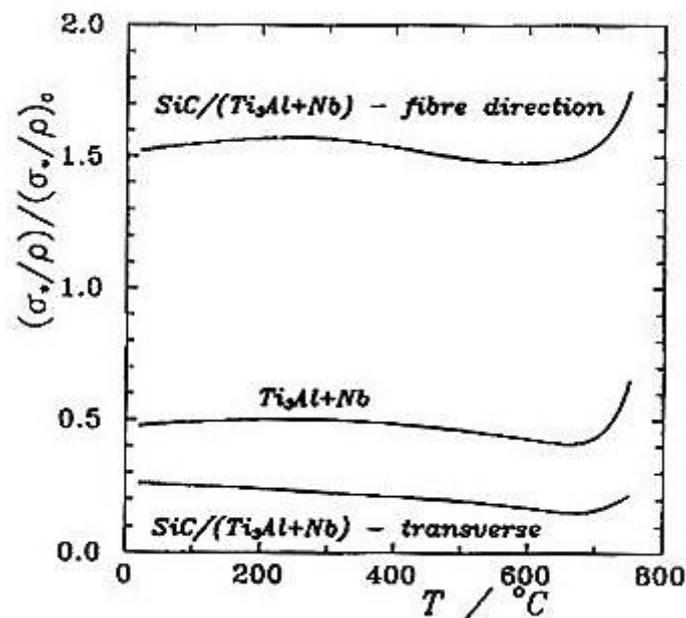


Figura 6.8 Comparación de resistencia específica en función de temperatura de compuesto intermetálico Ti₃Al con y sin refuerzo de fibras SiC. (Fuente: [32])

6.2.2. Interfase matriz-refuerzo.

La obtención de condiciones óptimas en la unión matriz-refuerzo garantizará la correcta transferencia de cargas al refuerzo y las mejores propiedades del

material compuesto. Para conseguirlo es necesario el cumplimiento de ciertas condiciones

El mojado, o capacidad de extensión de un líquido o refuerzo, principalmente de infiltración, sobre un sólido o matriz de fundición, debe tenerse en cuenta y ser de buena calidad. La matriz disolverá parcialmente los elementos del refuerzo pudiendo formarse un compuesto químico adicional en la interfase que desencadene inestabilidades.

Las uniones deben ser estables independientemente del tiempo y del rango de temperaturas de operación para garantizar una transmisión de cargas correcta.

Los coeficientes de expansión térmica de la matriz y del refuerzo deben ser lo más similares posible para evitar la acumulación de tensiones en el interior del compuesto, sobre todo en aquellos que vayan a estar expuestos a ciclos térmicamente exigentes [21].

6.2.3. Refuerzos en MCMM.

6.2.3.1. Refuerzo de partículas.

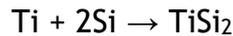
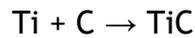
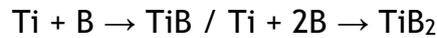
Las principales ventajas de los refuerzos discontinuos son su reducido coste económico, mayor facilidad de fabricación y la presencia de isotropía en sus propiedades mecano-térmicas. El principal punto desfavorable es la obtención de peores propiedades mecano-térmicas.

Inicialmente estos refuerzos cerámicos se producían por separado y posteriormente se añadían a la matriz mediante técnicas convencionales como la fundición, pero debido a la inestabilidad química al ser procesados a elevadas temperaturas, principalmente con matrices de titanio, se procedió a desarrollar nuevas técnicas de conformado, denominadas *in situ*, mediante las cuales se sintetizaba el refuerzo dentro de la propia matriz. Esta técnica se desarrollará en el apartado 6.4. Metodología de los procesos de fabricación.

Realizar un control y seguimiento de pureza y tamaño de las partículas servirá para obtener los resultados esperados [33].

6.2.3.2. Selección de refuerzos particulados.

En casos de matriz de titanio, se pueden obtener diferentes refuerzos dependiendo de la reacción química directa que se produzca entre el elemento añadido, ya sea boro, carbono o silicio, y el metal base, Ti:



e incluso la producción simultanea de dos refuerzos al añadir carburo de boro:

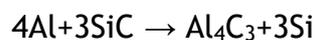


Generalmente, la adición de boro genera compuestos de tipo TiB_2 que posteriormente se transforman en TiB [34].

Por otro lado, los compuestos particulados cerámicos de carburo de titanio, TiC , son los más interesantes para el refuerzo de matrices de titanio debido a la compatibilidad, puesto que la estabilidad química del titanio con otros materiales suele estar comprometida. Un ejemplo interesante de producción de refuerzos particulados de TiC es mediante síntesis autopropagante a altas temperaturas, proceso descrito en el apartado 6.3.2.4. Procesamiento in situ. Tras conformarse el refuerzo TiC por reacción exotérmica de combustión, el titanio añadido en exceso se funde debido a las elevadas temperaturas que se producen, y genera un revestimiento alrededor de las partículas cerámicas.

Para el refuerzo de matrices de aluminio, los compuestos de carburo de silicio, SiC , son recomendables por la facilidad de manufactura gracias a la ligereza y ductilidad de Al que se complementa muy bien con las propiedades mecánicas y la rigidez de SiC . Además, la combinación de la elevada conductividad térmica de Al con el reducido coeficiente de expansión térmica de SiC son de especial interés [35].

Como se observa en la reacción producida por el aluminio y el refuerzo de SiC , se genera carburo de aluminio



Este material, precipita alrededor de SiC en la interfase matriz-refuerzo y evita la propagación de grietas al cohesionar la unión matriz refuerzo además de favorecer la transferencia de cargas, pero es un compuesto de fácil disolución por lo que reducirá la resistencia a la corrosión. Por tanto, se suele reforzar las partículas de SiC con SiO₂, óxido de silicio.

Otro refuerzo destacado de matriz de aluminio es Al₂O₃, óxido de aluminio o alúmina. Es un compuesto inerte en comparación con el carburo de silicio, lo que facilita el proceso de fabricación. El comportamiento frente a corrosión de la alúmina también es superior a SiC. El principal proceso de fabricación de MCM con refuerzo particulado de alúmina es el método de rociado o spray, en el cual una fase líquida es rociada sobre la matriz, infiltrándose en ella [21].

En las matrices de magnesio

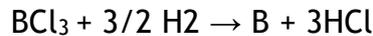
6.2.3.3. Refuerzos de fibras.

El uso de refuerzos de fibra metálica para compuestos de matriz metálica no está muy extendido debido a la incompatibilidad entre fases. Existe riesgo de disolución de la fibra en la matriz, lo que reduciría drásticamente la transferencia de cargas al refuerzo, además de procesos de oxidación. Sin embargo algunos metales refractarios como el tungsteno (wolframio) pueden ser utilizados en el refuerzo de fibra en aleación con otros metales, principalmente del grupo de tierras raras [36] [37]. Por esta razón, los MCM con mayor desarrollo de diseño y fabricación son aquellos con refuerzos de fibras cerámicas, ya que no sufren problemas de disolución en la matriz ni de oxidación, poseen una densidad reducida y mantienen propiedades excelentes de resistencia y módulo elástico a elevadas temperaturas. Además, los refuerzos de fibra son potencialmente anisótropos, por lo que es importante analizar con detenimiento la dirección uniaxial del refuerzo en el material compuesto que se quiere obtener [36].

6.2.3.4 Selección de refuerzos de fibras continuas.

Todos los procesos mencionados para la fabricación de las distintas fibras de refuerzo se encuentran detallados en el apartado 6.3. Metodología de los procesos de fabricación.

- Las fibras continuas de boro se fabrican mediante deposición química de vapor (CVD), debido a su dureza y alto punto de fusión. Se utiliza un hilo de tungsteno que se calienta en una atmósfera rica en hidrógeno. A continuación se añade cloruro de boro,



que reacciona con el hidrógeno, produciendo la deposición de B sobre el hilo de tungsteno y obteniendo las fibras de refuerzo [24] [37].

- Las fibras continuas de SiC, también se obtienen por deposición química de vapor, en este caso utilizando carbono como sustrato, que actúa de aislante sobre la matriz, para evitar la reactividad química entre el carburo de silicio y el titanio y la posterior disolución en la interfase ocasionando crecimientos de grano y pérdida de propiedades. Son las fibras más recomendables para el refuerzo de matrices de titanio. Mayor adherencia a la matriz y precio menor [38].
- Para la producción de fibras continuas de grafito se recurre al proceso en estado líquido de infiltración, y otros métodos de fase sólida como la soldadura por difusión [39, 40].

El reforzado de aleaciones de titanio con fibras cerámicas TiC (carburo de titanio) y TiB₂ (Diboruro de titanio) se lleva a cabo por métodos in situ como la síntesis por combustión y síntesis autopropagante a altas temperaturas (SHS). También se fabrica utilizando procesamiento pulvimetalúrgico con la particularidad de la sinterización por chispa de plasma [34]. Estos refuerzos cerámicos presentan las condiciones más óptimas de estabilidad y compatibilidad química para el refuerzo tanto de matrices de titanio como de sus aleaciones debido a valores muy similares de densidad y de coeficiente de expansión térmica. Mayores ventajas que reforzado continuo ya que se consiguen materiales con propiedades isotrópicas y mejor relación de costes de producción y dificultad de manufactura. Aumenta resistencia, rigidez y conductividad térmica [41].

6.3. Metodología de los procesos de fabricación

El procesamiento de los materiales compuestos de matriz metálica puede clasificarse según el mecanismo utilizado o el estado de los materiales previo a su procesado.

6.3.1. Procesamiento en estado sólido

Son aquellos procesos que permiten la obtención de MCMM en estado sólido, con el principal inconveniente de costes de producción más elevados con relación a otras técnicas de conformado, pero que son favorables en situaciones en las que alcanzar las temperaturas de fusión provocarían problemas de reactividad entre elementos.

6.3.1.1. Pulvimetalurgia

La pulvimetalurgia es uno de los principales procesos en estado sólido de fabricación de materiales compuestos de matriz metálica, generalmente aplicado a matrices de titanio, puesto que en el proceso no se alcanzan temperaturas excesivamente altas cercanas al punto de fusión, evitando así la reactividad química del titanio con los compuestos del refuerzo. Es un proceso que aporta propiedades mecánicas a la aglomeración de polvos mejorando la unión estructural interna entre fases, de tal forma que no podría ser obtenido por otros métodos de procesamiento de metales. El control de las proporciones químicas del material, la calidad, pureza y acabado superficial, junto con la facilidad de fabricación son algunas de las ventajas que proporciona la pulvimetalurgia. Es el principal proceso utilizado como sustitución de métodos convencionales como fundición o forja. El método consta de varias fases [21] [23].

6.3.1.1.1. Etapa de mezclado

Los polvos seleccionados, que pueden ser polvos elementales (MPE) o polvos prealeados (PPA), se mezclan añadiendo el refuerzo también en forma de polvo. Dependiendo de la técnica que se utilice para la obtención y posterior mezclado se diferencian algunos métodos.

- Aleación mecánica: es un proceso para la obtención de polvos prealeados (PPA). Los materiales seleccionados en forma de partículas para la aleación se llevan a un molino de bolas donde pequeñas bolas de acero inoxidable provocan la colisión entre las partículas, las cuales se unen y separan sucesivamente debido a procesos como la soldadura en frío y deformación plástica inducidos por los choques, hasta obtener un polvo uniforme y homogéneo. Este método permite a obtención de aleaciones y compuestos con puntos de fusión y características muy distintas, y es especialmente utilizado para la creación de aleaciones de titanio e intermetálicos Ti-Al, como los expuestos a lo largo de este trabajo, y principalmente para la obtención de MCMM reforzados con partículas de materiales cerámicos, que se dispersan [42].
- Atomización líquida: este proceso es uno de los más utilizados pues es muy sencillo controlar la composición química en el compuesto que se desea obtener y la homogeneidad de la distribución final. El metal fundido es vertido en una cámara de atomización mediante un embudo refractario mientras atraviesa chorros de agua pulverizada. De esta forma se provoca una repentina disgregación del metal fundido en pequeñas partículas que se solidifican con rapidez y se depositan [43].
- Atomización por electrólisis: se produce la deposición de los polvos mediante el proceso de electrólisis. El ánodo es el metal del que se quiere obtener los polvos, los cuales, tras la aplicación de corriente al electrolito, se depositan sobre la superficie del cátodo.
- Reducción de óxidos metálicos: se realiza una reacción de reducción entre un gas reductor y óxidos metálicos a una temperatura determinada, menor que el punto de fusión del metal.
- Condensación de vapores metálicos: método utilizado con metales de bajo punto de fusión. Requiere la ebullición del metal para su posterior condensación en polvo [44].

6.3.1.1.2. Etapa de compactación

En esta fase los polvos uniformes obtenidos durante el mezclado se comprimen para obtener la forma final que obtendrá el material, denominado compacto en verde y facilitar su manufactura posterior durante la fase de sinterizado. La

composición del material y el tamaño del grano determinará su compresibilidad y por tanto el nivel de densificación final del compuesto. Durante la compresión, el movimiento, deslizamiento, deformación y rotura de las partículas provoca un fenómeno de soldadura en frío, posteriormente una deformación elástica y al final deformación plástica, induciendo también endurecimiento por deformación del compuesto. Dependiendo del método utilizado se diferencian varias técnicas, pudiendo ser unificadas en la misma etapa la fase de compactación y la fase de sinterizado.

- Compactación uniaxial.

Se aplica utilizando técnicas de compresión con movimiento relativo entre la matriz y el punzón o émbolo de prensado únicamente en una sola dirección. Se pueden diferenciar varios tipos. De acción simple si el soporte de la matriz esta fijo y solo se desplaza el punzón, de doble acción si se aplica presión con dos punzones en ambos sentidos, de matriz flotante si la matriz presenta un movimiento relativo con el punzón para reducir la presión diferencial, y de matriz móvil si se prensa la matriz con dos punzones a distinta velocidad.

En caso de aplicar la compactación uniaxial bajo condiciones de temperatura elevada, se produciría simultáneamente la fase de compactación y la de sinterización [23].

- Compactación isostática en frío.

En este proceso la presión se aplica a través de un fluido, ya sea líquido o gas, en sustitución de los émbolos o punzones de los mecanismos tradicionales. Para ello la mezcla de polvos se introduce en un molde con cierta flexibilidad, y cerrado herméticamente se aplica presión isostática, de mismo módulo en todas direcciones. Así se obtiene una distribución de densidad uniforme, con menos agrietamientos y tensiones internas en comparación con la compactación uniaxial, aunque el coste del proceso es superior. Para obtener mejores resultados de densificación del material, es decir, reducir la porosidad y la probabilidad del crecimiento de grietas, es necesario recurrir a procesos de aplicación en caliente a alta temperatura, ya que se facilita la

deformación plástica del material, como se explicó al comienzo de este apartado [42].

6.3.1.1.3. Etapa de sinterización

Esta fase se caracteriza por la aplicación de temperatura sobre el compacto en verde para finalizar el proceso de densificación del material.

- Compactación isostática en caliente

Este proceso unifica las etapas de compactación y sinterización en una sola fase. El método consiste en la introducción del compacto en verde en moldes situados en hornos de vacío a temperaturas ligeramente inferiores al punto de fusión de la matriz metálica para eliminar los residuos de gas que se puedan encontrar en el material. A continuación se cierra el molde y se transporta a una prensa. De nuevo se aumenta la temperatura al mismo tiempo que se aplica un gradiente de presión para inducir la soldadura entre partículas del polvo, conformando la pieza. Este mecanismo mejora sustancialmente la densidad del material, eliminando los poros de manera mucho más eficaz. Sin embargo, la prolongada exposición del compuesto a elevadas temperaturas puede producir crecimiento indeseado de grano en detracción de las propiedades que se quieren conseguir [45].

- Sinterización por chispa de plasma (SPS)

Es una de las técnicas más recientemente desarrolladas para el sinterizado de compuestos que alcanza valores de densificación muy elevados. Es interesante su aplicación en el caso de conformado de compuestos intermetálicos ya que se obtienen tamaños y uniformidad de granos mejores que en otros procesos. Para su implementación es necesario utilizar un horno eléctrico con generador de corriente continua, un mecanismo de presión hidráulica y un sistema de vacío, como se indica en la figura 6.9.

Esta técnica se basa en la aplicación pulsada o interrumpida de una corriente eléctrica continua a través del material [46].

