



UNIVERSIDADE DA CORUÑA

Escola Politécnica Superior. Ferrol

**TRABAJO
FIN DE GRADO**



**INGENIERÍA EN
TECNOLOGÍAS
INDUSTRIALES**

Título:

**LASER CLADDING CON APORTE DE
POLVO Y APORTE DE HILO: ESTUDIO
COMPARATIVO**

Autor:

FRANCISCO JAVIER RODRÍGUEZ GARCÍA

Fecha:

DICIEMBRE 2016



UNIVERSIDADE DA CORUÑA

Escola Politécnica Superior. Ferrol

**TRABAJO
FIN DE GRADO**



**INGENIERÍA EN
TECNOLOGÍAS
INDUSTRIALES**

Título:

**LASER CLADDING CON APORTE DE
POLVO Y APORTE DE HILO: ESTUDIO
COMPARATIVO**

Tutores:

**ALICIA MORENO MADARIAGA
ARMANDO JOSÉ YÁÑEZ CASAL**

Autor:

**FRANCISCO JAVIER
RODRÍGUEZ GARCÍA**

Fecha:

DICIEMBRE 2016

Índice

1. Motivación y objetivos.....	6
2. Fundamentos.....	9
2.1. Materiales.....	9
2.1.1. Estructura cristalina en los materiales.....	9
2.1.1.1. Sistemas cristalinos y celdas unitarias.....	9
2.1.1.2. Defectos.....	16
2.1.1.2.1. Defectos puntuales.....	16
2.1.1.2.2. Defectos lineales.....	18
2.1.1.2.3. Defectos superficiales.....	19
2.1.2. Difusión.....	20
2.1.3. Solidificación.....	21
2.1.3.1. Subenfriamiento.....	21
2.1.3.2. Nucleación.....	22
2.1.3.2.1. Nucleación homogénea.....	22
2.1.3.2.2. Nucleación heterogénea.....	25
2.1.3.3. Formación de una estructura granular.....	25
2.1.4. Transformaciones de fase.....	26
3. Titanio y Ti-6Al-4V.....	31
3.1. Titanio puro comercial.....	31
3.1.1. Historia del titanio.....	31
3.1.2. Obtención del titanio.....	31
3.1.3. Propiedades del titanio.....	33
3.1.3.1. Propiedades físicas.....	33
3.1.3.2. Propiedades químicas.....	37
3.1.3.3. Propiedades mecánicas.....	38
3.1.3.4. Las aleaciones de titanio.....	40
3.1.3.4.1. Efecto de los aleantes.....	41
3.1.3.4.2. Clasificación de las aleaciones.....	42
3.1.3.5. Aplicaciones.....	43
3.1.3.5.1. Aeronáutica.....	44
3.1.3.5.2. Corrosión.....	44

3.1.3.5.3. Biomedicina.....	45
3.1.3.5.4. Otras aplicaciones.....	45
3.2. Ti-6AL-4V.....	46
3.2.1. Propiedades.....	46
3.2.2. Aplicaciones.....	49
4. La tecnología láser.....	52
4.1. Principios fundamentales de tecnología láser.....	52
4.1.1. Estadística de Boltzmann.....	52
4.1.1.1. Interacción entre la radiación y la materia.....	53
4.1.1.1.1. Procesos elementales en la interacción entre la radiación y la materia. 53	
4.1.1.1.2. Las relaciones de Einstein.....	55
4.1.1.2. Absorción y amplificación de radiación.....	58
4.1.1.2.1. Absorción en medios materiales.....	58
4.1.1.2.2. Inversión de población y amplificación óptica.....	59
4.1.1.2.3. Bombeo del medio activo. Esquemas de 3 y 4 niveles.....	60
4.1.1.3. El resonador óptico.....	62
4.1.1.3.1. La condición umbral de oscilación.....	63
4.1.1.3.2. Cavidades estables e inestables.....	65
4.1.2. Propiedades de la emisión láser.....	67
4.1.3. Tipos de láser.....	75
4.1.3.1. Láseres de medio activo gaseoso.....	77
4.1.3.1.1. El láser de He-Ne.....	77
4.1.3.1.2. El láser de CO ₂	78
4.1.3.2. Láseres de estado sólido.....	79
4.1.3.2.1. El láser de Nd-YAG.....	79
4.1.3.3. Láseres de semiconductor.....	80
4.1.3.4. Láseres de colorante.....	81
4.1.3.5. Láseres de excímeros.....	82
4.1.4. Modos de funcionamiento.....	84
4.1.4.1. Funcionamiento continuo.....	84
4.1.4.2. Funcionamiento pulsado.....	84
4.1.5. Influencia del material y de los parámetros láser.....	85
4.1.5.1. Propiedades del material.....	86
4.1.5.1.1. Reflectancia del material, R	86

4.1.5.1.2.	Calor específico, C .	86
4.1.5.1.3.	Conductividad térmica, K .	86
4.1.5.1.4.	Difusividad térmica, κ .	87
4.1.5.1.5.	Calor latente de fusión y evaporación, L_f y L_v .	87
4.1.5.2.	Parámetros láser.	87
4.1.6.	Balance energético en la interacción entre el láser y la materia.	88
4.1.7.	Aplicaciones del láser al procesado de materiales.	90
4.1.7.1.	Corte.	90
4.1.7.2.	Perforado.	91
4.1.7.3.	Soldadura.	92
4.1.7.4.	Temple.	93
4.1.7.5.	Recubrimiento y aleación superficial.	96
4.1.7.5.1.	Recubrimiento con láser (<i>laser cladding</i>).	96
4.1.7.5.2.	Aleación con láser.	97
4.1.7.6.	Marcado.	98
4.2.	Láser cladding.	99
4.2.1.	Origen y desarrollo.	100
4.2.2.	Equipamiento.	102
4.2.2.1.	Láseres.	103
4.2.2.1.1.	Tipos de láseres en procesos de láser cladding.	103
4.2.2.2.	Características del haz láser en el láser cladding.	104
4.2.2.3.	Alimentadores de polvo y boquillas inyectoras de polvo.	105
4.2.2.3.1.	Tipos de alimentadores de polvo.	105
4.2.2.3.2.	Boquillas.	108
4.2.2.4.	Mecanismos de posicionamiento.	109
4.2.2.4.1.	Sistema CAD/CAM para generación de trayectoria.	112
4.2.2.4.2.	Tecnología de corte.	113
4.2.3.	Operación.	116
4.2.3.1.	Láser cladding en dos pasos (láser cladding predepositado).	117
4.2.3.2.	Láser cladding en un solo paso.	119
4.2.3.2.1.	Láser cladding por aporte de polvo.	119
4.2.3.2.2.	Láser cladding por aporte de hilo.	119
4.2.3.2.3.	Láser cladding por pegado.	120
4.2.4.	Variantes.	121
4.2.5.	Ventajas e inconvenientes.	122

4.2.6.	Aplicaciones y oportunidades de mercado.....	124
4.2.6.1.	Recubrimientos.....	124
4.2.6.2.	Reparación de piezas y remodelación.....	125
4.2.6.3.	Prototipado y estampación rápida.....	126
4.2.7.	Perspectivas futuras para el láser cladding.....	127
5.	Método de elementos finitos: ANSYS.....	129
5.1.	Origen.....	129
5.2.	Conceptos generales del método.....	131
5.3.	Aplicaciones.....	132
5.4.	ANSYS.....	134
6.	Simulación.....	136
6.1.	Introducción.....	136
6.2.	Datos de partida.....	137
6.2.1.	Propiedades de los materiales.....	137
6.2.2.	Geometría y parámetros de operación.....	141
6.3.	Modelización.....	142
6.3.1.	Láser.....	142
6.3.2.	Análisis térmico.....	143
6.4.	Descripción de los modelos.....	144
6.4.1.	Modelo de cordón único.....	145
6.5.	Funcionamiento.....	146
6.5.1.	Deposición de material.....	146
6.5.2.	Transformación de fase.....	147
6.5.3.	Problemas de convergencia.....	149
6.5.3.1.	Propiedades de los materiales.....	149
6.5.3.2.	Convección.....	149
6.6.	Resultados.....	150
6.6.1.	Aporte de polvo.....	150
6.6.1.1.	Ti-6Al-4V sobre Ti.....	151
6.6.1.2.	Ti sobre Ti.....	153
6.6.1.3.	Ti-6Al-4V sobre Ti-6Al-4V.....	155
6.6.2.	Aporte de hilo.....	156
6.6.2.1.	Ti-6Al-4V sobre Ti.....	157
6.6.2.2.	Ti sobre Ti.....	160

6.6.2.3. Ti-6Al-4V sobre Ti-6Al-4V	163
7. Conclusiones.....	167
Bibliografía.....	169

1. Motivación y objetivos.

El objetivo del presente documento es presentar el trabajo realizado durante la elaboración del trabajo de fin de grado que lleva por título **Láser cladding con aporte de polvo y aporte de hilo: estudio comparativo**.

Este proyecto consistirá en la ejecución de una serie de rutinas ejecutadas en el programa comercial ANSYS en las que se usará el método de elementos finitos para resolver problemas térmicos y ver el comportamiento del titanio puro comercial y el Ti-6Al-4V durante el proceso de láser cladding.

Existen ciertos sectores, como por ejemplo la automoción o la aeronáutica, en los que la mejora de la competitividad pasa por el desarrollo de nuevos procesos. En estos sectores pueden considerarse claves los procesos relacionados con la unión y tratamiento de materiales así como el desarrollo e investigación de materiales con mejores propiedades.