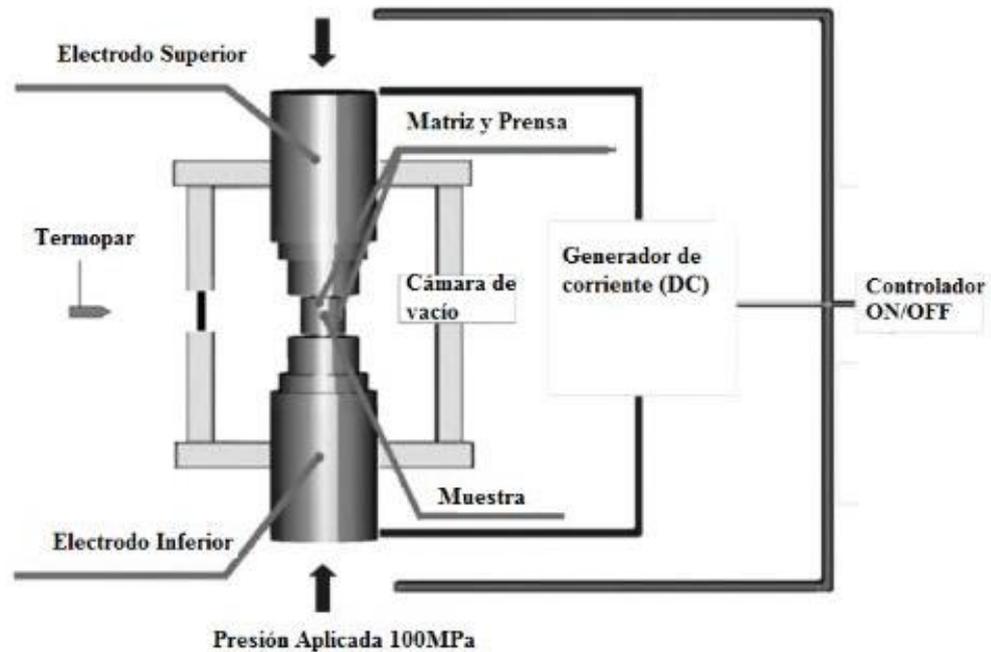


Figura 6.9 Esquema gráfico de un sistema SPS (Fuente: [47])

Los impulsos eléctricos generan chispas que inducen según la teoría del efecto Joule [48], un plasma conductor (gas densamente cargado con electrones e iones cargados) de altísima temperatura en los espacios del compacto en verde produciendo una rápida soldadura entre partículas al aplicar simultáneamente una presión axial a la preforma. La superficie de las partículas se evaporará y fusionará con otras partículas debido a la temperatura del orden de 10^3 °C en momentos puntuales [47]. Los tiempos de densificación y crecimiento de grano se ven significativamente reducidos. Por norma general, este método se suele utilizar previa aplicación de la compactación en frío para obtener la preforma del refuerzo sobre la que se conformará el material compuesto [30].

6.3.1.2. Unión/soldadura por difusión

Este mecanismo es de especial interés para la fabricación de MCM de magnesio y aluminio reforzados con fibras. Debido a unas condiciones de presión de vacío y temperatura determinadas aplicadas sobre dos láminas metálicas con fibras de refuerzo situadas entre ellas se produce interdifusión atómica entre las superficies sin llegar a alcanzar la temperatura de fusión. Se consigue la unión

entre fases con prestaciones muy elevadas, aunque el coste del proceso es relativamente alto.

6.3.1.3. Deposición de vapor

A su vez se puede dividir en deposición química de vapor (CVD) y deposición física de vapor (PVD) dependiendo de la técnica aplicada.

- La deposición química de vapor es un proceso de naturaleza química que sirve para depositar un determinado material de forma volátil sobre otro denominado sustrato. El material volátil ha sido vaporizado para posteriormente condensarse sobre el material objetivo, reaccionando químicamente para cohesionarse. Este método se utiliza generalmente para la fabricación de refuerzos de fibra continua.
- La deposición física de vapor no produce ninguna reacción química. El sustrato seleccionado como fibra pasa a través de una región a alta presión en la que el metal que se encuentra vaporizado debido al aporte energético mediante partículas (iones, electrones), se deposita sobre la superficie de la fibra y genera el recubrimiento deseado. Posteriormente debe someterse a un proceso de prensado en caliente.

En ambos casos se busca realizar un recubrimiento superficial del refuerzo que mejore la interacción con la matriz, ya sea favoreciendo el mojado o disolución parcial del refuerzo en la matriz o evitando la excesiva reactividad química entre fases [49].

6.3.2. Procesamiento en estado líquido

Como norma general, los procesos de fabricación en estado líquido suelen dedicarse exclusivamente a MCMM con refuerzos discontinuos. Esto se debe a problemas de homogeneidad y mojado insuficientes de las fibras en la matriz, rechazo y exceso de reactividad entre matriz y refuerzo, e incluso rotura parcial o total del refuerzo. Aunque las propiedades conseguidas en el material sean inferiores a las que se obtendrían mediante procesos en estado sólido, rentabilidad económica es mucho más favorable.

6.3.2.1. Infiltración

Este proceso de conformado de materiales compuestos puede llevarse a cabo mediante presión de gas o a través de presión mecánica. El primer método utiliza gases inertes tales como N_2 o Ar para forzar, mediante presión diferencial, la matriz metálica que se encuentra en estado líquido a pasar a través de la preforma porosa constituida por el refuerzo. El segundo método introduce la preforma precalentada en un horno y se incluye el metal fundido bajo presión mecánica/hidráulica. Es interesante para la fabricación de compuestos con un alto porcentaje de refuerzo y se usa principalmente con matrices metálicas de aluminio por su menor punto de fusión lo que facilita el procesado. Otros metales como el titanio presentarían graves problemas de reactividad, además de que su alta temperatura de fusión complicaría significativamente el proceso [39].

6.3.2.2. Fundición prensada o forja líquida (squeeze casting)

Este tipo de procesado de infiltración por presión de gas es uno de los más extendidos en la industria, y consiste en la infiltración de la matriz metálica previamente fundida a través de la preforma compuesta por el refuerzo. De esta manera se reduce la porosidad del compuesto y se evita el crecimiento de grano en la interfase al proceder con un enfriado rápido. Se aplica principalmente con refuerzos tipo bigotes o whiskers y fibras cortas de SiC [44].

6.3.2.3. Deposición por spray

En este proceso se realiza una descomposición del metal fundido en partículas a través de gases como nitrógeno o argón. La matriz pulverizada colisiona con un sustrato y constituye la preforma. En el chorro de gas atomizador se incluyen las partículas del refuerzo que chocan con la preforma y se solidifican con ella. Debido a la rápida velocidad de solidificación y al escaso tiempo de contacto entre el metal en estado líquido y las partículas del refuerzo no se inducen reacciones en la interfase. Posteriormente se debe realizar un procesado convencional, ya sea laminado, extrusión, etc. Se obtiene al final un compuesto de alta densidad con microestructura formada por granos muy finos y homogéneos [44].

6.3.2.4. Procesamiento in-situ

El procesado in situ es de especial interés debido a una mayor estabilidad termodinámica entre fases y a la buena homogeneidad que se obtiene. Consiste en la formación del refuerzo dentro de la matriz. Al reaccionar la matriz metálica en estado líquido con el refuerzo, inyectado en forma de gas o introducido en forma de fibras cortas, ya sean metálicas o cerámicas, se produce el crecimiento del refuerzo con gran estabilidad química, pudiendo llegar a obtenerse una composición de fase dispersa superior al 50%.

Síntesis autopropagante a altas temperaturas (SHS), es un método de procesamiento in situ comúnmente utilizado en conjunto con la sinterización por chispa de plasma (SPS), en el cual se producen reacciones exotérmicas entre los componentes para la obtención del refuerzo. Se produce una reacción de combustión entre componentes, principalmente con la adición de C y Ti para obtener carburos de titanio cerámicos en forma de partículas, y posteriormente se añade un exceso del elemento que compone la matriz metálica para obtener la fracción volumétrica deseada de cada fase [46].

Antes de aplicar esta técnica es necesario compactar el material para obtener una preforma sobre la que provocar la reacción de elementos. Este método es aplicable para la obtención de polvos de refuerzo y poder utilizarse posteriormente en el conformado por pulvimetalurgia, por lo que habitualmente es sometido en su última etapa a un proceso de sinterización por chispa de plasma para aumentar considerablemente la densificación del compuesto.

6.3.3. Fabricación aditiva

La fabricación aditiva es un proceso caracterizado por la impresión de piezas en 3D. Esta técnica de reciente actualidad se basa en la superposición de capas del material seleccionado para conformar el objeto deseado, y es posible aplicarlo para la obtención de metales y MCM.

Este proceso se controla a través de un software que lee los datos de la pieza que ha sido diseñada mediante un programa CAD (diseño asistido por ordenador), dividiéndola en capas de espesor micrométrico para posteriormente enviar la información a la impresora. Algunas ventajas que

presentan es el aprovechamiento del material, sin apenas producción de desechos, reducción de costes al no ser necesario el uso de otros elementos y mecanismos convencionales y la facilidad para la producción de elementos con geometrías complejas. Por otro lado, presenta inconvenientes importantes. Entre ellos, ser una tecnología en vías de desarrollo, con tiempos de producción prolongados y riesgos de producir alotropía en el compuesto final.

Dentro del ámbito de la fabricación aditiva existen otros subprocesos que se especializan dependiendo del tipo de material, estado o morfología, técnica y objetivo final del conformado. A continuación se detallan los más importantes para la producción de MCMM [35].

6.3.3.1. Fusión selectiva por láser (SLM)

Esta técnica de fabricación aditiva es específica para el procesado y conformación de metales a partir de polvos como materia prima. Utiliza un láser de alta potencia en una atmósfera controlada por gases inertes, N_2 y Ar, y libre de oxígeno para evitar la reactividad con el metal. El objetivo es fundir por completo los polvos metálicos que han sido dispuestos en una fina película sobre una placa. Tras la fusión de las partículas se repite el proceso con el láser, y así se va depositando lámina sobre lámina, que a su vez se van fundiendo y solidificando con la capa anterior hasta obtener el elemento con el espesor determinado. Cada capa que se deposita suele tener un espesor de entre 15 y 500 μm . Con este proceso se obtienen excelentes densificaciones del material, por lo que también lo serán las propiedades esperadas. Algunas aleaciones ya mencionadas en este trabajo, como la superaleación base Ni Inconel 718, y aleaciones de Ti como Ti-6Al-4V pueden ser conformadas mediante SLM, ya que esta técnica permite crear espesores de hasta 40 cm. Es necesario controlar la potencia que se aplica al láser, ya que un exceso de esta podría ocasionar la evaporación de la capa, y una potencia insuficiente provocaría defectos en la fusión del metal y consecuentemente problemas de densificación. Las propiedades térmicas del metal, tales como su temperatura de fusión o la conductividad térmica afectan al desarrollo del procesado [50] [51].

El método de sinterización selectiva por láser (SLS), es una variante del proceso SLM con la principal diferencia de que el SLS realiza una sinterización del metal

en fase sólida sin llegar a fundirlo. Este mecanismo genera otras ventajas como poder controlar la porosidad, aunque necesita de posteriores tratamientos térmicos para finalizar el conformado del material con las propiedades mecánicas adecuadas.

6.3.3.2. Fusión por haz de electrones (EBM)

Este método es similar al SLM, aunque en este caso se utiliza un haz de electrones para producir la fusión del metal. Además, se realiza en una atmósfera al vacío, sin necesidad de utilizar gases inertes, lo que garantiza la ausencia de oxígeno y reduce casi a cero la probabilidad de oxidar materiales altamente reactivos como el titanio [51].

6.3.3.3. Laser cladding / Deposición directa por láser (DLD)

Esta técnica se ha desarrollado específicamente para crear un recubrimiento sobre un metal base o sustrato a partir de polvos metálicos mediante fusión por haz láser. El polvo se inyecta para ser fundido sobre la base y generar la capa de recubrimiento. De esta forma se consigue un recubrimiento de alta densificación, sin poros ni agrietamientos, ya que el aporte térmico es muy localizado y la solidificación se produce rápidamente, sin apenas disolución o mezclado con el metal base, interfase no se ve afectada [52].

6.4. Selección de materiales definitivos.

Durante el capítulo 6 se han descrito las características de los diferentes metales que conforman los MCM, así como sus propiedades mecánicas y térmicas. También se han detallado los distintos refuerzos existentes para formar la matriz dispersa. A partir de la información recabada se procede a seleccionar los materiales que presentan las mejores propiedades en la operación a elevadas temperaturas que se plantea en este trabajo.

El titanio es en principio el material óptimo para conformar la matriz del compuesto debido a las propiedades mecánicas que ofrece a elevadas temperaturas. Será necesario seleccionar adecuadamente el proceso de fabricación para evitar los problemas de procesado y mecanizado, y el refuerzo,

para obtener un compuesto sin problemas de compatibilidad y reactividad entre fases como se ha descrito con anterioridad.

Para material compuesto de matriz de titanio, y en función de los valores comparados en el apartado 6.2.1.2.2, la aleación escogida presenta las mejores cualidades como material de fabricación de la tobera.

Las aleaciones Ti α - β son las más adecuadas, ya que reúnen las propiedades mecánicas de la fase α , como la resistencia a tracción, además de la baja densidad, y por otro lado el comportamiento frente a elevadas temperaturas de la fase β , como la resistencia a fluencia y a la corrosión [29].

Se ha seleccionado la aleación Ti-6Al-4V como matriz para el material compuesto, que será reforzada con partículas cerámicas de TiC ya que presentan buena compatibilidad. El proceso de obtención se describió en el apartado 6.2.3.2., así como la técnica de procesado. Según [33], el refuerzo de aleaciones de Ti con compuestos cerámicos (TiC) consigue las propiedades más elevadas. El TiC es termodinámicamente compatible con la aleación de titanio, su densidad y el coeficiente de expansión térmica son similares, lo que evita la creación de tensiones internas por dilatación/contracción diferente en cada fase del material, y el módulo y la resistencia son mucho más altos que los del titanio. Por otra parte, el conformado mediante pulvimetalurgia y métodos de compactación en caliente como SPS o presión isostática es el proceso de fabricación más viable, puesto que el titanio posee un alto punto de fusión difícil de alcanzar para procesos de fundición, y las técnicas de conformado en estado sólido evitan la reactividad y falta de compatibilidad entre el titanio y el refuerzo.[18] Sin embargo se están realizando importantes avances en la fabricación de aleaciones Ti-6Al-4V reforzadas con partículas cerámicas mediante procesos de fabricación aditiva, como la deposición directa de laser (DLD), que ha sido explicada en el apartado 6.3.3.3 [38].

El refuerzo de superaleaciones es interesante ya que las excelentes propiedades de este tipo de aleaciones pueden verse desarrolladas enormemente. Un caso muy concreto es el refuerzo de la superaleación base Ni Waspaloy con fibras continuas de tungsteno de composición W-4Re-0.38Hf-0.02C y con una presencia de hasta el 50% en volumen del material compuesto [37]. El tungsteno

es compatible con la matriz seleccionada, conformada por Ni. Además presenta cualidades excelentes frente a la fatiga térmica y termofluencia. Por otro lado, la superaleación Waspaloy es un referente en la industria aeroespacial para la fabricación de componentes de aerorreactor con altos requisitos mecánicos y térmicos, por lo que será interesante ver su aplicación en este trabajo

Por otro lado los materiales compuestos de matriz de aluminio y magnesio han sido desestimados como posibles opciones para la fabricación de la tobera, ya que las temperaturas de fusión máximas que pueden alcanzar son considerablemente inferiores a las de otros compuestos de Ti o superaleaciones de Ni. Por tanto, la temperatura máxima de servicio a la que se podría exponer el compuesto sería demasiado baja para mantener unas propiedades de resistencia mecánica, termofluencia y fatiga estables y suficientes para los requisitos deseados.

En el capítulo 8 se mostrarán las simulaciones de temperatura en la tobera fabricada con la aleación de Titanio Ti-6Al-4V reforzada con partículas de TiC y con la superaleación Waspaloy reforzada con fibras de Tungsteno. Además se realizará la comparación entre estos materiales compuestos y las aleaciones sin reforzar, para analizar las mejoras obtenidas.

7. Simulación CFD

7.1 Introducción

El método CFD se encarga de la resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes, las cuales describen el comportamiento y el movimiento de los fluidos teniendo en cuenta los efectos de la viscosidad. Dado que obtener resultados viables de estas ecuaciones no es posible de forma analítica, fue necesario un desarrollo significativo de la potencia computacional de los ordenadores para la aplicación de los métodos de CFD.

En este capítulo se procederá a la implementación de la dinámica de fluidos computacional (CFD) para obtener los resultados de temperaturas y transferencia de calor a través de las paredes de una tobera de motor aerorreactor. Se describirá el diseño del mallado, la creación del dominio y condiciones de contorno para la resolución del problema.

Para el estudio y resolución se ha utilizado el software ANSYS®, formado por varios módulos que contienen las herramientas necesarias para desarrollar las actividades de cada apartado del ejercicio que se propone.

Para el preprocesado del problema se utiliza ANSYS SpaceClaim®, herramienta de diseño y creación de la geometría, dado que el elemento que se va a estudiar no presenta la complejidad suficiente para la utilización de otros programas de diseño asistido por ordenador (CAD) tales como SolidWorks®, y ANSYS Meshing®, para la obtención del mallado previo a la resolución de las ecuaciones.

Posteriormente, para el cálculo y obtención de la solución, así como el procesado de los resultados pertinentes, se ha utilizado ANSYS Fluent®.

Todas estas interfaces están recogidas en la plataforma principal ANSYS Workbench®, desde la cual se gestionan las entradas de datos referentes a cualquier parte del proceso.

7.2 Preprocesado

El preprocesado recoge todos los datos que el software necesita para realizar los cálculos.

7.2.1. Planteamiento del problema

Se ha seleccionado el motor GE CJ610, derivado del motor militar J85, para simular la transferencia de calor a través de su tobera. Este motor, diseñado y fabricado por General Electric desde 1959, es un turborreactor puro monoeje sin postcombustión, con compresor y turbina axiales de ocho y dos etapas respectivamente, de tobera convergente fija, y ha sido uno de los motores más utilizados para la propulsión de aeronaves ejecutivas y jets privados con un total de 16,5 millones de horas de operación. Una de las primeras aeronaves en las que se utilizó el CJ610 en su variante 4 como planta motriz fue el Learjet 23, avión de negocios civil fabricado por la empresa canadiense Learjet [53]. Estas características descritas pueden apreciarse en la figura 7.1.

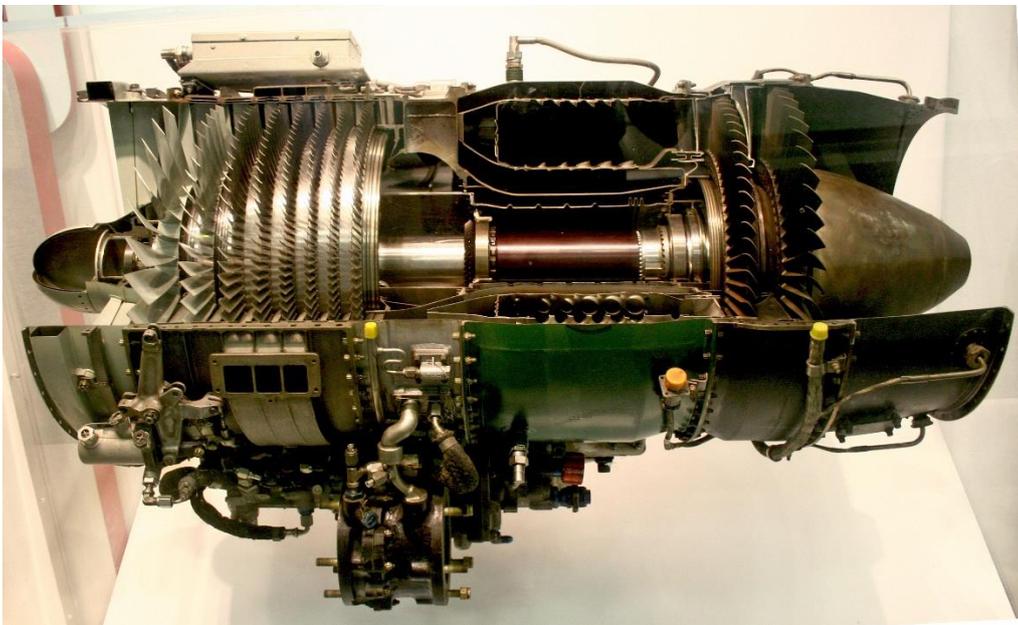


Figura 7.1 Fotografía del motor GE CJ610-4, con perspectiva de la tobera.
(Fuente: [54])

La razón de utilizar este motor ha sido, por un lado, la sencillez de operación y geometría de la tobera para poder plasmarla en diseño 2D e implementar las simulaciones. Por otro, será más interesante comparar el desempeño de los materiales de origen propios de los años 60 con materiales más recientes que presenten mejores propiedades térmicas y de esta manera observar la evolución en el sector.

7.2.2. Condiciones de operación

Para poder realizar el análisis mediante el software ANSYS primero se deben concretar las condiciones de operación del turborreactor y en definitiva de la tobera, para llevar a cabo los cálculos correspondientes.

La simulación se realizará en condiciones estáticas, es decir, Mach de vuelo nulo, y a nivel del mar, donde se encuentran las condiciones de operación óptimas debido a valores máximos de densidad del aire. Se alcanzará así el máximo rendimiento del motor, y por tanto los esfuerzos mecano-térmicos más críticos.

7.2.2.1. Características técnicas del turborreactor GE CJ610-4 [55]

Diámetro máximo de tobera = 39,58 cm

Gasto másico de aire = 20 kg/s

Salto de presiones del compresor = 6,8

Eficiencia del compresor = $\eta_c = 0,85$

Velocidad nominal de rotación del compresor = 16700 rpm

Eficiencia de la turbina = $\eta_t = 0,89$

Temperatura a la salida de la cámara de combustión = 1250 K

Empuje máximo a nivel del mar = 12,7 kN a 16700 rpm

Consumo específico para empuje máximo = $2,804 \times 10^{-5}$ kg/N·s

7.2.2.2. Condiciones ambientales a nivel del mar

$T = 288,15$ K $P = 101325$ Pa $\rho = 1,225$ kg/m³

Altitud = 0 m Velocidad = 0 km/h N.º de Mach = 0

7.2.2.3. Propiedades de los fluidos de trabajo

Poder calorífico inferior del combustible Jet-A1= 43,15 MJ/kg

Constante universal de los gases para el aire, $R = 287 \text{ J/Kg}\cdot\text{K}$

Coefficiente adiabático del aire (sección fría, previo a cámara de combustión),
 $\gamma = 1,4$

Coefficiente adiabático de la mezcla de gases (sección caliente, posterior a cámara de combustión), $\gamma = 1,33$

C_p frío = 1005 J/Kg·K

C_v frío = 718 J/Kg·K

C_p caliente = 1157 J/Kg·K

C_v caliente = 870 J/Kg·K

7.2.2.4. Ciclo termodinámico

A continuación, con los datos del apartado 7.2.2 se resuelve el ciclo termodinámico del motor. Se busca obtener la temperatura T_6 de salida de la turbina y entrada a la tobera.

Para la resolución se utilizará el programa GasTurb12®, software de simulación de ciclos termodinámicos de turbinas de gas. La figura 7.2 muestra la ventana emergente que aparece al seleccionar resolución de ciclo termodinámico de turborreactor puro. En ella se observa todas las entradas o inputs que necesita el software para resolver el ciclo.

En la figura 7.3 se muestra una tabla con los resultados del ciclo termodinámico para cada etapa del motor. Los datos especialmente relevantes son la temperatura total a la salida de la turbina, la presión total y estática a la salida de la turbina y la presión estática a la salida de la tobera. Estos datos se introducirán posteriormente en el software de simulación.

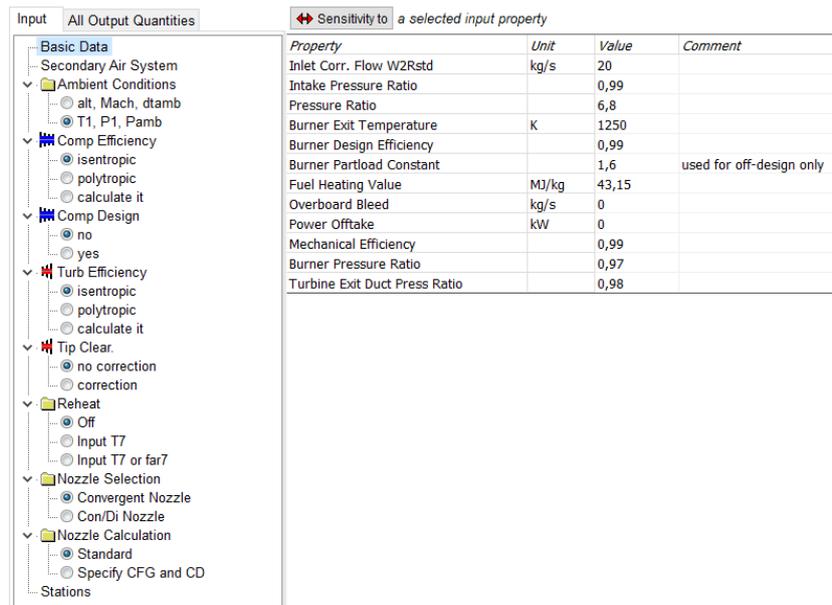


Figura 7.2 Ventana de variables de entrada para la resolución del ciclo, GasTurb.

Time: 21:30 Alt= 0m ISA

Resolución ciclo termodinámico

	Units	St 2	St 3	St 4	St 5	St 6	St 8
Mass Flow	kg/s	19,8	19,8	17,9725	19,9525	19,9525	19,9525
Total Temperature	K	288,15	531,96	1250	975,31	975,31	975,31
Static Temperature	K	274,407	525,685	1242,36	950,352	968,955	835,809
Total Pressure	kPa	100,312	682,12	661,656	258,268	253,102	253,102
Static Pressure	kPa	84,5618	653,433	644,625	232,55	246,496	136,3
Velocity	m/s	166,055	114,24	136,626	240,846	121,526	566,826
Area	m ²	0,111069	0,040025	0,072772	0,09718	0,185257	0,06196
Mach Number		0,5	0,25	0,2	0,4	0,2	1
Density	kg/m ³	1,07355	4,3303	1,80762	0,852468	0,886242	0,568112
Spec Heat @ T	J/(kg*K)	1004,52	1036,37	1221,74	1167,59	1167,59	1167,59
Spec Heat @ Ts	J/(kg*K)	1004,19	1035,02	1220,56	1162,12	1166,2	1135,63
Enthalpy @ T	J/kg	-10032,3	238037	1,06753E6	736553	736553	736553
Enthalpy @ Ts	J/kg	-23819,4	231512	1,0582E6	707549	729168	575907
Entropy Function @ T		-0,11924	2,04983	5,47376	4,42844	4,42844	4,42844
Entropy Function @ Ts		-0,29004	2,00687	5,44768	4,32355	4,40199	3,8095
Exergy	J/kg	-831,298	226382	770155	447827	446156	446156
Gas Constant	J/(kg*K)	287,05	287,05	287,047	287,047	287,047	287,047
Fuel-Air-Ratio		0	0	0,019888	0,017879	0,017879	0,017879
Water-Air-Ratio		0	0	0	0	0	0

Figura 7.3 Tabla de resultados del ciclo termodinámico.

7.2.3. Geometría de la tobera

A continuación se incluye el diseño de la tobera en dibujo 2D, a partir de las dimensiones reales del motor GE CJ-610-4 y las dimensiones de área de paso impuestas por el ciclo termodinámico [56].

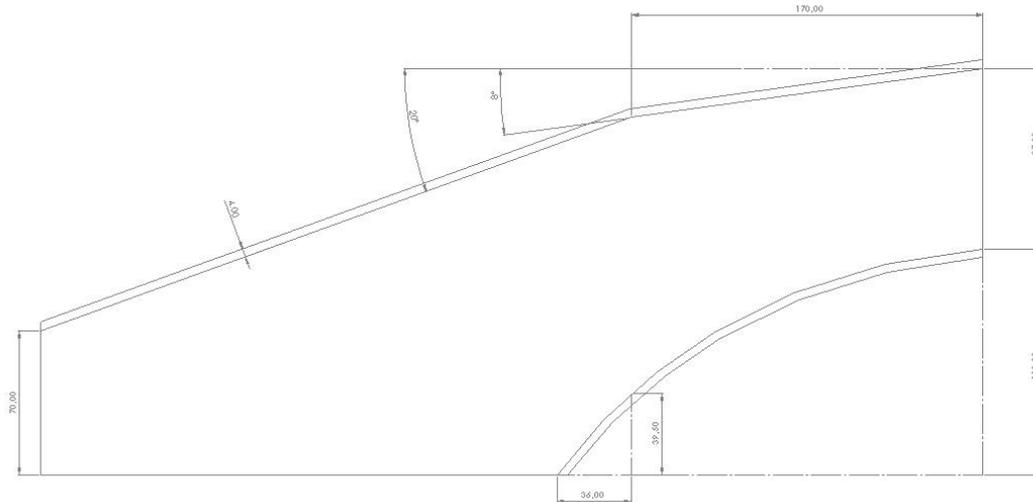


Figura 7.4 Dibujo geométrico de la tobera (en mm).

7.2.4. Dominio y condiciones de contorno

A continuación se procede a concretar y delimitar el dominio sobre la que se quiere implementar las ecuaciones e identificar correctamente cada sección.

El dominio está compuesto por un bloque fluido y un bloque sólido que compone la pared de la tobera. Los límites del dominio descritos por las condiciones de contorno se detallan en la tabla 7.3. La columna de la derecha indica los comandos que genera el software Fluent para relacionar las condiciones de contorno.

Tabla 7.1 Condiciones de contorno.

Límite de dominio		Condición de contorno impuesta
Entrada de presión		Pressure-inlet
Eje de simetría axial		Axis
Salida de presión		Pressure-outlet
Paredes	Pare interna	Coupled
	Pared externa	Mixed thermal condition (convección y radiación)
Dominio fluido		Fluid
Dominio sólido (tobera)		Solid

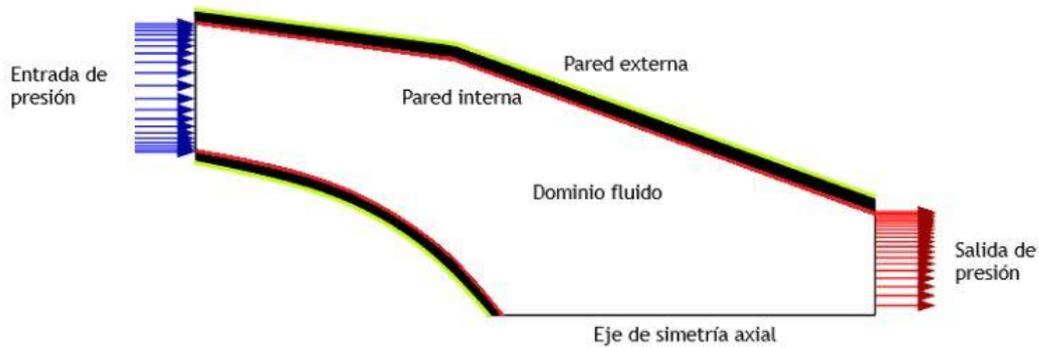


Figura 7.5 Dominio y condiciones de contorno.

7.2.5. Mallado

A continuación, se procede a generar el mallado de la geometría. El objetivo es discretizar el dominio que se desea analizar, es decir transformar el modelo geométrico continuo en un modelo compuesto por elementos finitos para poder aplicar y resolver las ecuaciones en cada uno de los nodos. Como el problema presenta una geometría en 2D los elementos constituirán un mallado de superficie, generalmente compuesto a base de triángulos y/o cuadriláteros.

Las mallas generadas pueden clasificarse según la disposición de sus celdas, siendo estructuradas o desestructuradas.

Las mallas estructuradas se definen como una discretización del medio continuo en el que los elementos siguen un patrón de conectividad entre ellos. El elemento i estará posicionado entre los elementos $i-1$ e $i+1$, por lo que no será necesario calcular las posiciones de los nodos, y por tanto se optimizarán los costes computacionales. En geometrías de alta complejidad o con curvas pronunciadas no se recomienda el uso de este tipo de mallado ya que las restricciones en las condiciones de contorno limitarían la calidad obtenida [57] [58].

Las mallas desestructuradas se caracterizan porque es necesario calcular las relaciones de conectividad entre elementos, a partir de las condiciones de

contorno, la distribución de los nodos en la geometría y la discretización utilizada. Este tipo de mallado aumenta significativamente el coste computacional, pero es favorable en geometrías complejas.

Para realizar el mallado de la geometría de la tobera se ha aplicado un mallado híbrido formado por cuadriláteros.

- La región del dominio perteneciente al fluido ha sido discretizada mediante un mallado estructurado formado por cuadriláteros
- La región del dominio perteneciente al sólido, paredes de la tobera, se ha discretizado con una malla desestructurada compuesta por triángulos y cuadriláteros.

La unión de ambas mallas se denomina interfaz y es de especial importancia la conformidad de esta para la resolución. Los nodos que se encuentran en contacto entre las dos mallas deben ser coincidentes para evitar problemas de convergencia de la solución, como se indica en la figura 7.6.

La topología del mallado es la estrategia aplicada para obtener un mallado acorde a las condiciones impuestas. Para que los resultados sean rigurosos el mallado debe adaptarse a los problemas físicos. Las zonas críticas de la tobera que necesitan un mallado específico y eficaz son las regiones adyacentes a las paredes, donde involucra a la capa límite del fluido. El tamaño y la distribución de los elementos en esta zona deberá ser mucho más exacta para simular correctamente el fenómeno real [59].

Los comandos utilizados para la realización del mallado son:

- *Edge sizing*: esta herramienta discretiza líneas o bordes del dominio dividiéndolos en elementos. Se configura el comando seleccionando *Número de divisiones* en la pestaña *Tipo*, para dividir el borde en el número de elementos que se desee.
- *Mapped Face Meshing*: este comando se encarga de la construcción de la malla estructurada a partir de la división de elementos del comando anterior

Se comienza aplicando el comando *Edge Sizing* en los bordes de entrada (inlet), salida (outlet), y líneas de diseño de la geometría dentro del dominio fluido,

dividiéndolos en 100 elementos cada uno. Luego se aplica el comando *Mapped Face Meshing* para construir el mallado estructurado. Se activa la opción *Mapped Mesh* y se selecciona *Cuadriláteros* como el método deseado.