La tecnología láser va penetrando cada vez más en este ámbito, encontrándose múltiples ejemplos de su aplicación en la industria y estando al mismo tiempo en constante evolución. De entre la multitud de líneas de investigación existentes en el campo del láser resulta de especial relevancia la tecnología de láser cladding por las mejoras que puede introducir en sectores estratégicos como la automoción o la aeronáutica, anteriormente mencionados. Con todo, el desarrollo de esta tecnología es lento debido a las complejas interacciones láser-materia que tienen lugar, entre otros factores.

Es por ello que el estudio de los fenómenos que tienen lugar resulta de vital importancia para poder controlar y utilizar esta tecnología en multitud de procesos a nivel industrial.

La tecnología láser aplicada a la metalurgia en tratamientos de mejora y desarrollo de materiales o fabricación directa permite cumplir con las exigencias de calidad, rapidez y fiabilidad existentes en la actualidad. El láser cladding es un proceso de recubrimiento que combina diversas tecnologías tales como la robótica, el láser, la fabricación asistida por ordenador, los materiales de última generación...La conjunción de todas estas técnicas permite la reparación, refuerzo, tratamiento superficial y fabricación de piezas con gran precisión.

El material a tratar será el titanio y sus aleaciones. El titanio presenta una serie de propiedades que lo hacen muy deseable para cubrir funciones en entornos de gran exigencia. La investigación llevada a cabo en los últimos años ha dado pie a la creación de aleaciones que presentan mejoras sobre determinadas propiedades del titanio en función de la aplicación que se les vaya a dar a dichas aleaciones.

El Ti-6Al-4V es la aleación de titanio más presente en el mercado. Gracias a su alta resistencia es muy empleado en el sector aeronáutico para la construcción de elementos estructurales o en los turborreactores de las naves. Su buena resistencia a la corrosión lo hace además un excelente material para la fabricación de componentes biomédicos como los implantes protésicos y la fabricación de maquinaria para extracciones petrolíferas y gasistas.

Debido a la amplia utilización del titanio y a las bondades del láser cladding no cabe duda del potencial que tendría dicha técnica empleada sobre el titanio. Sin embargo, los altos costes que requiere el empleo de esta tecnología la mantienen relegada a aplicaciones específicas de gran presupuesto y lejos de un mayor mercado.

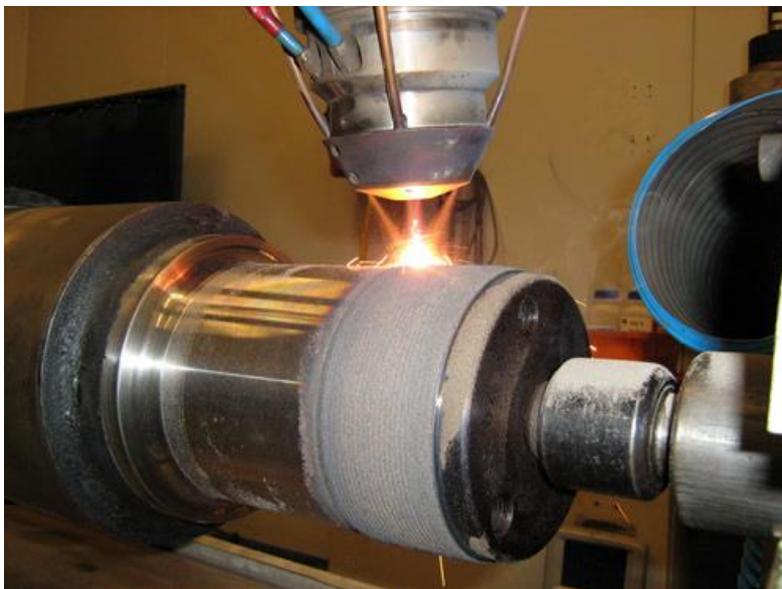


Figura 1: Proceso de recubrimiento con láser cladding.

La realización de simulaciones del proceso de láser cladding es un primer paso para predecir el comportamiento del material y ver resultados lo más cercanos posibles a la realidad, todo esto con el objetivo de reducir los costes de operación al emplear el láser cladding.

Para llevar a cabo estas simulaciones resulta necesario el conocimiento de los fenómenos físicos que tienen lugar así como de las propiedades de los materiales empleados en dichas simulaciones.

El método de los elementos finitos es un procedimiento que permite la resolución de problemas físicos descritos por ecuaciones diferenciales de gran número de variables en geometrías muy complejas. Por ello resulta una herramienta muy adecuada para la simulación de los procesos físicos que tienen lugar durante el proceso de láser cladding.

Este trabajo pretende reunir la investigación de los parámetros que definen el desarrollo real de los procesos de láser cladding aplicado al recubrimiento de

sustratos de titanio o Ti-6AL-4V, definiendo así las bases y variables a tener en cuenta para desarrollar una serie de rutinas de simulación tanto del proceso de láser cladding como del comportamiento del Ti y del Ti-6Al-4V sometidos al mismo y operables en el entorno del software comercial ANSYS. Además se pretenden comparar dos métodos de láser cladding: el consistente en aporte por polvo y el de aporte por hilo.

En el presente proyecto se buscará comparar dos técnicas de láser cladding, la de aporte por polvo y la de aporte por hilo.

En los capítulos siguientes se enmarcará el proyecto en su contexto y describir los materiales y las tecnologías empleadas así como las características de los mismos indicando así mismo los principios físico-matemáticos aplicados a la resolución del mismo. Así mismo se discutirán los resultados de las rutinas empleadas para la simulación del proceso y se analizará su aplicabilidad a nivel industrial.

2. Fundamentos.

Con objetivo de servir de base al trabajo, se incluye este capítulo, en el que se introducirán una serie de nociones sobre la ingeniería de materiales que se tendrán en cuenta a la hora de simular posteriormente el proceso de láser cladding.

2.1. Materiales.

En este capítulo se comentan una serie de características fundamentales que definen el conjunto de propiedades de los materiales.

Con esta información se facilitará la comprensión de las propiedades del titanio puro comercial y sus aleaciones, haciendo especial hincapié en el Ti-6Al-4V, que se tuvieron en cuenta en el análisis térmico del proceso.

2.1.1. Estructura cristalina en los materiales.

La estructura a escala atómica es cristalina para a mayoría de los materiales, es decir, los átomos del material están dispuestos de una manera regular y repetitiva. Los fundamentos de la geometría cristalina son comunes a todos los materiales cristalinos. Depende principalmente del ordenamiento de los átomos, iones o moléculas que constituyen el sólido y de las fuerzas de enlace entre ellos. Se identifican siete sistemas cristalinos y catorce redes cristalinas.

Las estructuras cristalinas de la mayoría de los metales pertenecen a uno de estos tres tipos.

2.1.1.1. *Sistemas cristalinos y celdas unitarias.*

Cualquier estructura cristalina puede describirse como un modelo formado a base de repetir varias unidades estructurales. En la práctica, por lo general, se escoge la estructura más sencilla como unidad estructural representativa, denominada celda unidad. La longitud de las aristas de la celda unidad y los ángulos entre los ejes cristalográficos se denominan constantes de red o parámetros de red.

Existe un número limitado de redes cristalinas, conocidas como las 14 redes de Bravais y se agrupan en 7 sistemas cristalinos (Cúbico, Tetragonal, Ortorrómbico, Romboédrico, Hexagonal, Monoclínico y Triclínico).

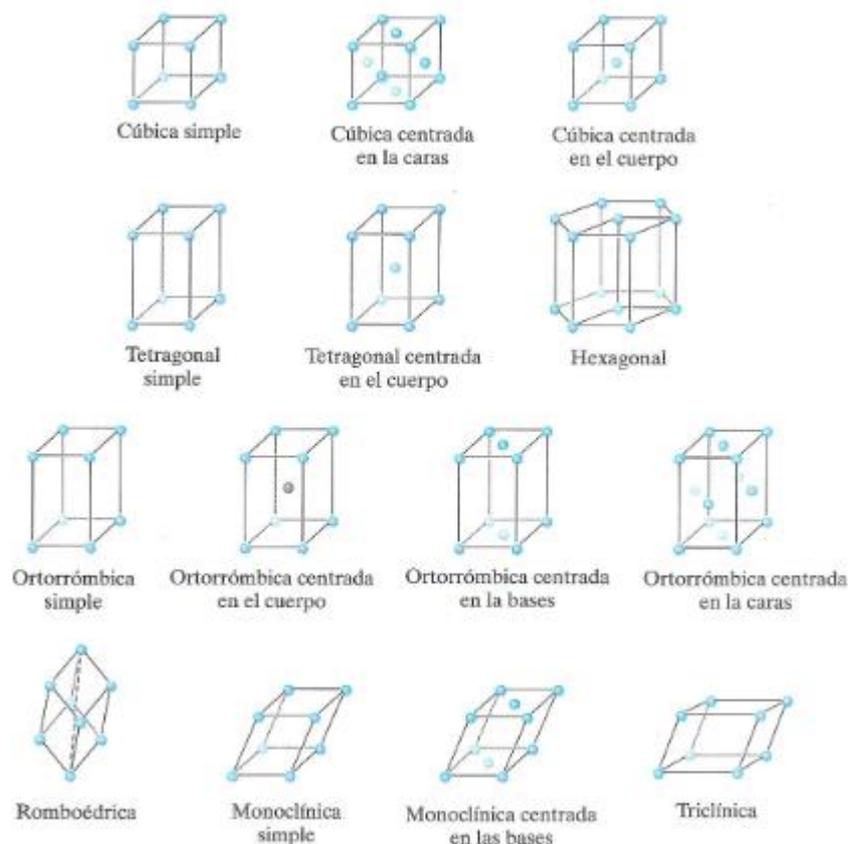


Figura 2: Los 14 tipos de redes de Bravais agrupados en los siete sistemas cristalinos.