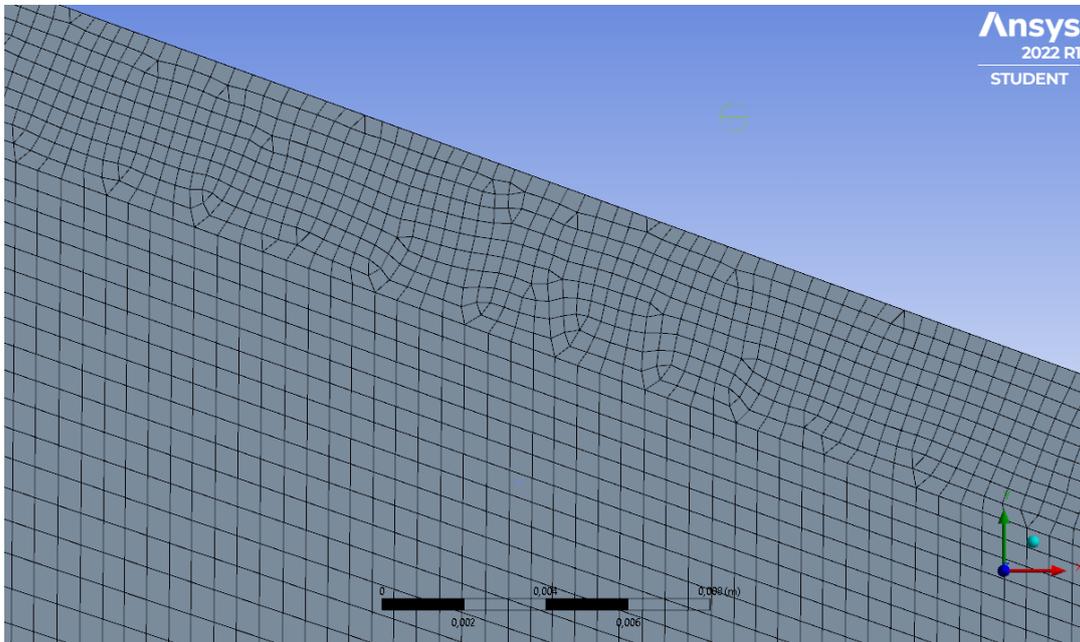


Figura 7.6 Interfaz conforme entre mallado estructurado y desestructurado.

A continuación se aplica el mismo comando *Edge Sizing* a los bordes laterales del dominio sólido, seleccionando 11 divisiones en este caso. Luego se aplica *Edge Sizing* de nuevo en los contornos exteriores de ambas paredes, en este caso indicando *Tamaño de elemento* en vez de *Número de divisiones*. Se aplica un tamaño de $6 \cdot 10^{-4}$ m. Automáticamente se genera la malla desestructurada en el dominio sólido, que se unifica conformemente con la malla estructurada del dominio fluido con una interfaz coincidente.

Ahora es necesario optimizar la región de la capa límite como ya se ha comentado. Para ello se activará el parámetro *Bias Type* situado en la sección avanzada del comando *Edge Sizing*.

Este parámetro ajusta el crecimiento de las divisiones de forma progresiva acumulando más elementos en la zona asignada. Se selecciona el tipo 3 para acumulación en los extremos en el borde inlet y en las líneas de diseño

intermedias. En el borde outlet se selecciona el tipo 1 y se activa la opción *Reverse Bias* para acumular los elementos en la región cercana a la pared. Después se indica un *Bias Factor* con valor 6, que se encarga de controlar la proporción de crecimiento entre elementos. De esta forma la resolución obtenida en la capa límite es lo suficientemente buena. El resultado de aplicar este parámetro se aprecia en la figura 7.7.

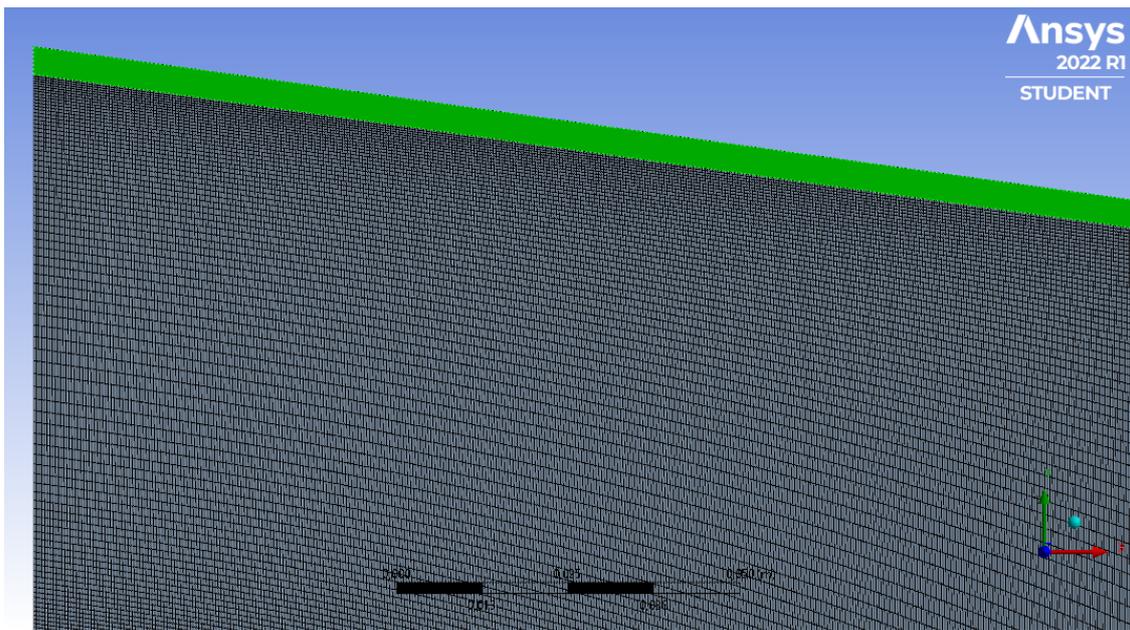


Figura 7.7 Mallado de capa límite utilizando *Bias Factor*.

7.2.5.1. Verificación de calidad

Ahora es necesario comprobar que el mallado realizado presenta la calidad suficiente para obtener una solución precisa. Para ellos el software nos brinda algunos parámetros de interés.

El parámetro *Skewness* es la proporción entre la forma del elemento y la forma geométrica de un elemento de referencia, y mide la deformación que se produce en cada uno de los elementos del mallado. Su rango de valores va de 0 a 1; cuanto menor sea el valor menor deformación sufrirá la celda o elemento y la solución convergerá más fácilmente [59] [60].

El parámetro *Aspect Ratio* mide la relación entre el eje longitudinal y axial de cada elemento. Generalmente se buscan valores menores de 40 con un valor óptimo de 1.

Otro parámetro de especial interés es *Orthogonal Quality* que indica la calidad general de los elementos con forma geométrica cuadrangular. A continuación se indican los valores obtenidos de cada uno de los parámetros:

Tabla 7.2 Parámetros de calidad del mallado.

	<i>Skewness</i>	<i>Aspect Ratio</i>	<i>Orthogonal Quality</i>
Valor mínimo	$3,96 \cdot 10^{-5}$	1,0001	0,64
Valor máximo	0,54	10,97	1
Valor promedio	0,15	2,41	0,95

Como se puede observar en la tabla 7.2, los valores obtenidos son muy buenos, por lo que el mallado que se ha realizado es de gran calidad y proporcionará una solución precisa del problema.

7.2.6. Modelos físicos

Ahora se comentarán las ecuaciones que ANSYS Fluent® utiliza para describir el comportamiento del fluido en el problema que se plantea, aunque ya fueron desarrolladas en el Capítulo 3. Principio de funcionamiento de una tobera. Para el desarrollo de esta simulación es necesario resolver las ecuaciones de Navier-Stokes, que modelan el comportamiento del fluido. Estas ecuaciones se deducen a partir de varios principios físicos, que son los que resolverá el software. Por un lado, ANSYS resuelve la ley de conservación de la masa y del momento, que deriva de la segunda ley de Newton. Además, como el problema incluye transferencia de calor, se añadirá la ecuación de conservación de la energía (primer principio de la termodinámica) [61].

7.2.6.1. Ecuación de continuidad

La ecuación de continuidad o ecuación de conservación de la masa se expresa como

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m \quad (7.1)$$

donde S_m es la masa incluida de forma externa en el sistema. Para una geometría en 2D como se presenta en la simulación, la ecuación de continuidad queda

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho \cdot v_x) + \frac{\partial}{\partial r} (\rho \cdot v_r) + \frac{\rho v_r}{r} = S_m \quad (7.2)$$

siendo x la coordenada longitudinal del eje de simetría, es decir, v_x velocidad axial, y r la coordenada radial del sistema, v_r velocidad radial.

7.2.6.2. Ecuación de conservación de la cantidad de movimiento

La ecuación de conservación de cantidad de movimiento resuelta por el código Fluent es la siguiente:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (7.3)$$

donde p es la presión estática, $\rho \cdot g$ es la fuerza de la gravedad y F el cómputo de fuerzas externas. El término $\bar{\tau}$ es el tensor de estrés que viene dado por

$$\bar{\tau} = \mu \left[(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} I \right] \quad (7.4)$$

siendo I el tensor unidad y μ la viscosidad molecular. El segundo término del lado derecho de la ecuación representa el efecto de la dilatación volumétrica. La adaptación de esta fórmula para una geometría 2D con simetría axial está desarrollada en [61].

7.2.6.3. Ecuación de conservación de la energía

ANSYS Fluent® resuelve la siguiente ecuación para analizar la transferencia de calor en la región fluida:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v} (\rho E + p)) = \nabla \cdot \left(k_{\text{eff}} \nabla T - \sum_j h_j \vec{J}_j + (\bar{\tau}_{\text{eff}} \vec{v}) \right) + S_h \quad (7.5)$$

donde la conductividad efectiva, k_{eff} , es la suma de la conductividad y la conductividad turbulenta definida mediante el modelo de turbulencia, y \vec{J}_j es el flujo de difusión de especies. El término $k_{\text{eff}}\nabla T$ es la transferencia de energía por conducción, $\sum_j h_j \vec{J}_j$ representa la difusión por especies y $(\bar{\tau}_{\text{eff}}\vec{v})$ es la expresión de disipación viscosa. S_h sirve para describir cualquier fuente de calor volumétrica involucrada incluida la radiación térmica en caso de considerarse en el problema. La energía E se expresa a partir de

$$E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} \quad (7.6)$$

Donde la entalpía h para un flujo incompresible se puede escribir como

$$h = \sum_j h_j \cdot Y_j + \frac{p}{\rho} \quad (7.7)$$

siendo Y_j la fracción de masa de especies. La entalpía se puede calcular integrando el calor específico

$$h_j = \int_{T_{\text{ref}}}^T c_p dT \quad (7.8)$$

y tomando como valor de temperatura de referencia la temperatura ambiente (298,15 K).

Para el dominio sólido, el software resuelve

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \nabla \cdot (\vec{v} \rho h) = \nabla \cdot (k \cdot \nabla T) + S_h \quad (7.9)$$

con las mismas variables que la ecuación 7.1

7.2.6.4. Modelo físico de turbulencia

El método utilizado por ANSYS para la resolución del modelo de turbulencia es el método RANS, del inglés *Reynolds Averaged Navier-Stokes*. Este método consiste en descomponer las variables de las ecuaciones de Navier-Stokes en componentes medias y aleatorias, lo que provoca duplicidad de incógnitas y por tanto son necesarias más ecuaciones para la resolución. Sin embargo el coste computacional es menor en comparación con otros métodos. A partir de la hipótesis de Boussinesq [62], se asume que el tensor de esfuerzos de Reynolds depende de forma lineal del gradiente de velocidades.

Los modelos que se desarrollan a partir de la hipótesis de Boussinesq se denominan modelos de cierre de primer orden. Estos modelos se pueden clasificar dependiendo del número de ecuaciones que utilice para obtener la viscosidad turbulenta.

Para la resolución de la turbulencia en la simulación del problema que se plantea se ha escogido el modelo Shear-Stress Transport (SST) $k-\omega$ por su robustez y calidad de resolución del flujo en regiones de influencia de la capa límite. Es un modelo de cierre de primer orden con dos ecuaciones, ya que son los más extendidos en el ámbito de la dinámica de fluidos computacional debido a su validez en un amplio conjunto de problemas y a su buena relación coste computacional-precisión. En él se resuelven dos ecuaciones de transporte, ecuación de energía cinética turbulenta (k) y ecuación de disipación específica de energía cinética turbulenta (ω) [59].

Por otro lado, es necesario determinar las características del régimen del fluido. En este caso, en función del número de Reynolds, ecuación 7.10, donde U_∞ es la velocidad promedio del fluido, c la dimensión característica de la tobera, μ la viscosidad dinámica del fluido y ρ la viscosidad cinemática del fluido.

$$Re = \frac{\rho U_\infty c}{\mu} \quad (7.50)$$

El flujo será laminar si $Re < 2000$, mientras que si $Re > 4000$, el flujo será de régimen turbulento. En el caso que se plantea, el régimen será claramente turbulento.

7.4. Cálculo y simulación en ANSYS Fluent®.

Para proceder con la resolución del problema e inicializar la simulación, es necesario configurar el procesador de la solución [59].

- Primero se selecciona el método de presión. Este es un método numérico utilizado por el software para la resolución del campo de presiones a partir de una ecuación de corrección de la presión proveniente de la ecuación de momento y de continuidad. Para más información consultar [60].
- La descripción del movimiento del fluido a través de la tobera será bidimensional, ya que únicamente la componente en la dirección longitudinal de la tobera y la componente radial serán relevantes para el problema, y además será simétrico respecto del eje axial. Por tanto hay que seleccionar la opción *Axisymmetric* en el apartado general de configuración.
- El análisis se realizará en estado estacionario, seleccionar la opción *Steady*.
- A continuación se habilita la ecuación de la energía en la pestaña *Models* para que la transferencia de calor sea resuelta por el software, y se selecciona el modelo de turbulencia que se mencionó en el apartado 7.2.6.4.
- En la sección *Materials* se configuran los materiales a utilizar, ya sean de la propia base de datos del procesador o materiales personalizados. Para el estudio de la transferencia de calor será necesario introducir la densidad del material, su conductividad térmica y el calor específico.
- En las pestañas *Cell Zone* and *Boundary Conditions* se encuentran las condiciones de contorno y del dominio establecidas en el apartado 7.2.4. Los datos se tomarán del ciclo termodinámico resuelto con el programa GasTurb12. En la tabla 7.3 se especifican los valores a introducir.

Tabla 7.3 Valores de entrada para condiciones de contorno

Condición de contorno	Parámetro	Valor
Pressure inlet	Gauge Total Pressure	156943 Pa
	Initial Gauge Pressure	131225 Pa
	Total temperature	975
Pressure outlet	Gauge Pressure	34975 Pa
	Target Mass Flow Rate	20 kg·s ⁻¹
Internal wall	Wall Flux	0 (Adiabática)
External wall	Heat transfer Coefficient	17 W·m ⁻² ·K ⁻¹ []
	Free Stream Temperature	288,15 K
	External Emissivity	Propiedad del material Consultar [63]
	External Radiation Temperature	288,15 K

- Los valores de entrada y salida se han obtenido con la resolución del ciclo termodinámico, apartado 7.2.2.
- Para el valor del coeficiente de convección se ha consultado [17] y a partir de la ecuación 5.12 y 5.14 se ha estimado el valor para convección natural que muestra la tabla 7.3.
- El término *Gauge Pressure* hace referencia a la presión manométrica o relativa del sistema y se calcula como la diferencia

entre la presión absoluta del sistema y la presión de operación. El software utiliza este valor para la realización de los cálculos. Para ello habrá que indicar también el valor adecuado de presión de operación en la pestaña *Operating Conditions*. Como el problema se plantea a nivel del mar la presión de operación será 1 atm (101325 Pa)

- Valores de *Emisividad Externa* utilizados según [63]:

$$\begin{aligned}\epsilon_{Ti-6Al-4V} &\sim 0,3 \\ \epsilon_{Waspaloy} &\sim 0,25\end{aligned}\quad (7.6)$$

- Los valores *Free Stream Temperature* y *External Radiation Temperature* indican la temperatura de la corriente libre exterior a la tobera y la temperatura de radiación externa respectivamente, valores de referencia para el cálculo de disipación de calor por radiación entre la pared y el entorno. Las temperaturas indicadas son las correspondientes a la temperatura ambiente a nivel del mar.
- En la pestaña *Methods* se encuentran los diferentes métodos de discretización que presenta el programa para obtener la solución. Se selecciona la opción de discretización de primer orden y en el acoplamiento velocidad-presión se selecciona la opción *Coupled*, por ser la combinación más favorable en la resolución de flujos incompresibles. Para ampliar esta información consultar [59] y [61].
- Finalmente se procede a inicializar la solución.

8. Resultados

En este capítulo se procederá a concluir el estudio de la transferencia de calor en la tobera con los resultados obtenidos de la simulación en ANSYS Fluent, así como analizar y contextualizar las propiedades térmicas y mecánicas de los materiales en las condiciones de trabajo planteadas.

8.1. Información general

A continuación se detallan las propiedades y características térmicas y mecánicas de los materiales que han sido analizados y simulados sin reforzar y tras haber conformado el material compuesto correspondiente, tablas 8.1 y 8.2. La figura 8.1 sirve como base de datos de conductividad térmica para la tabla 8.2.

Tabla 8.1 Propiedades térmicas del Waspaloy (Fuente: [27] [37])

	Waspaloy (base Ni)	Waspaloy reforzado con fibras de tungsteno
Densidad (g/cm ³)	8,21	7,1
Conductividad térmica (W/mK)	11,6	65% vol. W ~ 75 50% vol. W ~ 58 (Figura 8.1)
Calor específico (J/kg-K)	513	543
Punto de fusión (K)	1600	~1550
Temperatura máxima de servicio (K)	1030	1366
CTE ($\cdot 10^{-6} K^{-1}$)	12,2	~6

Se ha escogido el mínimo valor de los intervalos recogidos en las tablas 6.2 y 6.3 del apartado 6.2.1.

Tabla 8.2 Propiedades térmicas del Ti-6Al-4V (Fuente: [27]).