(Fundamentos de ingeniería y ciencia de materiales. Donald R. Askeland.& Pradeep P. Fulay)

La mayoría de los metales puros (aproximadamente el 90 %) cristalizan al solidificar en tres estructuras cristalinas compactas: cúbica centrada en el cuerpo (BCC), cúbica centrada en las caras (FCC) y hexagonal compacta (HCP). La mayoría de los metales cristalizan en estas estructuras empacadas densamente porque la energía disminuye a medida que los átomos se acercan y enlazan entre sí. De este modo, las estructuras más compactas corresponden a ordenamientos de niveles energéticos menores y más estables.

A continuación se presentarán algunas de las características más importantes de una red o celda unitaria.

- Los **parámetros de red**, los cuales describen el tamaño y la forma de la celda unitaria, incluyen las dimensiones de los lados de la celda unitaria y los ángulos entre los lados. En un sistema cúbico, sólo se necesita la longitud de uno de los lados del cubo para describir por completo la celda (se suponen ángulos de 90° a menos que se especifique lo contrario). Esta longitud es el parámetro de red a . La longitud se da con frecuencia en nanómetros (nm) o unidades Angstrom (\AA). Se requieren varios parámetros de red para definir el tamaño y la forma de celdas complejas.

Por ejemplo para las celdas unitarias hexagonales se requieren dos dimensiones, a y c , y el ángulo de 120° entre los ejes a .

- La **cantidad de átomos por celda unitaria** que sería la cantidad específica de puntos de red que define cada una de las celdas unitarias. Cuando se cuenta el número de puntos de red que pertenece a cada celda unitaria, se deben reconocer los puntos de red que pueden estar compartidos por más de una celda unitaria. La cantidad de átomos por celda unitaria es el producto de la cantidad de átomos por punto de red por la cantidad de puntos de red por celda unitaria.
- El **radio atómico en función del parámetro de red**: las direcciones, en la celda unitaria, a lo largo de las cuales los átomos están en contacto continuo son las direcciones compactas. En estructuras sencillas, como en las que sólo tienen un átomo por punto de red, se utilizan estas direcciones para calcular la relación entre el tamaño aparente del átomo y el tamaño de la celda unitaria. Determinada de manera geométrica la longitud de la dirección con relación a los parámetros de red y después adicionando el número de radios atómicos a lo largo de esta dirección, se puede determinar la relación deseada.
- El **número de coordinación** es el número de átomos que tocan uno en particular, o el número de los vecinos más cercanos a ese átomo en particular. Ésta es la indicación de qué tan estrecha y eficientemente están empaquetados los átomos entre sí. En las estructuras cúbicas que sólo contienen un átomo por punto de red, los átomos tienen un número de coordinación relacionado con la estructura de red.
- El **factor de empaquetamiento** es la fracción del espacio ocupado por los átomos suponiendo que los átomos son esferas duras de tal manera que tocan a su vecino más cercano. La expresión general para el factor de empaquetamiento es:

$$\text{Factor de empaquetamiento} = \frac{(\text{número de átomos/celda}) \cdot (\text{volumen de cada átomo})}{\text{volumen de la celda unitaria}}$$

- La **densidad** teórica de un material puede calcularse utilizando las propiedades de la estructura cristalina. La fórmula general es:

$$\rho = \frac{(\text{número de átomos/celda}) \cdot (\text{masa atómica})}{(\text{volumen de celda unitaria}) \cdot (\text{número de Avogadro})}$$

Estructura	a_0 en función de r	Átomos por celda	Número de coordinación	Factor de empaquetamiento	Ejemplos
Cúbica simple	$a_0 = 2r$	1	6	0,52	Polonio (Po)
Cúbica centrada en el cuerpo	$a_0 = 4r/\sqrt{3}$	2	8	0,68	Fe, Ti, W, Mo, Nb, Ta
Cúbica centrada en las caras	$a_0 = 4r/\sqrt{2}$	4	12	0,74	Fe, Cu, Au, Pt, Ag, Pb, Ni
Hexagonal compacta	$a_0 = 2r$ $c_0 \approx 1,633a_0$	2	12	0,74	Ti, Mg, Zn, Be, Co, Zr, Cd

Tabla 1: Características de las estructuras cristalinas de algunos materiales. (Fundamentos de ingeniería y ciencia de materiales. Donald R. Askeland.& Pradeep P. Fulay)

Los materiales que pueden tener más de una estructura cristalina se denominan alotrópicos o polimórficos. El término alotropía suele reservarse para este comportamiento en los elementos puros, mientras que el término polimorfismo se utiliza para los compuestos. Las propiedades de algunos materiales pueden depender en gran medida del tipo de polimorfismo.

Se pueden localizar ciertos puntos como las posiciones de átomos en la red o celda unitaria trazando el sistema coordinado de mano derecha en la Figura 3. La distancia se mide en términos del número de parámetros de red que deben moverse de cada una de las coordenadas x , y y z para ir del origen al punto en cuestión.

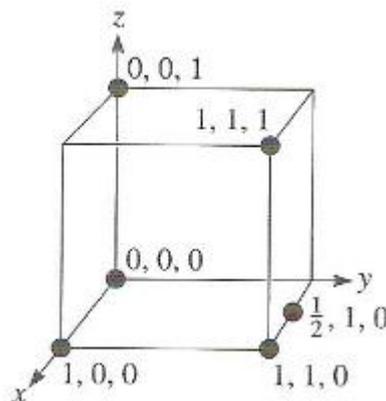


Figura 3: Coordenadas de puntos seleccionados en la celda unitaria. (Fundamentos de ingeniería y ciencia de materiales. Donald R. Askeland.& Pradeep P. Fulay)

Ciertas direcciones en la celda unitaria son de especial importancia. Los índices de Miller para las direcciones son la notación abreviada utilizada para describir

estas direcciones. Además tienen gran importancia las direcciones cristalográficas, pues los metales se deforman con mayor facilidad en las direcciones a lo largo de las cuales los átomos están en mayor contacto.

Una manera de caracterizar las direcciones es por medio de la distancia de repetición o distancia entre los puntos de red a lo largo de la dirección.

La densidad lineal es la cantidad de puntos de red por unidad de longitud a lo largo de la dirección.

Además resulta de gran relevancia la fracción de empaquetamiento de una dirección en particular, o fracción cubierta en realidad por los átomos.

Ciertos planos de átomos en un cristal también tienen importancia particular. Para el caso de los metales, éstos se deforman fácilmente a lo largo de los planos de átomos en los que están lo más compacto posible. La energía superficial de las distintas caras de un cristal depende de los planos cristalográficos particulares. Esto se vuelve importante en el crecimiento de los cristales.

Para la caracterización de los planos son relevantes conceptos como la densidad planar, definida como la cantidad de átomos por unidad de área cuyos centros se encuentran en el plano; la fracción de empaquetamiento sería entonces la fracción de área de ese plano cubierta en realidad por esos átomos. En cada celda unitaria los planos de una forma son los grupos de planos equivalentes que tienen sus índices particulares debido a la orientación de las coordenadas.

Al examinar la relación existente entre el radio atómico y el parámetro de red se buscan direcciones compactas donde los átomos estén en contacto continuamente.

Estructura	Direcciones	Planos
Cúbica simple	$\langle 100 \rangle$	Ninguno
Cúbica centrada en el cuerpo	$\langle 111 \rangle$	Ninguno
Cúbica centrada en las caras	$\langle 110 \rangle$	$\{111\}$
Hexagonal compacta	$\langle 100 \rangle, \langle 110 \rangle$ o $\langle 11\bar{2}0 \rangle$	$(0001), (0002)$

Tabla 2: Planos y direcciones compactas.

(Fundamentos de ingeniería y ciencia de materiales. Donald R. Askeland.& Pradeep P. Fulay)

Debido a las diferencias en el arreglo atómico en los planos y las direcciones dentro de un cristal, algunas propiedades también varían con la dirección. De este modo decimos que un material es cristalográficamente anisotrópico si sus propiedades dependen de la dirección cristalográfica a lo largo de la cual se mide la propiedad. En caso de que las propiedades sean iguales en todas las direcciones, el material es cristalográficamente isotrópico. En general, la mayor

parte de materiales policristalinos presentan propiedades isotrópicas mientras que los materiales que son monocristales o en los que varios granos están orientados a lo largo de ciertas direcciones por lo general presentarán propiedades anisotrópicas.

Seguidamente definiremos el espaciado interplanar (d_{hkl}) como la distancia entre dos planos paralelos adyacentes de átomos con los mismos índices de Miller. En sistemas cúbicos y hexagonales la distancia interplanar viene dada respectivamente por las siguientes expresiones:

$$d_{hkl} = \frac{a_0}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}}$$
$$d_{hkl} = \frac{\sqrt{3} \cdot a_0 \cdot c}{\sqrt{4 \cdot (h^2 + h \cdot k + k^2) \cdot c^2 + 3 \cdot l^2 \cdot a_0^2}}$$

Donde:

- a_0 y c son los parámetros de la red.
- h, k y l representan los índices de Miller de los planos considerados.

En cualquiera de las estructuras cristalinas que se han descrito, existen pequeños orificios entre los átomos normales dentro de los cuales pueden colocarse átomos más pequeños, estos orificios reciben el nombre de sitios intersticiales.