	Ti-6Al-4V	Ti-6Al-4V reforzado con partículas de TiC-10% vol.	Ti-6Al-4V reforzado con partículas de TiC-20% vol.
Densidad (g/cm ³)	4,41	4,47	4,52
Conductividad térmica (W/mK)	7,1	6	5,6
Calor específico (J/kg-K)	528	589	584
Punto de fusión (K)	1880	1900	1900
Temperatura máxima de servicio (K)	630	690	730
CTE ($\cdot 10^{-6} K^{-1}$)	9,1	7,86	7,72

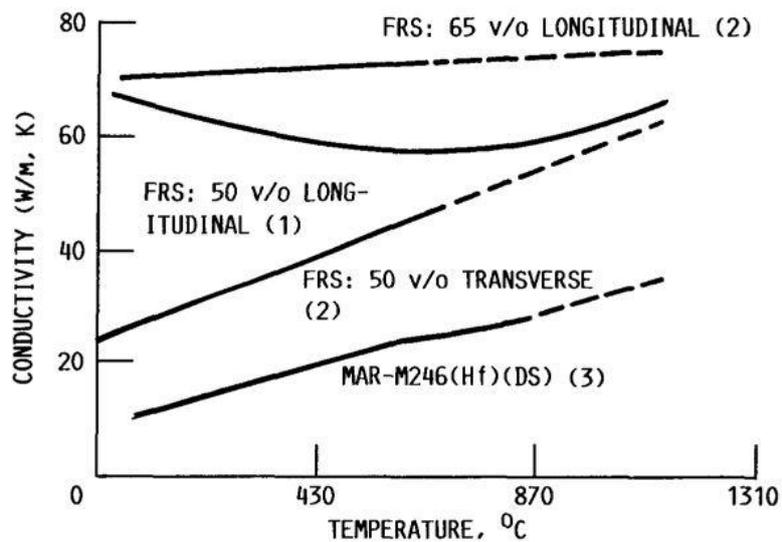


Figura 8.1 Conductividad térmica en función de la temperatura de Waspaloy reforzado (FRS) (Fuente: [37]).

8.2. Distribución de temperatura

En este apartado se van a presentar las simulaciones de gráficas de distribución de las temperaturas a través de la pared de la tobera, para poder comparar los materiales compuestos con las aleaciones sin refuerzo.

8.2.1. Waspaloy / 50%W-Waspaloy

8.2.1.1 No reforzado

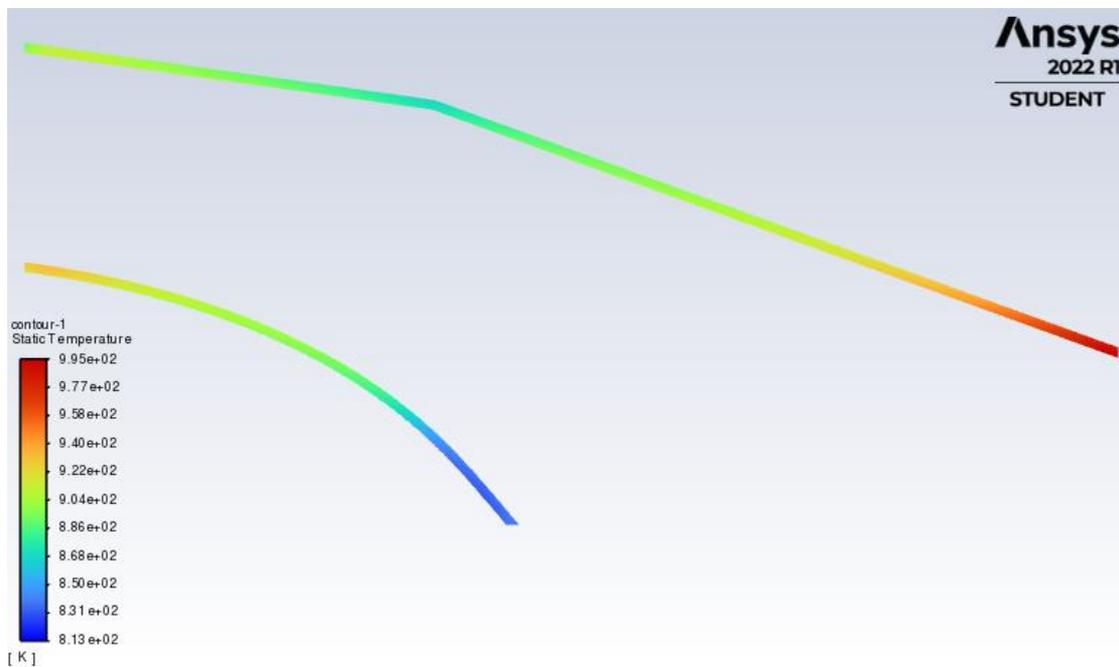


Figura 8.2 Distribución de temperaturas en la tobera para superaleación Waspaloy.

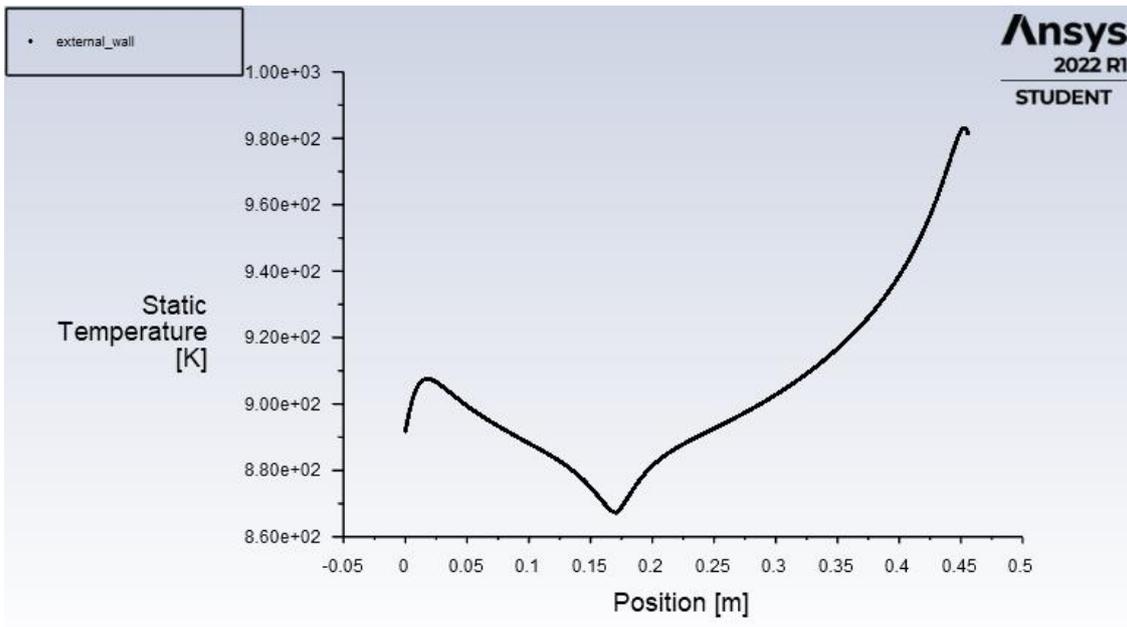


Figura 8.3 Gráfico de temperatura de pared a lo largo del eje longitudinal de la tobera para superaleación Waspaloy.

8.2.1.2 50% vol. W

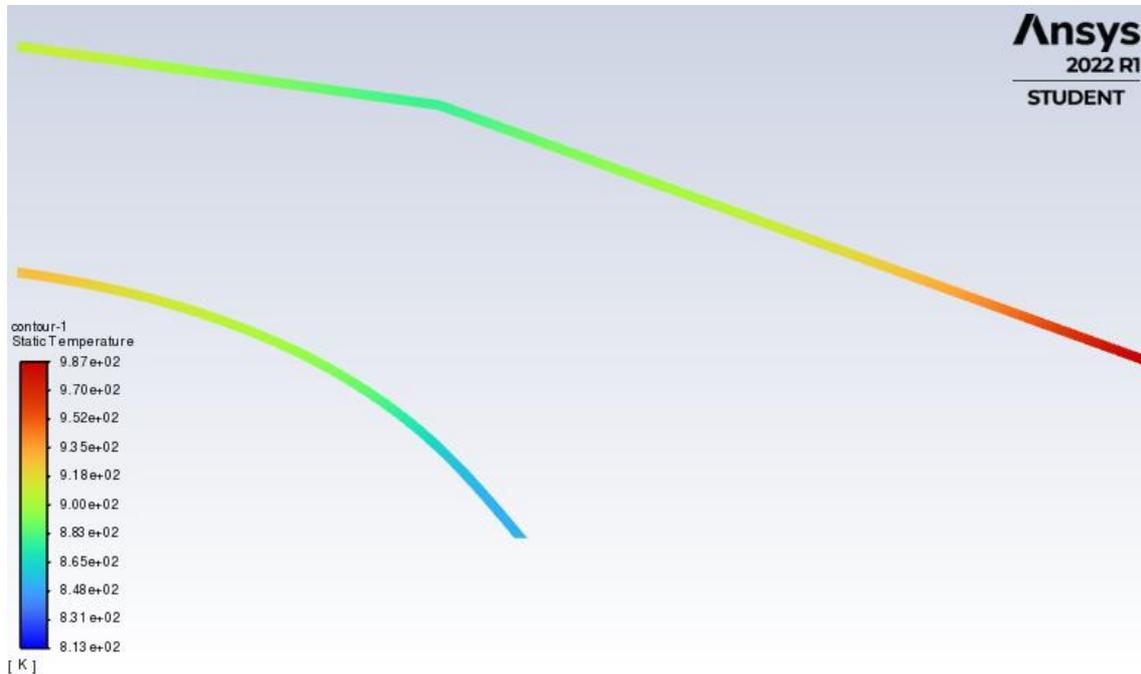


Figura 8.4 Distribución de temperaturas en la tobera para compuesto 50% vol. W-Waspaloy.

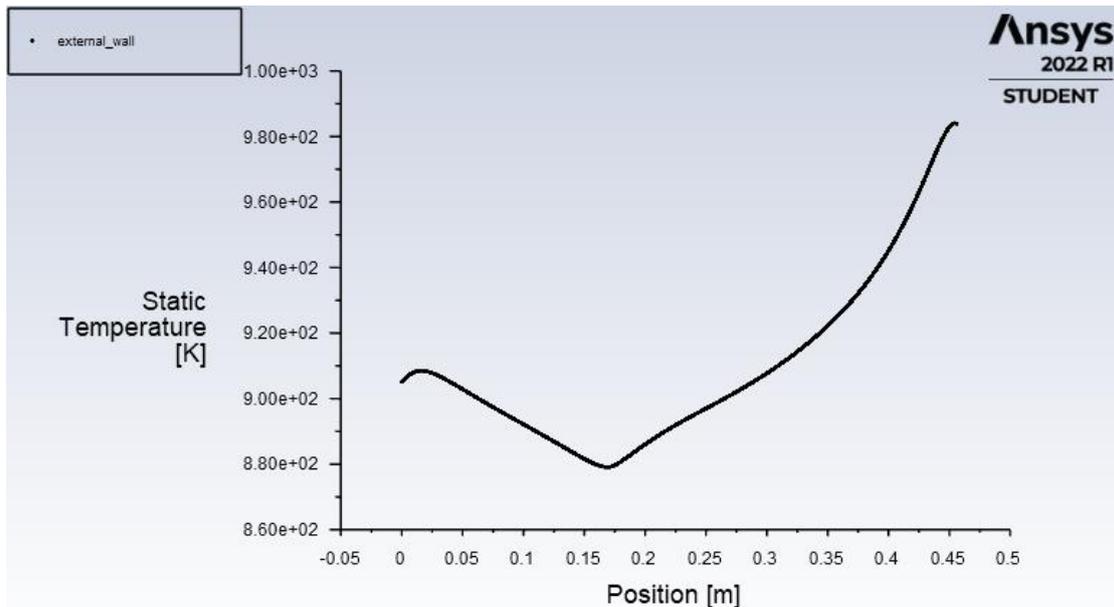


Figura 8.5 Gráfico de temperatura de pared a lo largo del eje longitudinal de la tobera para compuesto 50% vol. W-Waspaloy.

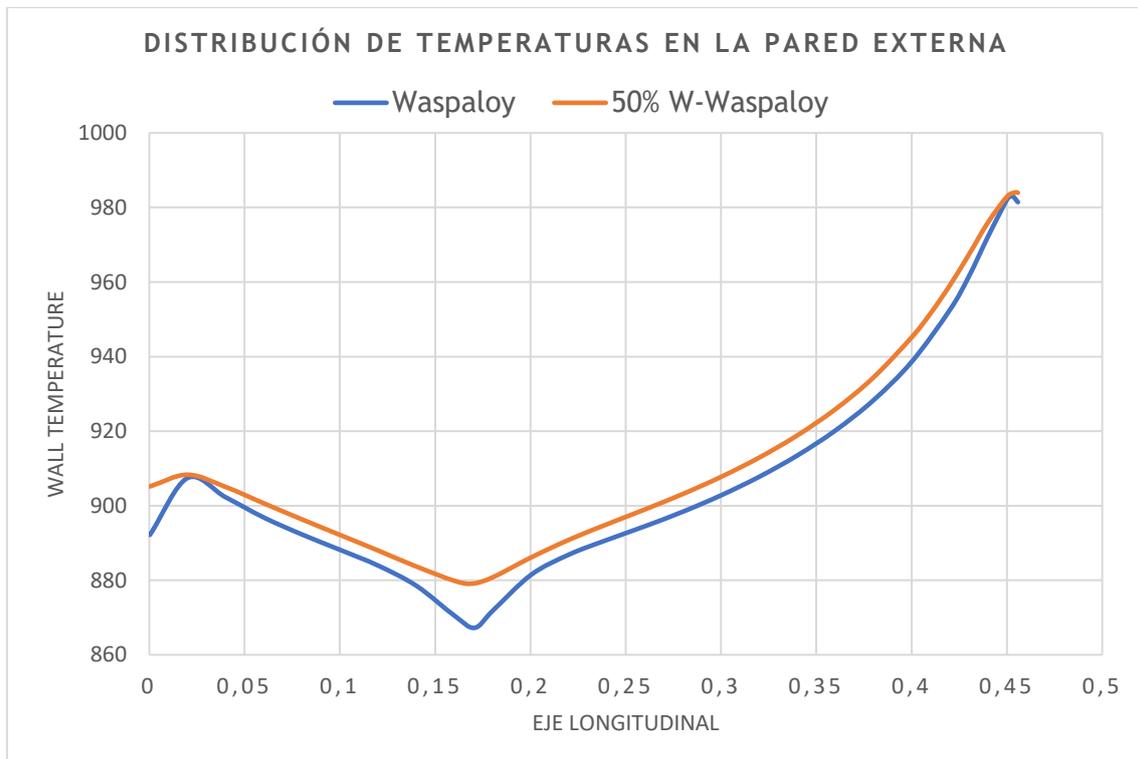


Figura 8.6 Gráfico comparativo de temperatura de pared en superaleación Waspaloy y Waspaloy reforzada.

8.2.2. Ti-6Al-4V / TiC-Ti-6Al-4V

8.2.2.1. No reforzado

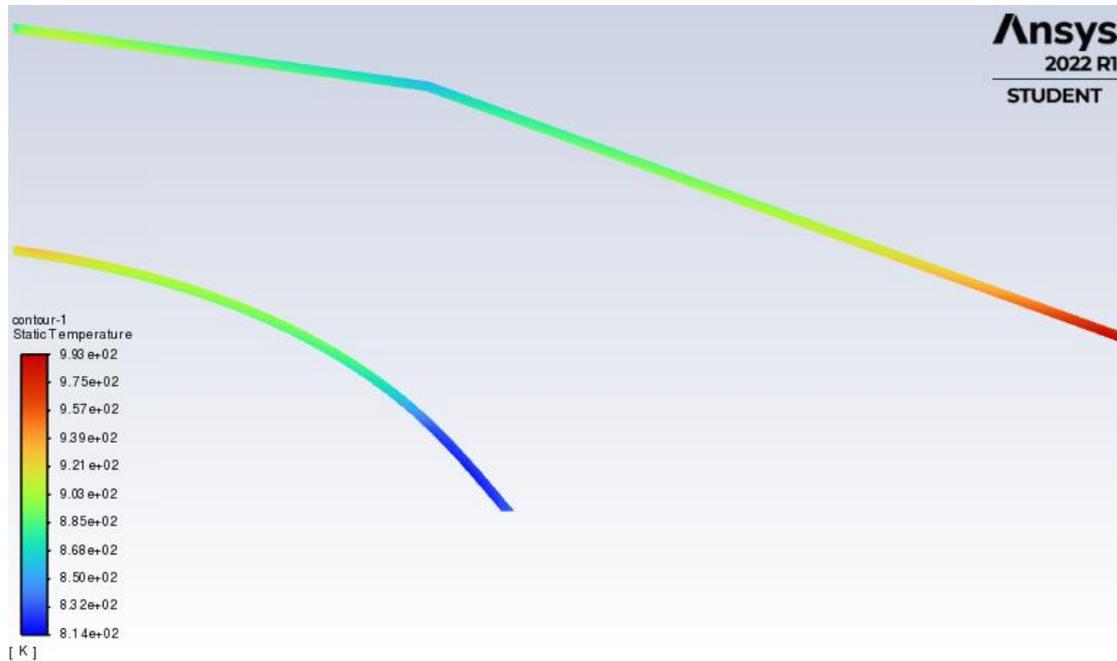


Figura 8.7 Distribución de temperaturas en la tobera para Ti-6Al-4V.