Un átomo, cuando se coloca dentro de un sitio intersticial, toca dos o más átomos en la red. Este átomo intersticial tiene un número de coordinación igual al número de átomos que toca.

Los átomos o iones intersticiales cuyos radios son ligeramente mayores que el radio del sitio intersticial, pueden entrar en ese sitio, separando ligeramente los átomos que los rodean. Si el átomo intersticial se vuelve muy grande, tenderá a entrar a un sitio que tenga un número de coordinación mayor.

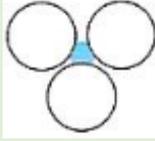
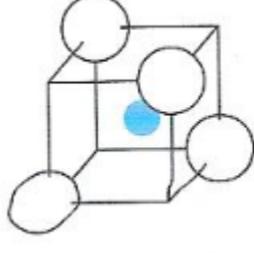
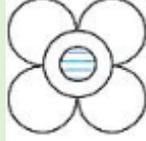
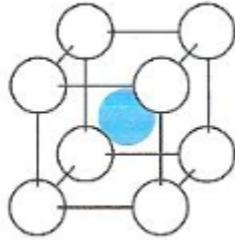
Número de coordinación	Localización del intersticio	Razón de radios	Representación
2	Lineal	0-0,155	
3	Centro del triángulo	0,155-0,225	
4	Centro del tetraedro	0,225-0,414	
6	Centro del octaedro	0,414-0,732	
8	Centro del cubo	0,732-1	

Tabla 3: Número de coordinación y razón de radios para sitios intersticiales. (Fundamentos de ingeniería y ciencia de materiales. Donald R. Askeland.& Pradeep P. Fulay)

La estructura cristalina de un material cristalino puede analizarse empleando la difracción de rayos X. Cuando un haz de rayos X que tiene una sola longitud de onda (del mismo orden de magnitud que el espaciado atómico en el material) incide sobre ese material, los rayos X se dispersan en todas direcciones. La mayor parte de la radiación dispersada de un átomo cancela la radiación dispersada por otros átomos. Sin embargo, los rayos X que inciden sobre ciertos planos cristalográficos a ángulos específicos son reforzados en vez de cancelados. Este fenómeno se llama difracción. Los rayos X son difractados, o el haz es reforzado, cuando las condiciones cumplen la ley de Bragg:

$$\sin \theta = \frac{\lambda}{2d_{hkl}}$$

Donde:

- θ es la mitad del ángulo entre el haz difractado y la dirección del haz original.

- λ es la longitud de onda de los rayos X.
- d_{hkl} es el espaciado interplanar entre los planos que ocasionan el reforzamiento constructivo del haz.

Al preparar materiales en la forma de un polvo fino, siempre hay por lo menos unas cuantas partículas de polvo (cristales pequeños o agregados de cristales pequeños) cuyos planos (hkl) están orientados al ángulo apropiado θ para cumplir la ley de Bragg. Por tanto, se produce un haz difractado, que forma un ángulo 2θ con el haz incidente. En un difractómetro, un detector de rayos X en movimiento registra los ángulos 2θ a los cuales se difracta el haz, dando un patrón de difracción característico. Si se conoce la longitud de onda de los rayos X, pueden determinarse los espaciados interplanares y, con el tiempo, la identidad de los planos que originan la difracción.

2.1.1.2. Defectos.

El arreglo de los átomos o iones en los materiales diseñados tiene imperfecciones o defectos. Estos defectos tienen con frecuencia un impacto profundo sobre las propiedades de los materiales. Se introducirán en este apartado tres tipos básicos de defectos: los puntuales, los lineales (o dislocaciones) y los superficiales. Estas imperfecciones sólo representan defectos en o desviaciones con respecto a los arreglos atómicos o iónicos ideales esperados en una estructura cristalina dada. Al material no se le considera defectuoso desde el punto de vista de la aplicación. De hecho, en multitud de aplicaciones, la presencia de estos defectos resulta útil. Por el contrario, existirán otras aplicaciones en las que se tratará de minimizar un tipo de defecto en particular. Por ejemplo, los defectos lineales son útiles para aumentar la resistencia de metales y aleaciones. Sin embargo, en el silicio monocristalino empleado en la fabricación de chips de ordenadores, no es deseable la presencia de dislocaciones. Es habitual el crear defectos de forma intencional para producir un conjunto deseado de propiedades electrónicas, magnéticas, ópticas y mecánicas.

Los límites de los granos, es decir, las regiones entre los distintos granos de un material policristalino, representan un tipo de defecto que puede controlar propiedades. Por ejemplo, la presencia de los límites de grano ayuda a endurecer materiales metálicos.

2.1.1.2.1. Defectos puntuales.

Los defectos puntuales son interrupciones localizadas en los arreglos iónicos o atómicos en una estructura cristalina que de otra forma sería perfecta. Aun llamándose defectos puntuales, realmente la imperfección afecta a una región que involucra varios de los átomos o iones cercanos. Estas imperfecciones pueden introducirse por el movimiento de los átomos o iones cuando ganan

energía al calentarse, durante el procesamiento del material o por la introducción de otros átomos. Cabe diferenciar entre impureza y dopante, las impurezas son elementos o compuestos que se presentan a partir de las materias primas o del procesamiento mientras los dopantes son elementos o compuestos que se adicionan de manera intencional, en dosis conocida, en lugares específicos de la microestructura, buscando un efecto beneficioso sobre las propiedades o el procesamiento. En general, el efecto de las impurezas es perjudicial, mientras que el efecto de los dopantes sobre las propiedades de los materiales es útil.

Es importante hablar en este punto de las **vacancias**, las cuales aparecen cuando un átomo o ión están ausentes de su posición normal en la estructura cristalina. Debido a la presencia de las vacancias aumenta la entropía general del material, lo cual aumenta la estabilidad termodinámica de un material cristalino. Todos los materiales cristalinos presentan vacancias. Las vacancias se introducen en los metales y aleaciones durante la solidificación, a altas temperaturas, o como consecuencia de daños por radiación. Desempeñan además una función importante en la determinación de la velocidad a la que los átomos o iones pueden moverse alrededor de, o difundirse en un material sólido, especialmente en metales puros.

La concentración de vacancias a temperatura ambiente ($\sim 300\text{ K}$) es pequeña, pero aumenta exponencialmente a medida que aumenta la temperatura:

$$n_v = n \cdot e^{\left(\frac{-Q_v}{RT}\right)}$$

Donde:

- n_v es el número de vacancias por cm^3 .
- n es el número de átomos por cm^3 .
- Q_v es la energía requerida para producir un mol de vacancias, en cal/mol o J/mol .
- T es la temperatura en K .

También conviene introducir los **defectos intersticiales**, los cuales se forman cuando se inserta un átomo o un ión adicional en la estructura cristalina en una posición por lo general desocupada. Los átomos o iones intersticiales, aunque son mucho más pequeños que los átomos o los iones localizados en los puntos de red, siguen siendo mayores que los sitios intersticiales que ocupan. Por lo tanto, la región cristalina que los rodea está comprimida y distorsionada.

Seguidamente se hablará de los **defectos sustitucionales** los cuales aparecen cuando se reemplaza un átomo o ión por un tipo distinto de átomo o ión. Los átomos o iones sustitucionales ocupan los sitios normales de red. Pueden ser ligeramente mayores que los átomos o iones normales en la estructura cristalina, en este caso se reducen los espaciados interatómicos circundantes, o pueden

ser menores ocasionando que los átomos circundantes tengan espaciados interatómicos mayores. En cualquier caso, los defectos sustitucionales alteran las distancias interatómicas en el cristal circundante. Estos defectos pueden introducirse como una impureza o como una adición deliberada en la aleación y, una vez introducidos, el número de defectos es relativamente independiente de la temperatura.

Por último se mencionarán dos tipos de defectos puntuales más: el **defecto de Frenkel** y el **defecto de Schottky**. El defecto de Frenkel es un par vacancia intersticial formado cuando un ión salta de un punto normal de red a un sitio intersticial dejando atrás una vacancia. El defecto de Schottky es único para los materiales iónicos y se encuentra presente también en muchos materiales cerámicos. En este defecto las vacancias ocurren en un material enlazado de manera iónica; donde debe faltar un número estequiométrico de aniones y cationes en el cristal para que se conserve la neutralidad eléctrica en el cristal.

2.1.1.2.2. Defectos lineales.

Los defectos lineales o dislocaciones son imperfecciones lineales en un cristal que de otra manera sería perfecto. Por lo regular se introducen en el cristal durante la solidificación del material o cuando se deforma de manera permanente el material. Aunque las dislocaciones están presentes en todos los materiales, incluyendo los cerámicos y los polímeros, son particularmente útiles para explicar la deformación y el endurecimiento en los materiales metálicos. Se pueden identificar tres tipos de dislocaciones: la helicoidal, la de arista y la mixta.

Al proceso por el cual se mueve una dislocación y ocasiona que un material metálico se deforme se le llama deslizamiento y la dirección en la que se mueve la dislocación, dirección de deslizamiento. Durante el deslizamiento, el plano que recorre la dislocación de arista se le llama plano del deslizamiento. A la combinación de la dirección del deslizamiento y el plano del deslizamiento se le llama sistema del deslizamiento.

Durante el deslizamiento, una dislocación se mueve de un conjunto de entornos a un conjunto de entornos idéntico.

Las dislocaciones son de mayor importancia en los metales y aleaciones dado que proveen un mecanismo para la deformación plástica, consistente en la acumulación de numerosas dislocaciones. La deformación plástica se refiere a la deformación o cambio irreversible de la forma y se lleva a cabo cuando se elimina la fuerza o el esfuerzo que la ocasionó. Debe distinguirse la deformación plástica de la elástica, la cual es un cambio temporal de la forma que ocurre cuando se sigue aplicando una fuerza o un esfuerzo a un material. El proceso de deslizamiento permite explicar el hecho de que la resistencia de los metales sea menor que el valor predicho a partir del enlace metálico. Si ocurre deslizamiento,

sólo se necesita romper una pequeña fracción de todos los enlaces metálicos a través de la interfase en cualquier momento y la fuerza requerida para deformar el metal es pequeña. Además el deslizamiento provee de ductilidad a los metales. Además de esto las propiedades mecánicas de los metales y aleaciones se pueden controlar interfiriendo el movimiento de las dislocaciones. La cantidad de dislocaciones presentes en los materiales es enorme y se pueden contabilizar gracias a la densidad de dislocaciones, siendo ésta la longitud total de dislocaciones por unidad de volumen. Por último, cabe señalar que las dislocaciones también influyen en las propiedades ópticas y electrónicas de los materiales.

2.1.1.2.3. Defectos superficiales.

Los defectos superficiales se definen como los límites, o planos, que separan un material en regiones, donde cada región tiene la misma estructura cristalina pero diferentes orientaciones. Los defectos superficiales incluyen superficies externas, límites de grano, maclas, bordes de ángulo agudo, bordes de ángulo abierto, torsiones y fallas de apilamiento.

La **superficie externa** de cualquier material es el tipo más común de defecto superficial. Las superficies externas se consideran defectos debido a que los átomos de la superficie están enlazados a otros átomos sólo por un lado. Por lo tanto, los átomos de la superficie tienen un menor número de vecinos. Como consecuencia de esto presentan un mayor estado energético que los átomos situados dentro del cristal. Esto hace a la superficie susceptible a la erosión y a reaccionar con elementos del ambiente.

Los **límites de grano** son los defectos de la superficie en los materiales policristalinos que separan a los granos (cristales) de diferentes orientaciones. En los metales, los límites de grano se originan durante la solidificación, cuando los cristales formados desde diferentes núcleos crecen juntándose simultáneamente unos con otros. Así, el límite de grano se define como una estrecha región entre dos granos de entre dos y cinco diámetros atómicos de ancho, y es una región de átomos no alineados entre dos granos adyacentes. A temperatura ordinaria, los límites de grano disminuyen la plasticidad dificultando el movimiento de dislocación en la región del límite de grano.

Las **maclas** son regiones en las que existe una imagen de espejo de la estructura a través de un plano o un borde. Las maclas se forman en pares y tienden a reforzar el material.

Cuando en un arreglo de dislocaciones de borde éstas se orientan en un cristal de manera tal que dos regiones del cristal parecen desorientarse o inclinarse, se forma un defecto bidimensional llamado **límite de inclinación en ángulo agudo**. Al igual que pasa con las dislocaciones y las maclas, los bordes de ángulo agudo

son regiones de alta energía debido a las distorsiones locales de la red y tienden a endurecer a un metal.

Las **fallas de apilamiento** representan errores en las secuencias de apilamiento en los planos compactos. Tienden a endurecer el material. Son típicas de los cristales hexagonales compactos y cúbicos centrados en las caras.

En términos generales, de los defectos superficiales expuesto aquí, los límites de grano son los más eficaces para endurecer a un metal, sirviendo a un propósito similar las fallas de apilamiento, los límites de macla y los límites en ángulo agudo.

2.1.2. Difusión.

La difusión se refiere a un flujo neto observable de átomos u otras especies. Depende del gradiente inicial de concentraciones y la temperatura. Es un proceso de gran importancia en multitud de tecnologías actuales, por ejemplo, la tecnología de procesamiento de materiales. De hecho, la difusión de los átomos en los metales y aleaciones es particularmente importante, ya que en su mayoría, las reacciones en estado sólido conllevan movimientos atómicos.

Existen dos mecanismos principales de difusión de los átomos en una red cristalina:

- **Mecanismo sustitucional** o por vacantes en el que los átomos pueden moverse en la red cristalina de una posición atómica a otra si tienen suficiente energía de activación procedente de sus vibraciones térmicas y si existen vacantes u otros defectos cristalinos en la red hacia los que los átomos puedan desplazarse.
- **Autodifusión** en el que los átomos con la suficiente energía de activación se mueven de una posición de red a otra en aquellos materiales que tienen vacancias.
- **Difusión intersticial** que tiene lugar cuando está presente en la estructura cristalina un átomo o ión intersticial pequeño, y el átomo o ión se mueve de un sitio intersticial a otro. Para este mecanismo no se requieren vacancias.

La cinética del mecanismo de difusión depende en gran medida de la temperatura, así, el coeficiente de difusión se relaciona con la temperatura a través de una relación exponencial:

$$D = D_0 \cdot e^{\left(\frac{-Q}{RT}\right)}$$

Donde:

- D es el coeficiente de difusión.

- D_0 es el término preexponencial igual al valor del coeficiente de difusión cuando $1/T = 0$ o $T = \infty$.
- Q es la energía de activación para la difusión de las especies bajo consideración (en cal/mol).
- R es la constante universal de los gases ideales ($1,987 \frac{cal}{mol \cdot K}$).
- T es la temperatura absoluta (en K).

Cuando la temperatura de un material aumenta, el coeficiente de difusión D aumenta y, por tanto, el flujo de átomos aumenta también. A temperaturas más altas, la energía térmica suministrada a los átomos que están difundiendo permite que los átomos superen la barrera de la energía de activación y se muevan más fácilmente a nuevos sitios en los arreglos atómicos. A bajas temperaturas, con frecuencia menores que 0,4 veces la temperatura de fusión absoluta del material, la difusión es muy lenta y puede no ser significativa. Por esta razón, los tratamientos térmicos de metales y el procesamiento de cerámicas se realizan a altas temperaturas, donde los átomos se mueven de manera rápida para completar reacciones o para alcanzar las condiciones de equilibrio. Debido a que se requiere menos energía térmica para superar la barrera de la energía de activación menor, una pequeña energía de activación Q aumenta el coeficiente de difusión y el flujo.

2.1.3. Solidificación.

Es probablemente la técnica de procesamiento más importante empleada en la fabricación de materiales. Todos los materiales metálicos son líquidos o están fundidos en algún punto durante el procesamiento. Los metales fundidos se solidificarán a medida que se enfrían debajo de su temperatura de congelación. Durante la solidificación de materiales que se cristalizan, el arreglo atómico cambia de un orden de corto alcance (OLA) en un líquido a un orden de largo alcance (OLA) en el sólido cristalino. La solidificación de materiales que se cristalizan requiere de dos etapas: en la primera etapa se forman cristalitas ultrafinos, conocidos como los núcleos de una fase sólida, a partir del líquido mientras que en la segunda etapa, la cual puede solaparse con la primera, los cristales ultrafinos comienzan a crecer a medida que los átomos del líquido se unen a los núcleos hasta que no queda líquido.

2.1.3.1. Subenfriamiento.

A la temperatura termodinámica de solidificación, la probabilidad de formación de núcleos estables y sostenibles es extremadamente pequeña. Por tanto, la solidificación no comienza a la temperatura termodinámica de fusión o a la de solidificación. Si la temperatura continúa disminuyendo por debajo de la temperatura de equilibrio de solidificación, la fase líquida que debe de haberse transformado en un sólido se vuelve cada vez más inestable

termodinámicamente hablando. Debido a que el líquido está a una temperatura menor que la temperatura de equilibrio de solidificación, la fase líquida que debe haberse transformado en un sólido se vuelve cada vez más inestable termodinámicamente hablando. Debido a que el líquido está a una temperatura menor que la temperatura de equilibrio de solidificación, el líquido se considera subenfriado. El subenfriamiento de ΔT es la temperatura de equilibrio de solidificación menos la temperatura real del líquido. A medida que el grado de subenfriamiento aumenta, la fuerza impulsora termodinámica para la formación de una fase sólida a partir del líquido supera la resistencia a crear una interfaz sólido-líquido. Este fenómeno puede observarse en muchas otras transformaciones de fase.

2.1.3.2. Nucleación.

En el contexto de la solidificación se refiere a la formación de los primeros cristales de nanotamaño del material fundido. En un sentido amplio, el término nucleación se refiere a la etapa de formación inicial de una fase a partir de otra. Cuando el vapor se condensa en líquido, a las gotas de tamaño a nanoescala del líquido que aparecen cuando comienza la condensación se les refiere como núcleos.

Se espera que un material se solidifique cuando el líquido se enfría justo debajo de su temperatura de congelación (o fusión), debido a que la energía asociada con la estructura cristalina del sólido es entonces menor que la energía del líquido.

Los dos mecanismos principales por los que tiene lugar la nucleación de partículas sólidas en un metal líquido, son: la nucleación homogénea y la nucleación heterogénea.

2.1.3.2.1. Nucleación homogénea.

Es el caso más simple de nucleación. Tiene lugar en el núcleo fundido cuando el material proporciona por sí mismo los átomos que se requieren para formar los núcleos. La nucleación homogénea suele requerir de un alto nivel de subenfriamiento que puede llegar a ser de varios cientos de grados centígrados para algunos metales. Para que un núcleo estable pueda transformarse en un cristal debe alcanzar el tamaño crítico. Una agrupación de átomos enlazados entre sí con un tamaño menor al tamaño crítico, se llama embrión; y otra que sea mayor que el tamaño crítico, se llama núcleo. A causa de su inestabilidad, los embriones se forman y redisuelven constantemente en el metal fundido, debido a la agitación de los átomos.