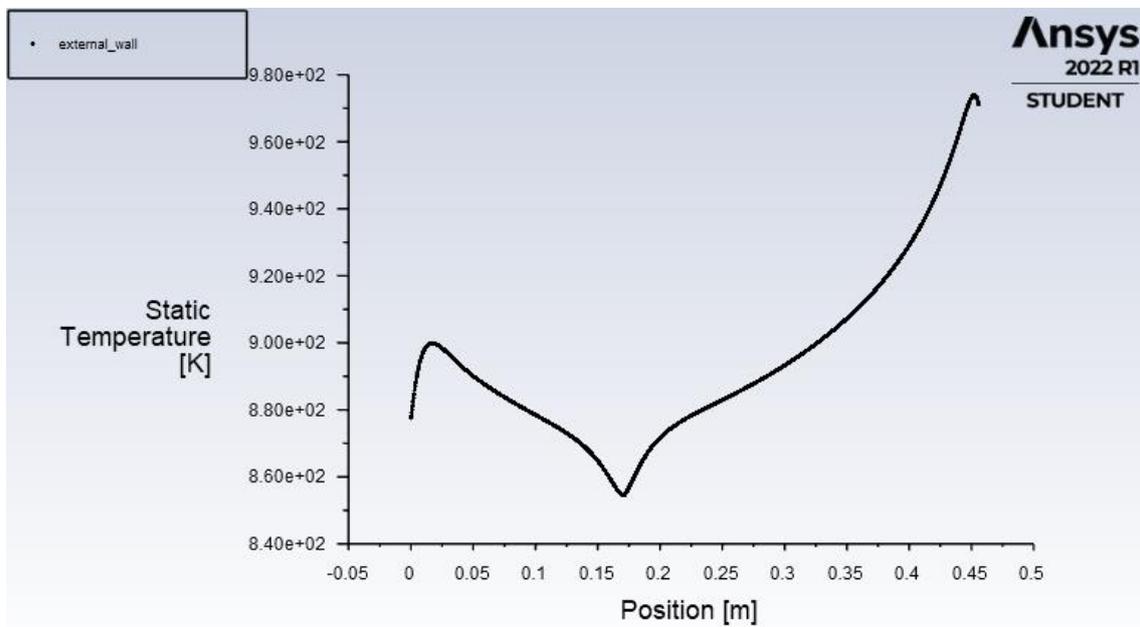


Figura 8.8 Gráfico de temperatura de pared a lo largo del eje longitudinal de la tobera para Ti-6Al-4V.

8.2.2.2. 10% TiC

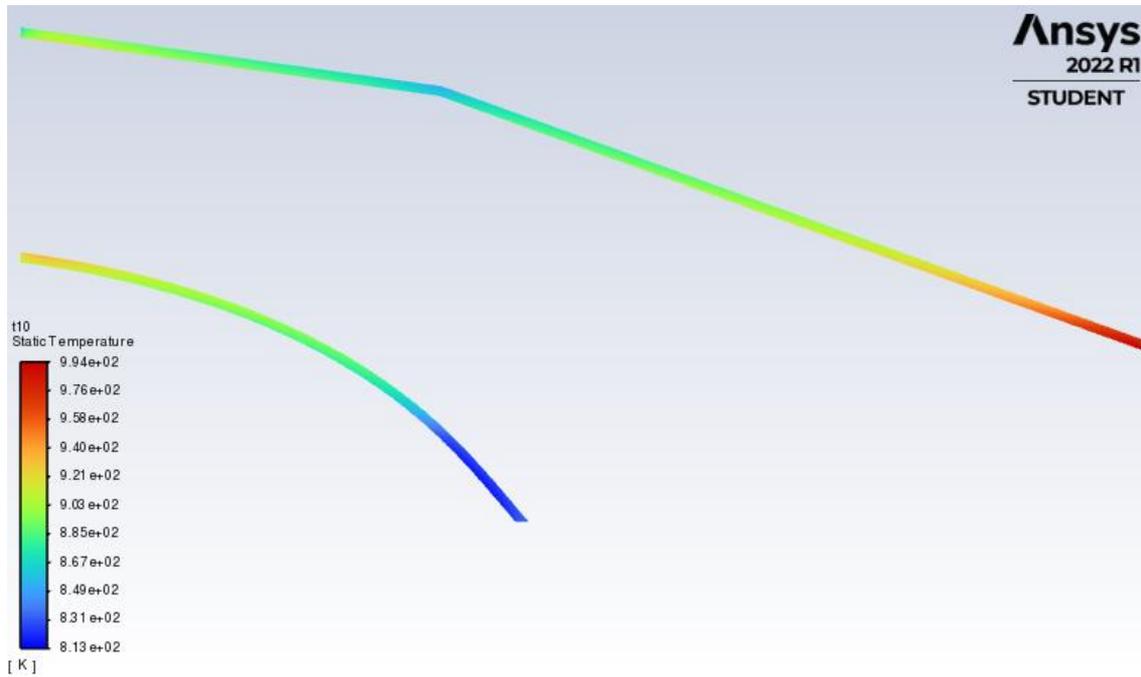


Figura 8.9 Distribución de temperaturas en la tobera para 10%TiC-Ti-6Al-4V.

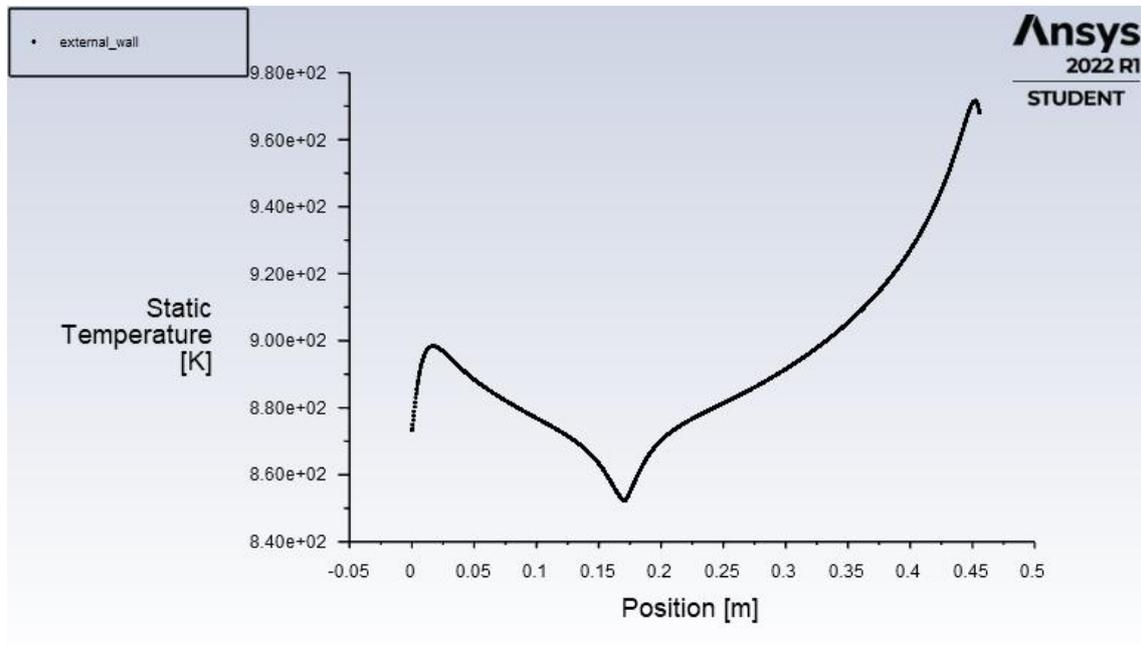


Figura 8.10 Gráfico de temperatura de pared a lo largo del eje longitudinal de la tobera para 10%TiC-Ti-6Al-4V.

8.2.2.3. 20% TiC

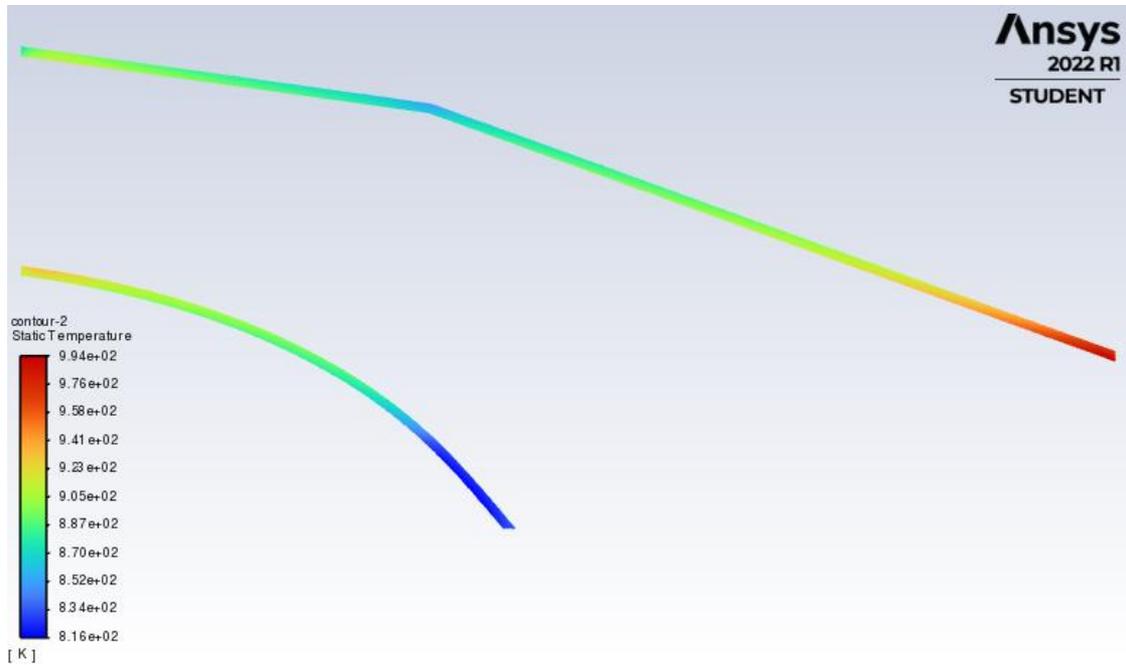


Figura 8.11 Distribución de temperaturas en la tobera para 20%TiC-Ti-6Al-4V.

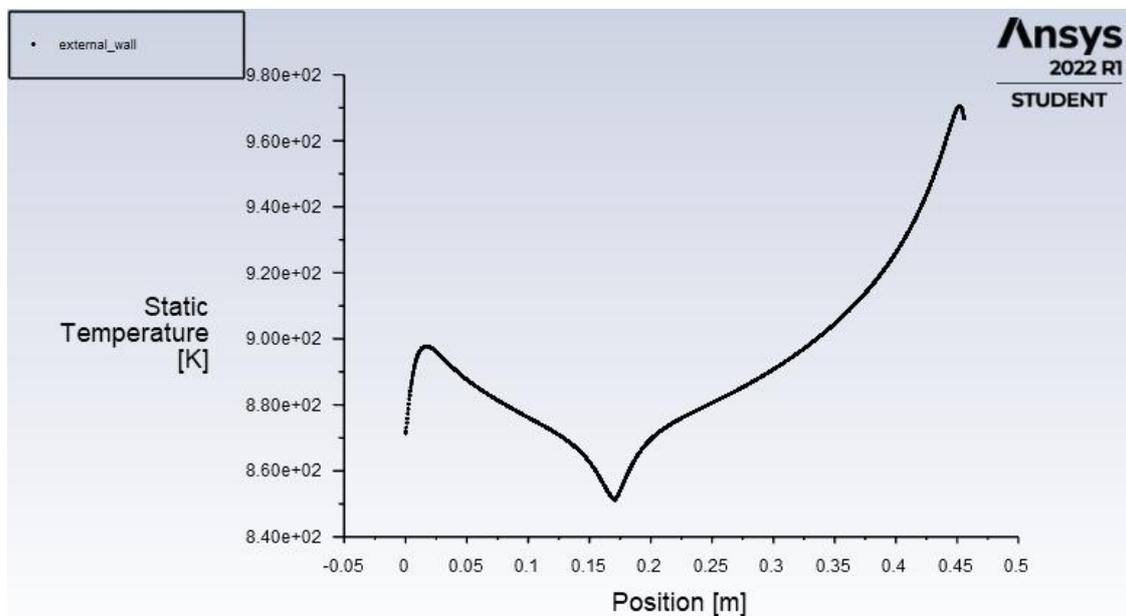


Figura 8.12 Gráfico de temperatura de pared a lo largo del eje longitudinal de la tobera para 20%TiC-Ti-6Al-4V.

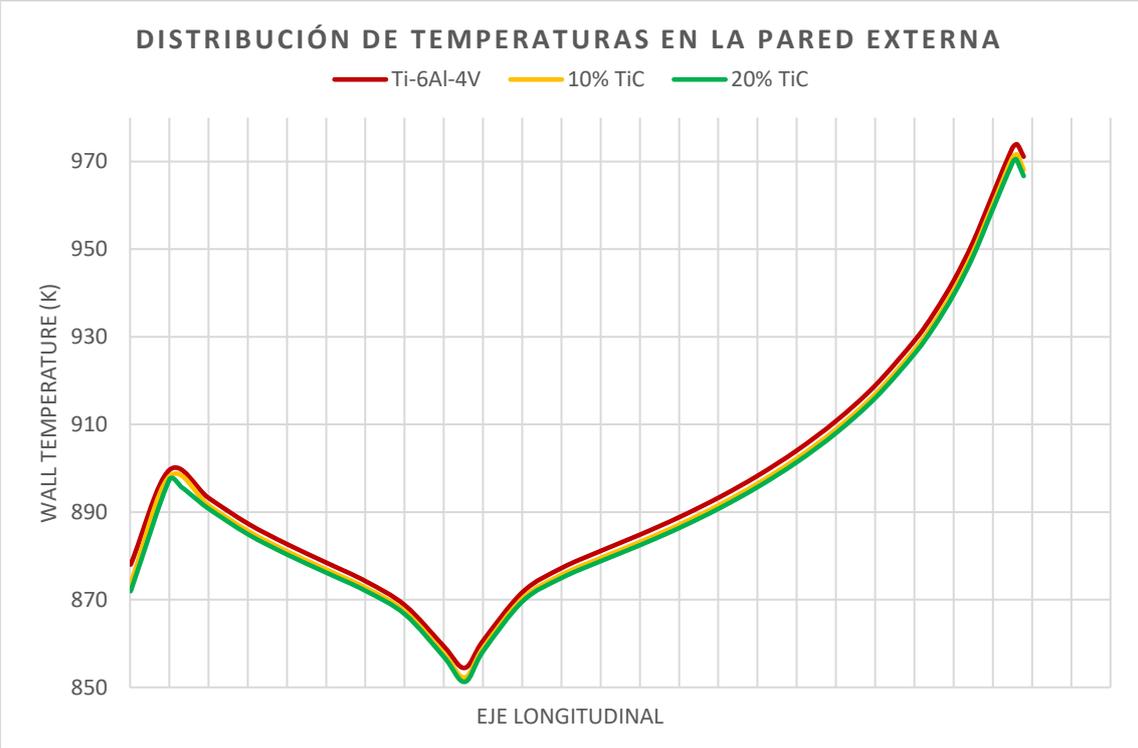


Figura 8.13 Gráfico comparativo de temperatura de pared en las tres aleaciones Ti-6Al-4V.

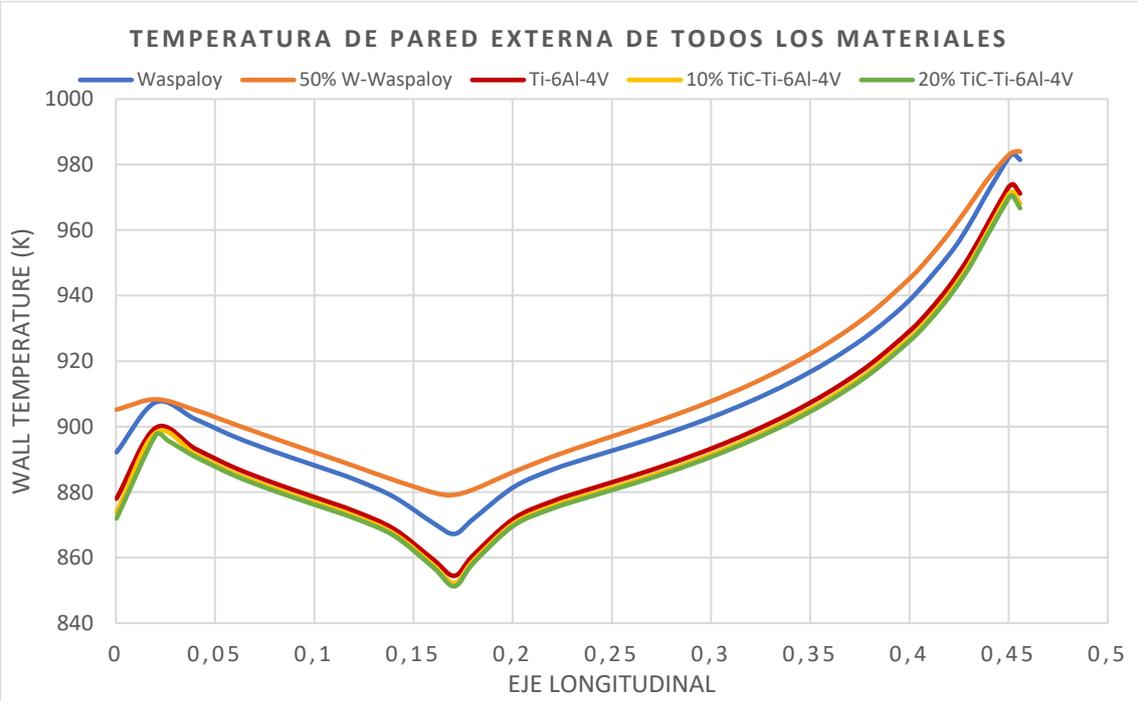


Figura 8.14 Gráfico comparativo de temperatura de pared en ambos materiales.

8.3. Análisis y contexto

Como norma general, debido a que las temperaturas obtenidas en la pared interior del cono de escape de la tobera son considerablemente inferiores a las paredes de la cubierta exterior, el análisis de los resultados se centra exclusivamente en esa región, pues es donde se alcanzan las temperaturas críticas.

En la Figura 8.9 se observa la curva de temperatura de pared externa a lo largo del eje longitudinal de la tobera. La superaleación Waspaloy, debido a su mayor conductividad térmica, llega a alcanzar temperaturas mayores que la aleación de Ti. Sin embargo, no es una gran desventaja ya que además de las mejoras sustanciales en propiedades mecánicas, como se verá a continuación, induce un gradiente de temperaturas inferior en la pared [37]. Esto quiere decir que debido a su mejor conductividad, disipa el calor con mayor eficiencia, por lo que se reducirán considerablemente los esfuerzos térmicos internos. Además la temperatura máxima de servicio sufre una mejora evidente de hasta 300K, por lo que el rango de condiciones de operación crece. En las aleaciones Ti-6Al-4V, la temperatura general de la pared externa es menor, pero el gradiente global de temperaturas es superior al de la superaleación Waspaloy, como se muestra a continuación.

$$\begin{aligned}
 \nabla T (r)_{Ti6Al4V} &= 120,5 \text{ K} \\
 \nabla T (r)_{10\%TiC-Ti6Al4V} &= 119,4 \text{ K} \\
 \nabla T (r)_{20\%TiC-Ti6Al4V} &= 119,25 \text{ K} \\
 \nabla T (r)_{Waspaloy} &= 115,9 \text{ K} \\
 \nabla T (r)_{50\%W-Waspaloy} &= 104,9 \text{ K}
 \end{aligned}
 \tag{8.1}$$

Donde r indica la dirección radial del sistema. Los valores de gradiente de temperatura obtenidos verifican que al disminuir la conductividad térmica aumenta el gradiente, y como consecuencia aumentan los esfuerzos térmicos.

Estos esfuerzos también dependen de otras propiedades como la difusividad térmica. El Waspaloy reforzado aumenta su difusividad en hasta cinco veces en comparación con la superaleación convencional [37]. Estas tensiones internas, generalmente residuales van en detrimento de los valores máximos del límite elástico.

Las diferencias entre la aleación de titanio Ti-6Al-4V y los compuestos formados por la misma matriz reforzada con partículas de TiC son mínimas, aunque es apreciable una ligera disminución de la conductividad térmica al aumentar el porcentaje en volumen del refuerzo (figura 8.13), desventaja que se ve compensada con la mejora de las propiedades mecánicas, como ya se vio en la tabla 6.2 del apartado 6.2.1.2.

En el caso de la superaleación base-Ni Waspaloy, la evolución se hace más evidente. El refuerzo de fibras de tungsteno aumenta la conductividad térmica del compuesto. Según las investigaciones experimentales de D. W. Petrasek et al. [37], en cuanto a resistencia de choque térmico, el material compuesto de matriz Superaleación base NI reforzada con fibras de tungsteno aguantó 20 ciclos en los cuales se indujo un aumento súbito de temperatura hasta sufrir grietas micrométricas en la superficie del compuesto. En comparación con superaleaciones sin reforzar, y otras superaleaciones reforzadas con el mismo material, los resultados obtenidos son favorables.

Es muy importante relacionar las pruebas de choque térmico y fluencia con el coeficiente de expansión térmica. El refuerzo de tungsteno consigue reducir a la mitad este coeficiente, por lo que las tensiones producidas por expansión/contracción del compuesto se reducirá. Además disminuye el riesgo de creación de grietas e imperfecciones en la interfase matriz-refuerzo, la cual se encuentra muy influenciada por la interacción entre ambas fases [37].

En cuanto a la fatiga, el material compuesto W-Re-Hf-C-Waspaloy obtiene resultados excelentes frente a la superaleación, como podemos ver a continuación.

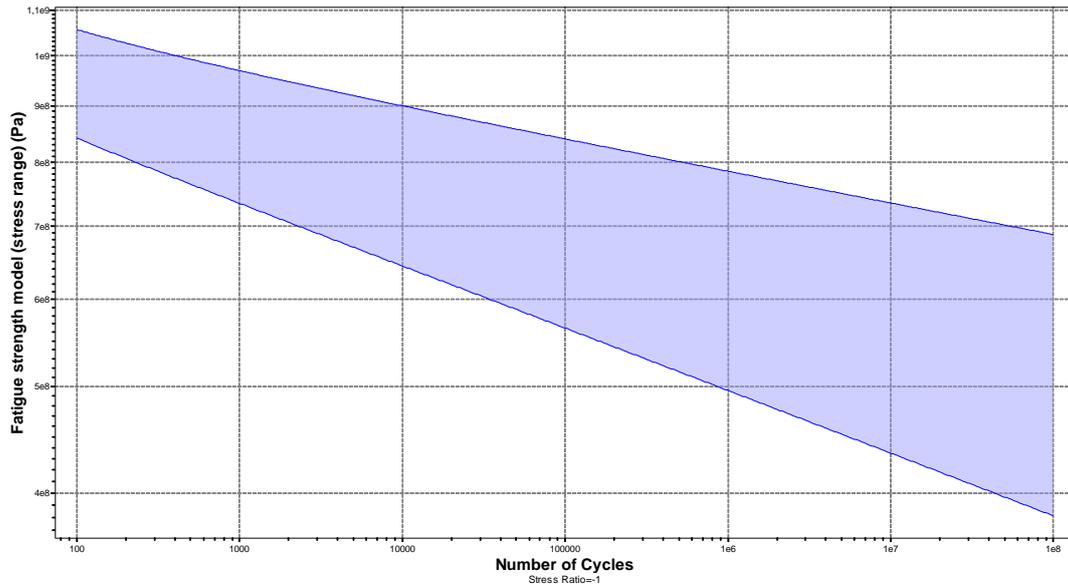


Figura 8.15 N.º de ciclos de vida útil en función de rango de esfuerzos (resistencia a fatiga) para superaleación Waspaloy.

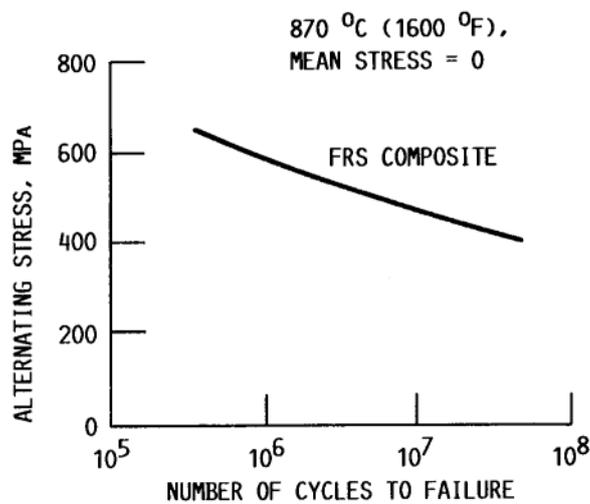


Figura 8.16 Comparación resistencia a fatiga frente a ciclos para falla del material compuesto W- Waspaloy

Comparando las figuras 8.15 y 8.16 se observa un aumento de ciclos de vida útil del material compuesto para mismos rangos de esfuerzo. Así, la superaleación mantendrá una resistencia a fatiga de 430 MPa en 10⁷ ciclos, mientras que el compuesto reforzado soportará hasta 500MPa en el mismo periodo, aunque la

mejora más destacable se produce para 10^5 ciclos, donde el compuesto aumenta en hasta dos órdenes la resistencia a fatiga.

Para la aleación de titanio Ti-6Al-4V y los correspondientes compuestos reforzados, se obtienen los siguientes resultados de resistencia a fatiga.

Tabla 8.3 Resistencia a fatiga para 10^7 ciclos de aleaciones Ti-6Al-4V (Fuente:[14]).

	Ti-6Al-4V	10% TiC-Ti-6Al-4V	20%TiC-Ti-6Al-4V
Resistencia a fatiga para 10^7 ciclos (MPa)	610-630	315-330	330-360

En este caso, añadir el refuerzo perjudica las propiedades del compuesto de resistencia a fatiga. Esto se debe principalmente a un aumento de la rigidez.

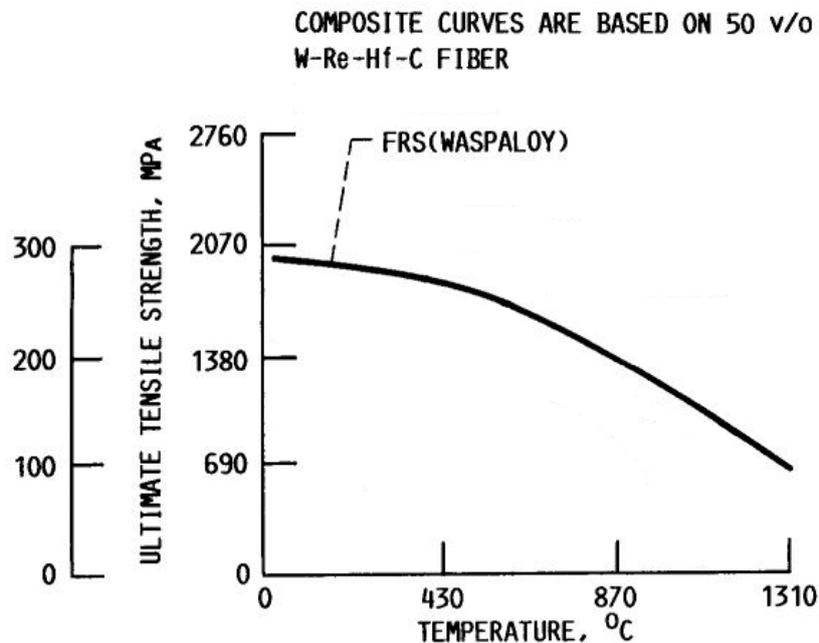


Figura 8.17 Resistencia a tracción en función de la temperatura para compuesto Waspaloy reforzado.

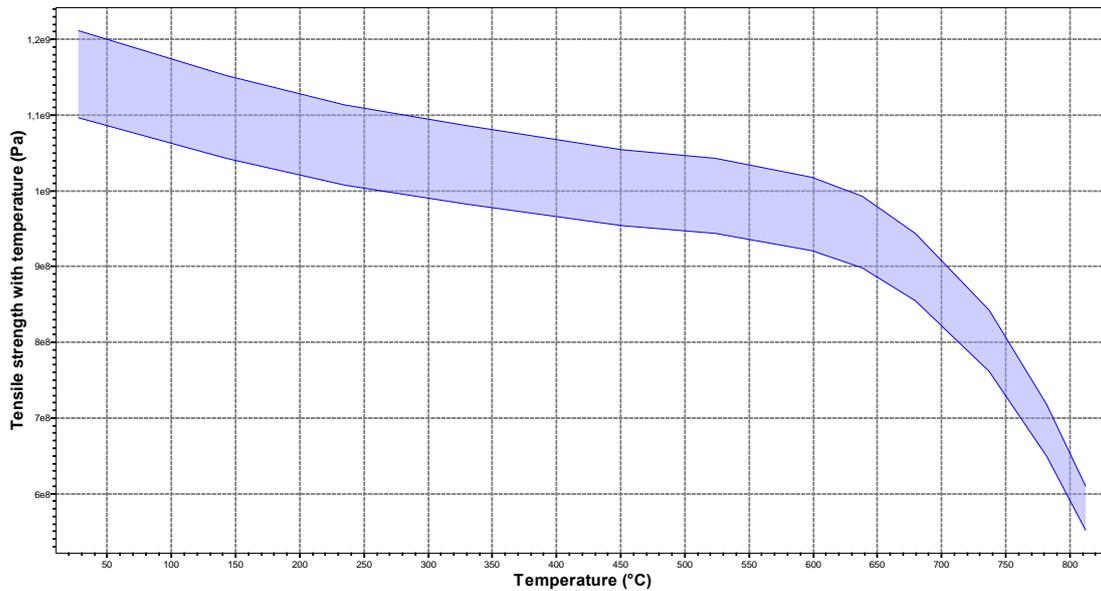


Figura 8.18 Resistencia a tracción en función de la temperatura para superaleación Waspaloy.

Haciendo referencia a la resistencia a la tracción de la figura 8.18, el conformado del material compuesto con refuerzo de tungsteno supone una amplia ventaja, alcanzando valores a elevadas temperaturas mucho mejores que la superaleación convencional. A 500°C Waspaloy obtiene 950 MPa, mientras que el compuesto en la dirección longitudinal de las fibras supera ampliamente 1,5 GPa, pudiendo mantener 1,3 GPa a 900°C y hasta 700 MPa a 1300°C.

En la situación de la aleación de Titanio, las resistencias a tracción respectivas son las descritas en la figura 8.20.

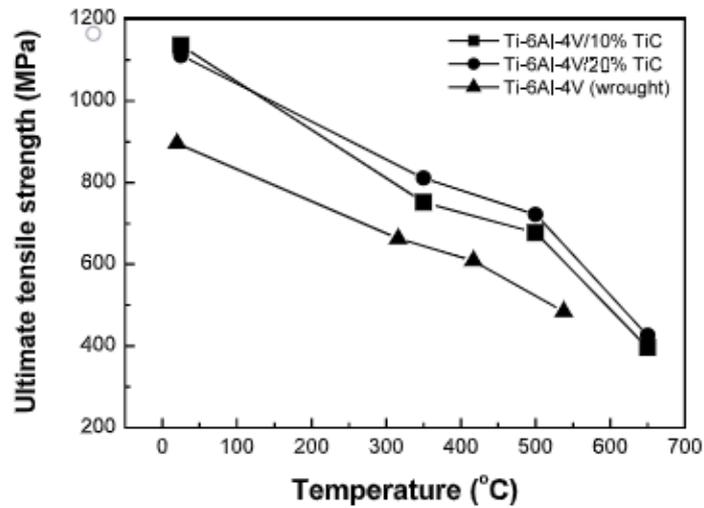


Figura 8.19 Resistencia a tracción en función de la temperatura para aleaciones Ti-6Al-4V. (Fuente: [43])

Se observa que la resistencia a tracción crece con el porcentaje de refuerzo presente en el material compuesto. A 500°C, para un 20% en volumen de TiC se consigue una resistencia cercana a los 800 MPa, para un 10% 700 MPa y apenas 600 para la aleación sin refuerzo. Sin embargo estos valores quedan lejos de los alcanzados por el material compuesto conformado por la superaleación Waspaloy y refuerzo continuo de tungsteno.

9. Conclusiones

Tras haber finalizado el estudio de la transferencia de calor y degradación térmica en MCMM, se pueden extraer algunas conclusiones interesantes.

Los materiales compuestos de matriz metálica presentan propiedades y características notablemente superiores a sus competidores, como pueden ser aleaciones, superaleaciones y otros materiales compuestos. Son un avance significativo en el ámbito de la industria aeroespacial, pues amplían las prestaciones del motor; reducción de peso, aumento de temperatura de servicio, prolongación de vida útil del motor y componentes de la aeronave.

El proceso previo de investigación y selección del refuerzo que se va a utilizar en un material compuesto es clave para maximizar las propiedades y garantizar un buen rendimiento de este. La región de la interfase es un punto crítico en la compleja microestructura de los materiales compuestos, por lo que se debe prestar especial atención a los posibles efectos de reactividad entre las fases que los componen. Esto permitirá realizar hipótesis acertadas y fabricar el material de manera óptima y conforme a las necesidades.

El titanio en aleación con otros metales es un material potencialmente ventajoso en su aplicación como matriz a materiales compuestos. Tras reforzarse con partículas cerámicas se pone de manifiesto su elevada temperatura de servicio y los excelentes valores de resistencia a tracción, termofluencia, choque térmico y fatiga lo posiciona en ventaja frente al resto de materiales.

El refuerzo de superaleaciones para la fabricación de materiales compuestos puede significar un avance sustancial en la mejora de las propiedades de los MCMM, como se pone de manifiesto en este trabajo. Los resultados obtenidos son incluso mejores que los de materiales que están expandidos en la industria actual y que ya presentan propiedades y características excepcionales, como es el caso de los materiales compuestos matriz de titanio aplicados a componentes de alta temperatura de turbinas de gas o motores alternativos

sometidos a grandes esfuerzos estructurales. Sin embargo es una tecnología en vías de desarrollo, debido a una investigación incipiente. Las razones principales son los costes de fabricación y la posible rentabilidad del compuesto final.

En líneas generales, un coeficiente de expansión térmica reducido (que depende de la proporción volumétrica de refuerzo que se añade a la fase continua) y una conductividad térmica lo suficientemente aceptable para optimizar la disipación de calor, determinan el buen desempeño de un material en situaciones de temperatura elevada.