En la nucleación homogénea de un metal puro que está solidificando deben considerarse dos tipos de cambio de energía:

1. La energía libre de volumen liberada para la transformación de líquido a sólido.
2. La energía libre de superficie necesaria para formar las nuevas superficies sólidas de las partículas solidificadas.



Figura 4: Interfaz creada a partir de la formación de un sólido a partir de un líquido.

(Fundamentos de ingeniería y ciencia de materiales. Donald R. Askeland.& Pradeep P. Fulay)

La energía libre total asociada a la formación de un embrión o de un núcleo es la suma de los cambios de energía libre volumétrica y de la energía libre superficial. El cambio de energía libre total para la formación de un embrión esférico o de un núcleo de radio r formado por enfriamiento de un metal puro, está dado por la ecuación:

$$\Delta G = \frac{4}{3}\pi r^3 \Delta G_V + 4\pi r^2 \sigma_{sl}$$

Donde:

- $\frac{4}{3}\pi r^3$ es el volumen de un sólido esférico de radio r .
- $4\pi r^2$ es el área de un sólido esférico.
- σ_{sl} es la energía superficial libre de la interfaz sólido-líquido.
- ΔG_V es el cambio de energía libre para el proceso de solidificación por unidad de volumen, el cual es negativo ya que la transformación de fase se supone termodinámicamente factible.

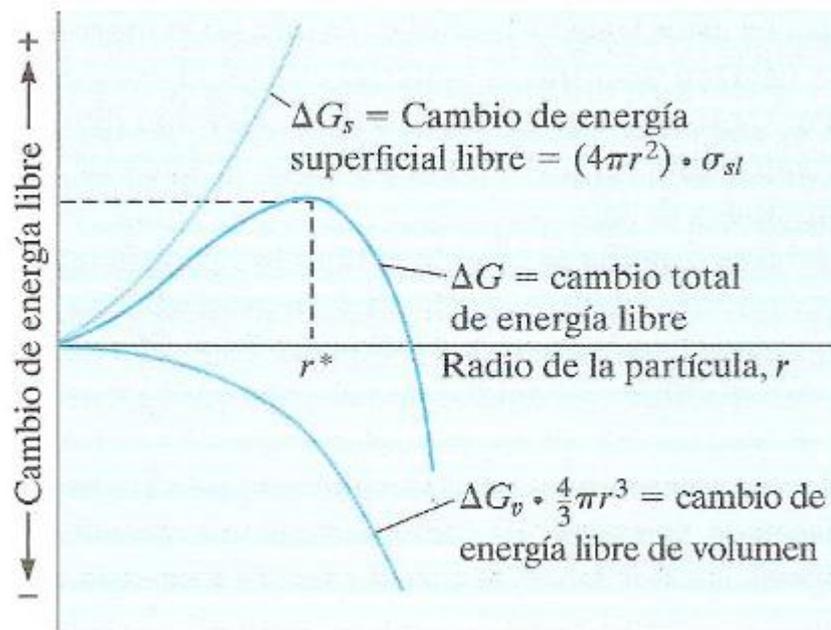


Figura 5: Cambio de energía libre total del sistema sólido-líquido con el tamaño del sistema.

(Fundamentos de ingeniería y ciencia de materiales. Donald R. Askeland.& Pradeep P. Fulay)

En la naturaleza un sistema puede cambiar espontáneamente de un estado de mayor energía a uno de menor energía. En el caso de la solidificación de un metal puro, si las partículas sólidas formadas durante la solidificación tienen un radio menor al del radio crítico r' , la energía puede disminuir y las partículas se redisuelven. Estos pequeños embriones pueden, por lo tanto, redisolverse en el metal líquido. Sin embargo, si las partículas sólidas tienen radios mayores a r' , la energía del sistema puede hacerse menor cuando estas partículas (núcleo) se convierten en partículas más grandes o cristales. Cuando r alcanza el radio crítico r' , ΔG llega a su máximo valor $\Delta G'$.

Se puede obtener una relación entre el tamaño del núcleo crítico, la energía libre superficial y la energía libre volumétrica para la solidificación de un metal puro, derivando la ecuación anterior respecto a r e igualando a 0 la derivada, quedando:

$$r' = \frac{-2\sigma_{sl}}{\Delta G_V}$$

A mayor grado de subenfriamiento ΔT por debajo de la temperatura de equilibrio de fusión del metal, mayor es el cambio de energía libre de volumen ΔG_V . Sin embargo, el cambio de energía libre debido a la energía de superficie ΔG_S no varía mucho con la temperatura. De este modo, el tamaño crítico del núcleo está determinado fundamentalmente por ΔG_V . Cerca de la temperatura de

solidificación, el tamaño crítico del núcleo debe ser infinito, dado que ΔT tiende a cero. A medida que aumenta el subenfriamiento, el tamaño del núcleo crítico disminuye. El tamaño crítico del núcleo está relacionado con el subenfriamiento por la relación:

$$r' = \frac{2\sigma_{sl}T_m}{\Delta H_f \Delta T}$$

Donde:

- r' es el radio crítico del núcleo.
- σ_{sl} es la energía libre superficial.
- ΔH_f es el calor latente de fusión
- ΔT cantidad de subenfriamiento a la que se ha formado el núcleo.

2.1.3.2.2. Nucleación heterogénea.

La nucleación heterogénea es la que tiene lugar en un líquido sobre la superficie del recipiente que lo contiene, las impurezas insolubles u otros materiales estructurales disminuyen la energía libre necesaria para formar un núcleo estable. Para que ocurra la nucleación heterogénea, el agente de nucleación sólido (impureza sólida o recipiente) debe ser mojado por el metal líquido. También el líquido debe solidificar fácilmente en el agente de nucleación. La nucleación heterogénea ocurre sobre el agente de nucleación porque la energía superficial para formar el núcleo estable es inferior a que si el núcleo se formara en el propio líquido puro (nucleación homogénea). Al ser menor la energía superficial para nucleación heterogénea, el cambio de energía libre total para la formación de un núcleo estable deberá ser también menor y también será menor el tamaño del núcleo crítico. De esta forma, se requiere menor subenfriamiento para producir un núcleo estable por nucleación heterogénea.

2.1.3.3. Formación de una estructura granular.

Cuando un metal relativamente puro se moldea en un molde fijo sin usar afinadores de grano (materiales añadidos al metal fundido para alcanzar granos finos en la estructura granular final), se producen normalmente dos tipos de estructuras de grano principalmente:

- **Granos equiaxiales**, que se obtienen cuando las condiciones de nucleación y crecimiento en el metal líquido durante la solidificación son tales que los cristales pueden crecer por igual en todas direcciones. Los granos equiaxiales se encuentran normalmente junto a la pared del molde frío. Un gran enfriamiento de la pared crea una elevada concentración de núcleos durante la solidificación, una condición necesaria para producir una estructura de granos equiaxiales.

- **Granos columnares**, son alargados, delgados y burdos, y se forman cuando un metal se solidifica muy lentamente en presencia de un fuerte gradiente de temperaturas. Relativamente pocos núcleos están disponibles cuando se producen los granos columnares.

2.1.4. Transformaciones de fase.

Una solución sólida es un material sólido en el que los átomos o iones de los elementos que lo constituyen están dispersos de manera uniforme. La introducción de elementos de aleación o impurezas, durante el procesamiento, modifica la composición del material e influye en su comportamiento de solidificación. Se define una fase como una porción, incluyendo el todo, de un sistema el cual es físicamente homogéneo dentro de sí mismo y delimitado por una superficie de tal manera que es separable mecánicamente de cualesquiera otras porciones. Una fase tiene las siguientes características:

1. Tiene la misma estructura o arreglo atómico en su interior.
2. Tiene casi la misma composición y propiedades en su interior.
3. Tiene una interfaz definida entre la fase y cualquiera de las fases circundantes o adjuntas.

Un diagrama de fases indica la estabilidad de las distintas fases para un conjunto de elementos. A partir del diagrama de fases, se puede predecir cómo se solidificará un material en condiciones de equilibrio. También puede predecir qué fases se esperará que sean termodinámicamente estables y en qué concentraciones se deben presentar éstas.

Se define aleación como un material que exhibe propiedades de un material metálico y está conformado por múltiples elementos. En la mayoría de las aplicaciones de materiales metálicos se usan aleaciones en vez de elementos puros. Existen dos tipos de aleaciones: monofásicas y polifásicas.

Existe una relación entre el número de componentes y el número de fases para un sistema dado y las condiciones que pueden permitirse que varíen (como la temperatura, la presión, etc.). Tiene la forma general:

$$2 + C = F + P$$

Donde:

- C es el número de componentes químicamente independientes (número de elementos o compuestos diferentes necesarios para especificar un sistema), por lo general elementos o compuestos, en el sistema.
- F es el número de grados de libertad, o el número de variables (como la temperatura, la presión o la composición), que se permite que varíen de forma independiente sin cambiar el número de fases en equilibrio.

- P es el número de fases presentes.
- La constante 2 indica que se permite que la temperatura y la presión varíen.

Los diagramas de fases son representaciones gráficas de las fases que existen en un sistema de materiales a varias temperaturas, presiones y composiciones. Los diagramas, en su mayoría se han construido en condiciones de equilibrio.

Las curvas de enfriamiento pueden emplearse para determinar las temperaturas de transición de las fases tanto para metales puros como para aleaciones. Una curva de enfriamiento se obtiene al registrar la temperatura de un material y compararla con el tiempo a medida que se enfría desde una temperatura en la cual se funde, mediante solidificación y, finalmente, a temperatura ambiente.