Haber utilizado una herramienta CFD como es ANSYS Fluent® para realizar la simulación permite conseguir resultados muy interesantes, tanto por la gran cantidad de datos que proporciona como por la presentación y lectura de estos. Los mapas de temperatura, gráficas y variables a representar facilitan el proceso de obtención de hipótesis y comparaciones razonadas.

Por último, el proceso de fabricación del material compuesto juega un papel esencial en su conformado, tanto por el propio mecanizado como por la regulación de las propiedades térmicas y mecánicas que se le pueden conferir. Algunas técnicas, como la compactación en caliente por SPS en procesos de pulvimetalurgia permiten obtener resultados muy superiores a otros métodos de manufactura convencionales.

La fabricación aditiva es un nuevo mecanismo de fabricación con el que se pueden conseguir importantes mejoras en el procesado de materiales compuestos. En la actualidad no es un método utilizado con asiduidad debido a los costes de producción y a su reducida productividad.

Bibliografía

- [1] A. Zarabozo, «Propulsión. Teoría,» 2011. [En línea]. Available: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/dc/Propulsi%C3%B3n_Turborreactor_-_Ingenier%C3%ADa_aeron%C3%A1utica_-_ETSEIAT_-_UPC.pdf. [Último acceso: 10 Junio 2022].
- [2] A. Corsini, «Nozzle Theory,» [En línea]. Available: [http://www.ingmecc.uniroma1.it/attachments/2900_4.%20FMEC%20Nozzle%20theory%20\(1\).pdf](http://www.ingmecc.uniroma1.it/attachments/2900_4.%20FMEC%20Nozzle%20theory%20(1).pdf). [Último acceso: 10 Junio 2022].
- [3] J. D. Mattingly, Elements of Gas Turbine Propulsion, 2005.
- [4] W. D. Callister, Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales.
- [5] W. J. W. Donald R. Askeland, Ciencia e ingeniería de materiales, Cengage Learning, 2016.
- [6] Netinbag, «En física, ¿qué es un fonón?,» [En línea]. Available: <https://www.netinbag.com/es/science/in-physics-what-is-a-phonon.html>. [Último acceso: 22 Junio 2022].
- [7] J. F. Shackelford, Introducción a la ciencia de materiales para ingenieros, PEARSON EDUCACIÓN, 2005.
- [8] M. Espinosa, «Obtención del módulo de elasticidad y razón de Poisson en diferentes grados de acero al manganeso,» 2000. [En línea]. Available: <http://eprints.uanl.mx/738/1/1020133333.PDF>. [Último acceso: 26 Junio 2022].
- [9] Universidad de Sevilla, «Bases teóricas,» [En línea]. Available: <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/4291/fichero/2.-+BASES+TE%C3%93RICAS.pdf>. [Último acceso: 5 Julio 2022].
- [10] Frank P. Incropera et al., Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 2006.

- [11] C. Gherardelli, «Capítulo 10, Capa límite,» [En línea]. Available: <https://www.kimerius.com/app/download/5784202870/Capa+l%C3%ADmite.pdf>. [Último acceso: Agosto 2022].
- [12] Agustín Martín Domingo,, «Apuntes de Transmisión de calor,» [En línea]. Available: <https://oa.upm.es/6935/1/amd-apuntes-transmision-calor.pdf>. [Último acceso: Agosto 2022].
- [13] J. Holman, «Transferencia de Calor,» 1999. [En línea]. Available: <https://fenomenosdetransporte.files.wordpress.com/2008/10/transfere-ncia-de-calor-holman.pdf>. [Último acceso: Julio 2022].
- [14] Universidad de Granada, «Teoremas de Stokes y Gauss,» [En línea]. Available: <https://www.ugr.es/~rpaya/documentos/Teleco/Fund-Mat09.pdf>. [Último acceso: Agosto 2022].
- [15] Universidad de Valencia, Departamento de Química-Física, «Fenómenos de transporte y conductividad,» 2020. [En línea]. Available: https://www.uv.es/tunon/QFIII/Nuevo_Tema_3.pdf. [Último acceso: Agosto 2022].
- [16] J. Corberán y R. Royo, «Tema8: Introducción a la convección,» [En línea]. Available: <http://www.upv.es/upl/U0296621.pdf>. [Último acceso: Julio 2022].
- [17] S. M. Martínez, «Estudio experimental del proceso de transferencia de calor por convección,» 2019. [En línea]. Available: <https://tauja.ujaen.es/bitstream/10953.1/14215/1/TFG%20Sergio%20Martinez%20Martinez%20Estudio%20experimental%20del%20proceso%20de%20Transferencia%20de%20Calor%20por%20Conveccion.pdf>. [Último acceso: Julio 2022].
- [18] F. Stupenengo, «Materiales compuestos,» de *Materiales y materias primas*, 2011.

- [19] A. M. Borque y M. N. López, «Materiales compuestos,» de *Materiales de última generación y materiales eficientes*, 2007.
- [20] S. Y. Karaoglu, S. Karaoglu y I. Unal, «Aerospace Industry and Aluminum Metal Matrix Composites,» *International Journal of Aviation Science and Technology*, vol. II, pp. 73-81, 2021.
- [21] C. E. d. Costa, F. V. López y J. M. T. Castelló, «Materiales compuestos de matriz metálica. I parte. Tipos, propiedades,» *Revista de metalurgia*, pp. 179-192, 2000.
- [22] «MatWeb material property data,» [En línea]. Available: <https://www.matweb.com/index.aspx>. [Último acceso: Agosto 2022].
- [23] S. N. Trinh y S. Sastry, «Processing and Properties of Metal Matrix Composites,» 2016. [En línea]. Available: <https://openscholarship.wustl.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1012&context=mems500>. [Último acceso: Agosto 2022].
- [24] A. R. Ortega, «Caracterización Microestructural y Mecánica de TiMMCs reforzados con Carburo de Boro y Boro amorfo producidos por técnicas avanzadas de compactación en caliente,» Sevilla, 2015.
- [25] M-L Antti et al., «Effect of silicon on creep properties of titanium 6Al-2Sn-4Zr-2Mo alloy,» 2020. [En línea]. Available: <https://5dok.org/document/ky6m707q-effect-silicon-creep-properties-titanium-al-sn-alloy.html>. [Último acceso: Agosto 2022].
- [26] M. Perez-Prado y M. Kassner, «Creep of Intermetallics, Fundamentals of Creep in Metals and Alloys,» 2015. [En línea]. Available: <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/titanium-aluminide>. [Último acceso: Julio 2022].
- [27] *Base de datos CES EduPack 2019*.
- [28] M. Balat-Pichelin et al., «Emissivity at high temperature of Ni-based superalloys for the design of solar receivers for future tower power

- plants,» 2021. [En línea]. Available: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927024821001082?ref=pdf_download&fr=RR-2&rr=747361d6cf36666b. [Último acceso: Agosto 2022].
- [29] M. H. Rodríguez, «Desarrollo de intermetalicos TiAl mediante técnicas pulvimetalúrgicas convencionales y de alta densificación (Spark Plasma Sintering),» 2013. [En línea]. Available: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/51139/Tesis.pdf?sequence=1>. [Último acceso: Agosto 2022].
- [30] J. Cárdenas, «Superalaciones,» 2015. [En línea]. Available: http://olimpia.cuautitlan2.unam.mx/pagina_ingenieria/mecanica/mat/mat_mec/m6/superalaciones.pdf. [Último acceso: Agosto 2022].
- [31] Rodríguez, Ángel Silvio Machado et al., «Sinterización, un proceso de conformación de metales como alternativa económica con un bajo impacto ambiental,» 2017. [En línea]. Available: <http://scielo.sld.cu/pdf/caz/v44n3/caz09317.pdf>. [Último acceso: Agosto 2022].
- [32] S. Mileiko, «Metal and Ceramic Based Composites,» 1997. [En línea]. Available: <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/titanium-aluminide>. [Último acceso: Julio 2022].
- [33] R. Ramaswamy, P. Marimuthu y B. Selvam, «An overview on mechanical properties of particulate reinforced Ti6Al4V metal matrix composites,» 2016. [En línea]. Available: https://www.researchgate.net/profile/P-Marimuthu/publication/304023556_An_overview_on_mechanical_properties_of_particulate_reinforced_Ti6Al4V_metal_matrix_composites/links/5763c00908ae570d6e15cb64/An-overview-on-mechanical-properties-of-particulate-reinfo. [Último acceso: Agosto 2022].

- [34] M. G. d. Cortázar, «Development of new reinforced titanium alloy: Basic research and technological transfer for the Ti-6Al-4V/TiB material,» 2006.
- [35] V. F.-C. d. l. Serna, «Materiales Compuestos de Matriz de Aluminio para Aplicaciones Aeronáuticas,» 2015. [En línea]. Available: https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/25345/PFC_Victoria_FernandezCavada_de%20la%20Serna.pdf. [Último acceso: Agosto 2022].
- [36] N. M. d. Amo, «Fabricación y caracterización de materiales compuestos de matriz metálica reforzados con nanofibras de carbono,» 2010. [En línea]. Available: <https://eprints.ucm.es/id/eprint/11289/1/T32130.pdf>. [Último acceso: Agosto 2022].
- [37] D. W. Petrasek y J. R. Stephens, «Fiber Reinforced Superalloys for Rocket Engines,» 1988. [En línea]. Available: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19890006619/downloads/19890006619.pdf>. [Último acceso: Julio 2022].
- [38] C. Sánchez de Rojas Candela et al., «Ti6Al4V/SiC Metal Matrix Composites Additively Manufactured,» 2021. [En línea]. Available: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s12540-022-01191-y.pdf>. [Último acceso: Agosto 2022].
- [39] R. J. Prieto, «Fabricación de materiales compuestos de matriz metálica y base grafito para aplicaciones de control térmico de dispositivos electrónicos,» 2012. [En línea]. Available: https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/26818/1/Tesis_Richard_Jose_Prieto.pdf. [Último acceso: Agosto 2022].
- [40] A. Sánchez, «Preparación de Materiales Compuestos por Infiltración de Grafito con Aleaciones Metálicas Ligeras,» 2007. [En línea]. Available: <https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/13250/1/Sanchez-Martinez-Segundo-Antonio.pdf>. [Último acceso: Julio 2022].

- [41] I. Pohrelyuk, S. Lavrys y D. Savvakin, «Tribological Behaviour of Ti-6Al-4V Matrix Composites reinforced with TiC,» de *The 10th International Conference BALTRIB*, 2019.
- [42] Elisa María Ruiz-Navas et al., «Aleación mecánica: Método de obtención de polvos metálicos y de materiales compuestos,» 2000. [En línea]. Available: https://www.researchgate.net/profile/J-Torralba/publication/45259197_Aleacion_mecanica_Metodo_de_obtencion_de_polvos_metalicos_y_de_materiales_compuestos/links/00b4951a39eaad5ff8000000/Aleacion-mecanica-Metodo-de-obtencion-de-polvos-metalicos-y-de-materia. [Último acceso: Julio 2022].
- [43] Y.-J. Kim, H. Chung y S.-J. L. Kang, «Processing and mechanical properties of Ti-6Al-4V/TiC in situ composite fabricated by gas-solid reaction,» 2001. [En línea]. Available: [https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921509301018585?fr=RR-2&ref=pdf_download&rr=7473677cd91f666b.](https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921509301018585?fr=RR-2&ref=pdf_download&rr=7473677cd91f666b) [Último acceso: Agosto 2022].
- [44] C. E. d. Costa, F. V. López y J. M. T. Castelló*, «Materiales compuestos de matriz metálica. II parte. Métodos de procesado y consolidación de MMCs reforzados con partículas,» 2000. [En línea]. Available: [file:///C:/Users/cvega/Downloads/571-Article%20Text-588-1-10-20100630%20\(2\).pdf](file:///C:/Users/cvega/Downloads/571-Article%20Text-588-1-10-20100630%20(2).pdf). [Último acceso: Agosto 2022].
- [45] P.G. Esteban et al., «Introducción al procesado pulvimetalúrgico del titanio,» 2011. [En línea]. Available: <http://digital.csic.es/bitstream/10261/53653/1/Rev.Met,47,2,Got.pdf>. [Último acceso: Agosto 2022].
- [46] M.A Lagos et al., «Fabrication and characterisation of Titanium Matrix Composites obtained using a combination of Self propagating High temperature Synthesis and Spark Plasma Sintering,» 2016. [En línea]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S09215093153>

07498?fr=RR-2&ref=pdf_download&rr=747465310f3d3670. [Último acceso: Agosto 2022].

- [47] S. A. V. Torres y S. Y. García, «Propuesta de un control difuso de temperatura para una máquina de sinterizado por arco eléctrico,» 2016. [En línea]. Available: <https://docplayer.es/121307751-Instituto-politecnico-nacional.html>. [Último acceso: Julio 2022].
- [48] G. Santamaría, Electrotecnia, EDITEX S.A., 2009.
- [49] F. J. B. Osorio, «Evaluación del comportamiento a elevadas temperaturas de recubrimientos de Al, Si depositados mediante deposición química de vapor sobre aceros ferrítico-martensíticos,» 2007. [En línea]. Available: <https://eprints.ucm.es/id/eprint/7551/1/T29978.pdf>. [Último acceso: Julio 2002].
- [50] H. a. cultura, «Fusión selectiva por láser,» [En línea]. Available: <https://www.hisour.com/es/selective-laser-melting-40644/>. [Último acceso: Agosto 2022].
- [51] M. A. Navarro, «Desarrollo de estructuras porosas de aleaciones de titanio mediante técnicas aditivas,» 2016. [En línea]. Available: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/73191/AUTOGGANT%20-%20Desarrollo%20de%20estructuras%20porosas%20de%20aleaciones%20de%20titanio%20mediante%20t%C3%A9cnicas%20aditivas.pdf?sequence=1>. [Último acceso: Agosto 2022].
- [52] E. Toyserkani, A. Khajepour y S. Corbin, «Laser Cladding,» 2005. [En línea]. Available: file:///C:/Users/cvega/Downloads/Laser_Cladding.pdf. [Último acceso: Agosto 2022].
- [53] B. R. Swopes, «This Day in Aviation, General Electric CJ610-4,» 2018. [En línea]. Available: <https://www.thisdayinaviation.com/tag/general-electric-cj610-4/>. [Último acceso: 15 Julio 2022].

- [54] «Wikipedia, General Electric CJ610-4,» [En línea]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/General_Electric_CJ610. [Último acceso: Junio 2022].
- [55] General Electric Company, «Technical Manual Index - GE Aviation Manual Index CJ610 TURBOJET,» 2018. [En línea]. Available: <https://dokumen.tips/documents/motor-ge-cj610-1.html?page=1>. [Último acceso: Junio 2022].
- [56] GE Aircraft Engines, «Maintenance manual, CJ610 Illustrated Parts Catalog,» 2000. [En línea]. Available: https://www.scribd.com/document_downloads/direct/314309252?extension=pdf&ft=1657571650<=1657575260&user_id=621755389&uahk=0P SMEP1Ttku1sj055_9AnCLvUpA. [Último acceso: Junio 2022].
- [57] García-Cuevas González, Luis Miguel et al., «Mecánica de fluidos computacional: tipos de mallas y calidad del mallado,» [En línea]. Available: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/146219/Garc%C3%ADa-Cuevas%3BGil%3BNavarro%20-%20Mec%C3%A1nica%20de%20fluidos%20computacional%3A%20tipos%20de%20mallas%20y%20calidad%20del%20mall....pdf?sequence=1>. [Último acceso: Junio 2022].
- [58] A. D. Morcillo, «Métodos de mallado y algoritmos adaptativos en dos y tres dimensiones para la resolución de problemas electromagnéticos cerrados mediante el método de los elementos finitos,» 2000. [En línea]. Available: <https://repositorio.upct.es/bitstream/handle/10317/772/adm.pdf>. [Último acceso: Junio 2022].
- [59] «ANSYS Fluent User Guide,» [En línea]. Available: <http://www.pmt.usp.br/academic/martoran/notasmodelosgrad/ANSYS%20Fluent%20Users%20Guide.pdf>. [Último acceso: Julio, Agosto 2022 Julio, Agosto].

- [60] P. J. C. Sánchez, «Estudio del flujo en la tobera del motor cohete J-2S mediante técnicas CFD,» 2014. [En línea]. Available: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/50358/TFG%20-%20Cases%20S%C3%A1nchez%2C%20P.J..pdf?sequence=1&isAllowed=y>. [Último acceso: Julio 2022].
- [61] «ANSYS Fluent Theory Guide,» [En línea]. Available: <http://www.pmt.usp.br/academic/martoran/notasmodelosgrad/ANSYS%20Fluent%20Theory%20Guide%2015.pdf>. [Último acceso: Julio, Agosto 2022].
- [62] «Capítulo 3, Modelo matemático,» 2007. [En línea]. Available: <https://repositorio.upct.es/bitstream/handle/10317/153/Cap%C3%ADtulo%203.pdf?sequence=5>. [Último acceso: Julio 2022].
- [63] «Descripción y tablas de Emisividad,» [En línea]. Available: https://node1.123dok.com/dt02pdf/123dok_es/002/815/2815639.pdf.pdf?X-Amz-Content-Sha256=UNSIGNED-PAYLOAD&X-Amz-Algorithm=AWS4-HMAC-SHA256&X-Amz-Credential=7PKKQ3DUV8RG19BL%2F20220904%2F%2Fs3%2Faws4_request&X-Amz-Date=20220904T014754Z&X-Amz-SignedHeaders=h. [Último acceso: Agosto 2022].