Seguidamente se presentarán una serie de conceptos de importancia en el estudio de los sistemas:

- La **reacción eutéctica** (en un diagrama de fases binario) es una transformación de fases en la cual toda la fase líquida se transforma isotérmicamente por enfriamiento en dos fases sólidas. La temperatura a la que tiene lugar la reacción eutéctica recibe el nombre de **temperatura eutéctica**. La composición de la fase líquida que reacciona para formar dos nuevas fases sólidas a la temperatura eutéctica se llama **composición eutéctica**. El punto determinado por la composición y la temperatura eutécticas es el llamado **punto eutéctico**.
- La **composición hipoeutéctica** es aquella que se encuentra a la izquierda del punto eutéctico mientras que la **composición hipereutéctica** es aquella que se encuentra a la derecha del punto eutéctico.
- La **fase proeutéctica** es la que se forma a una temperatura por encima de la temperatura eutéctica.
- La **reacción peritética** (en un diagrama de fases binario) es una transformación de fases en la cual, por enfriamiento, una fase líquida se combina con una fase sólida para producir una nueva fase sólida.
- La **reacción monotética** (en un diagrama de fases binario) es una transformación de fases en la cual, por enfriamiento, una fase líquida se transforma en una fase sólida y una nueva fase líquida (de composición diferente a la primera fase líquida).

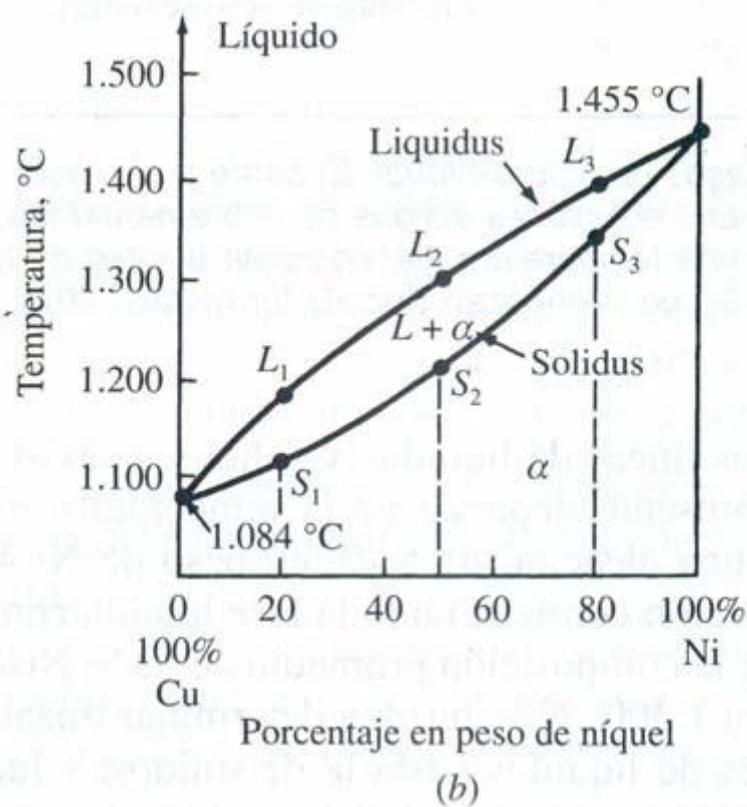
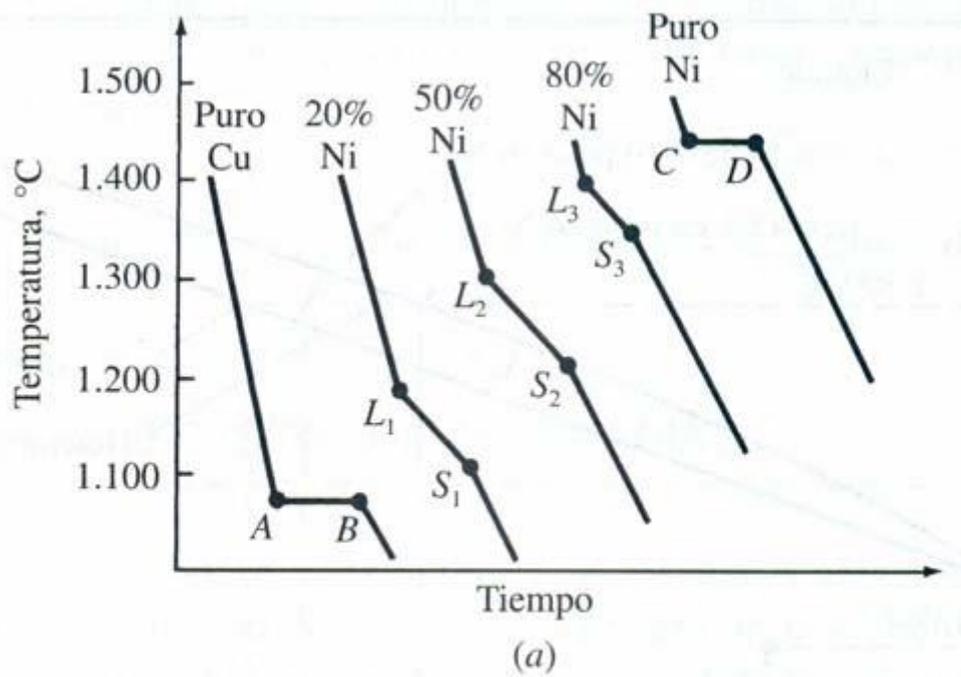


Figura 6: Curva de enfriamiento y diagrama de equilibrio para una aleación de níquel y cobre.

En el caso de aleaciones con más de dos aleantes, se emplearán los diagramas de fases ternarios. Los diagramas de fases ternarios usualmente se construyen utilizando un triángulo equilátero como base. Las composiciones de los sistemas ternarios se presentan con el componente puro en cada extremo del triángulo. Las composiciones de las aleaciones ternarias están representadas en los tres lados del triángulo.

En la Figura 7 se muestran varios diagramas de fases ternarios para aleaciones Ti-Al-V sobre los que aparece marcada la composición de Ti-6Al-4V con un *.

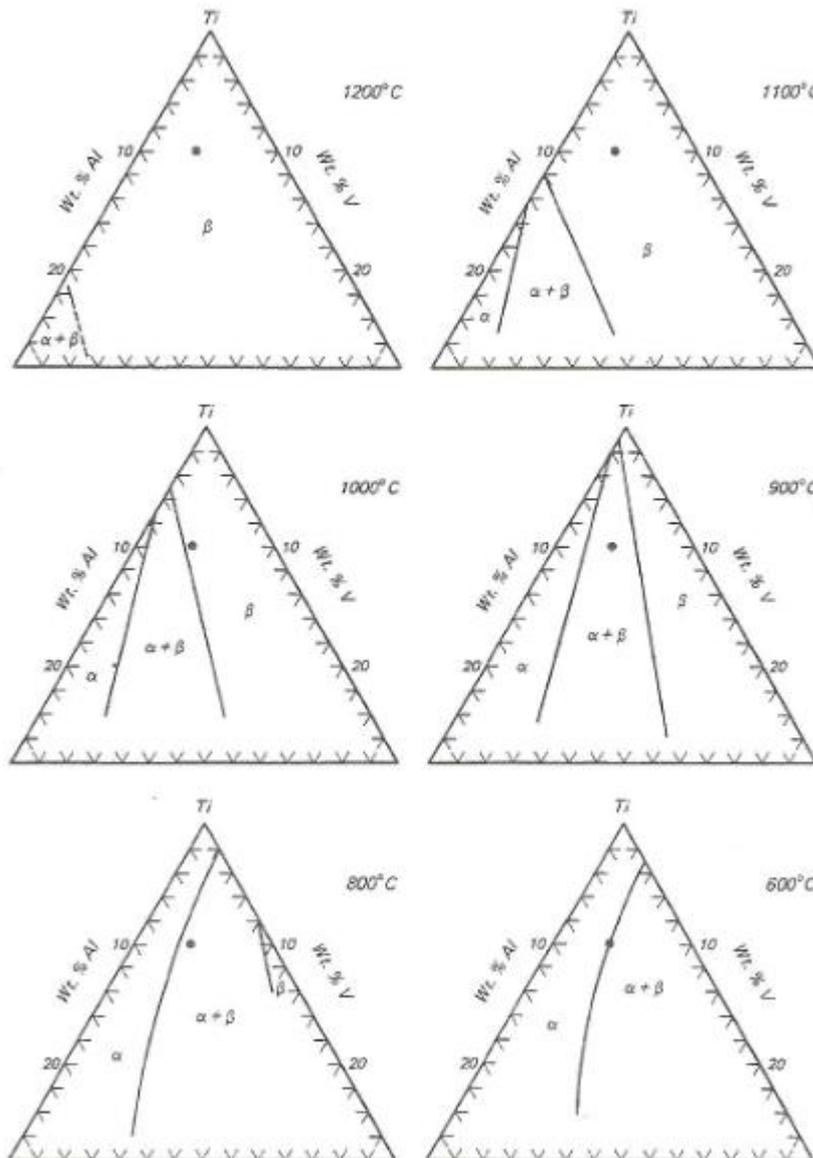


Figura 7: Diagramas ternarios de Ti-Al-V a distintas temperaturas (600 °C, 800 °C, 900 °C, 1000 °C, 1100 °C y 1200 °C).

(Materials Properties Handbook. Titanium Alloys. VVAA)

Se observa que a temperaturas elevadas la fase dominante es la β , mientras que, a medida que la temperatura desciende, la fase α va cobrando importancia

existiendo la posibilidad de precipitación de compuestos intermetálicos como el TiAl.

3. Titanio y Ti-6Al-4V

3.1. Titanio puro comercial.

El titanio es un elemento que se puede encontrar en cualquier punto del universo. Ha sido detectado en las estrellas, en el polvo interestelar, en meteoritos y en la corteza terrestre.

El titanio es el noveno elemento más abundante en la corteza terrestre, con un 0,8 % en peso, si bien no es tan frecuente su existencia en concentraciones que hagan económicamente viable su extracción. Está presente en numerosas rocas ígneas y en los sedimentos derivados de ellas, y también en muchos silicatos reemplazando al silicio. Los minerales que muestran una mayor concentración de este metal son el rutilo (TiO_2) y la ilmenita ($FeO \cdot TiO_2$), además de la anatasa y la brookita (ambas son también TiO_2).

3.1.1. Historia del titanio.

El titanio fue descubierto por el sacerdote y mineralogista inglés William Gregor en 1791, mientras estudiaba unas arenas negras procedentes de la zona de Cornualles. En la ilmenita procedente de esta fuente halló el óxido de un nuevo metal. En 1795, el alemán M. H. Klaproth redescubrió el mismo elemento en el rutilo, y le dio el nombre de titanio, derivado de la palabra latina *titans*.

En 1887 Nilson y Petterson obtuvieron una muestra impura de titanio. A pesar de que se intentó obtener este metal en forma pura (99,9 %) durante mucho tiempo, no se consiguió una muestra pura de titanio hasta el año 1910, cuando M. A. Hunter calentó una mezcla de sodio y el compuesto $TiCl_4$ en una bomba de acero, de forma que redujo el cloruro y consiguió una muestra pura de metal, si bien en una cantidad muy pequeña.

3.1.2. Obtención del titanio.

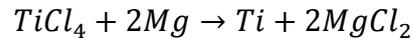
En 1937 el doctor Wilhelm Kroll, en asociación con Siemens y Hulske, desarrolló un proceso para la obtención de titanio consistente en la reducción del compuesto tetracloruro de titanio con magnesio molido, en una atmósfera de argón para evitar la oxidación. Este fue el primer proceso que permitió la obtención de cantidades apreciables de titanio puro, y se sigue utilizando mayoritariamente en la actualidad. El proceso consta de los siguientes pasos:

- Obtención de tetracloruro de titanio por cloración a 800 °C, en presencia de carbón, mediante la reacción:



- Se purifica el tetracloruro de titanio mediante destilación fraccionada.

- Se reduce el $TiCl_4$ con magnesio o sodio molido en una atmósfera inerte con la reacción:



- El titanio forma una esponja en la pared del reactor, la cual se purifica por lixiviación con ácido clorhídrico diluido. El $MgCl_2$ se recicla electrolíticamente.
- Se compacta la esponja resultante. Si se reduce el $TiCl_4$ mediante sodio en lugar de magnesio, la esponja resultante es granular, lo que facilita el proceso de compactación.
- Se funde la esponja en un horno con un crisol de cobre refrigerado, mediante un arco eléctrico de electrodo consumible en una atmósfera inerte.
- Si se desea mejorar la pureza y homogeneidad del lingote, se repite el paso anterior.
- Se realiza un primer procesado, en el cual los lingotes se convierten en productos generales de taller.
- Se realiza un segundo procesado, en el que se obtienen las formas acabadas de los productos realizados.

Otro método, desarrollado con posterioridad, se basa en la purificación del titanio mediante descomposición con yodo, pero es poco usado industrialmente, y se usa básicamente para la producción de titanio de muy alta pureza para la investigación. El proceso es el siguiente:

- El titanio puro se hace reaccionar con yodo en atmósfera inerte para formar yoduro de titanio.
- El yoduro de titanio se descompone en la superficie de un hilo de titanio calentado, el cual actúa como núcleo para el crecimiento de una barra cilíndrica, compuesta de cristales de titanio de alta pureza.

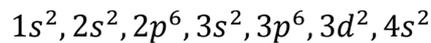
Otros métodos comerciales existentes son el proceso basado en la reducción por sodio, o proceso Hunter, el proceso de reducción directa del óxido y el proceso electrolítico.

A pesar del desarrollo del método Kroll, las posibilidades que ofrece el titanio no fueron conocidas hasta 1943. En dicho año, durante la II Guerra Mundial, la oficina de minas alemana, al investigar el proceso desarrollado por Kroll, comenzó a entrever las potencialidades del titanio. En 1946, una vez acabada la guerra y con el Dr. Kroll como miembro de la Oficina de Minas, este organismo publicó el primer gran informe sobre el metal, titulado *Metallic Titanium and its alloys*, en el que se indicaban las interesantes propiedades y características de este metal.

3.1.3. Propiedades del titanio.

3.1.3.1. *Propiedades físicas.*

El titanio natural es un elemento común en la corteza terrestre. Es un elemento de transición, como el hierro, el níquel o el cobalto, con una estructura electrónica:



la cual es característica de este grupo de elementos, con su capa d incompleta. Dicha estructura electrónica permite que el titanio forme soluciones sólidas con muchos elementos sustitucionales, con un factor de tamaño atómico de hasta un 20 %. Esto propicia los tratamientos térmicos con transformación parcial.

Desde un primer momento ha sido clasificado como metal ligero, a pesar de que su densidad es la mitad de la del hierro y es doble a la del aluminio, debido a su excelente relación entre resistencia/densidad.

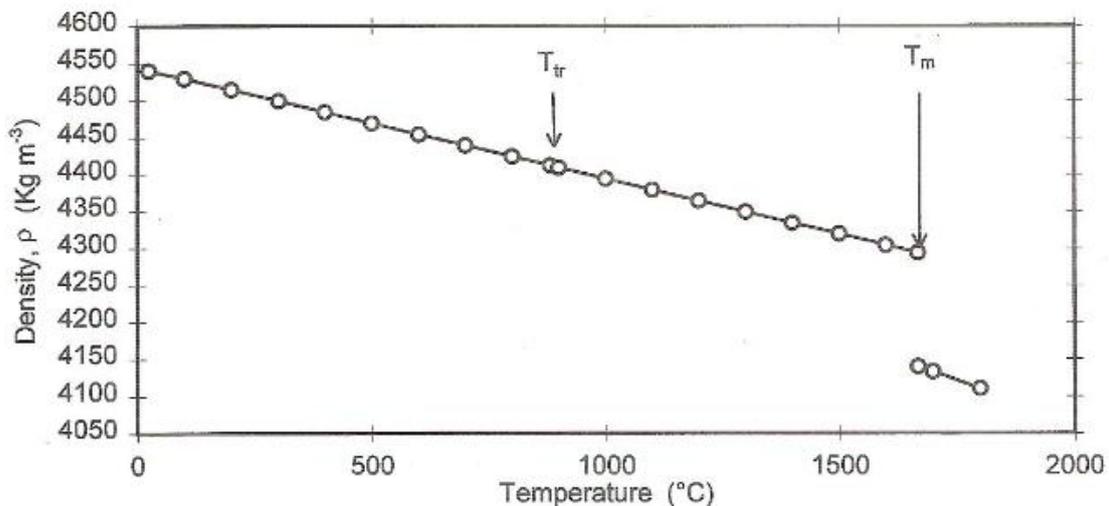


Figura 8: Evolución de la densidad del titanio puro comercial con la temperatura.

(Recommended values of thermophysical properties for selected comercial alloys. Kenneth C. Mills)

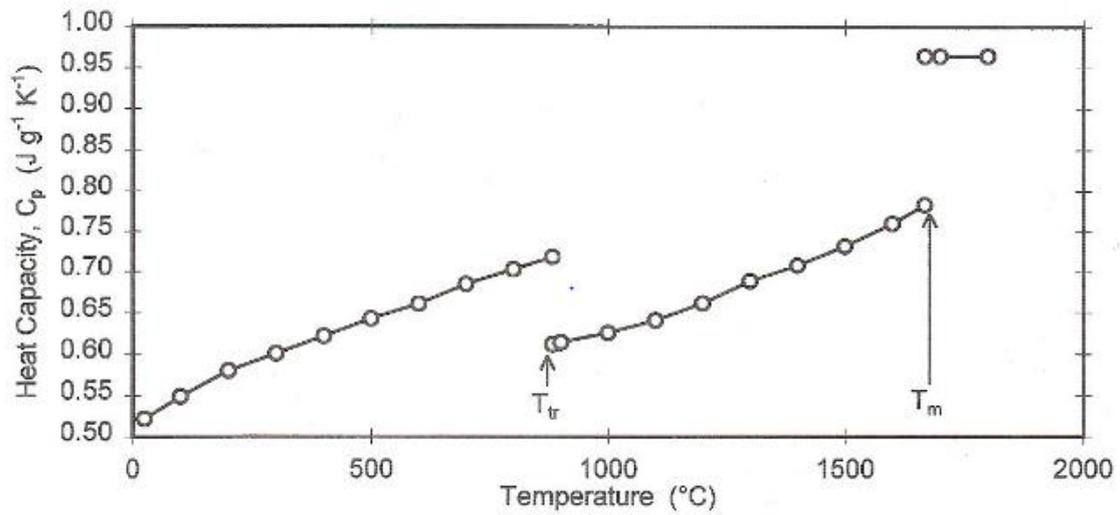


Figura 9: Evolución de la capacidad calorífica del titanio puro comercial con la temperatura.

(Recommended values of thermophysical properties for selected comercial alloys. Kenneth C. Mills)

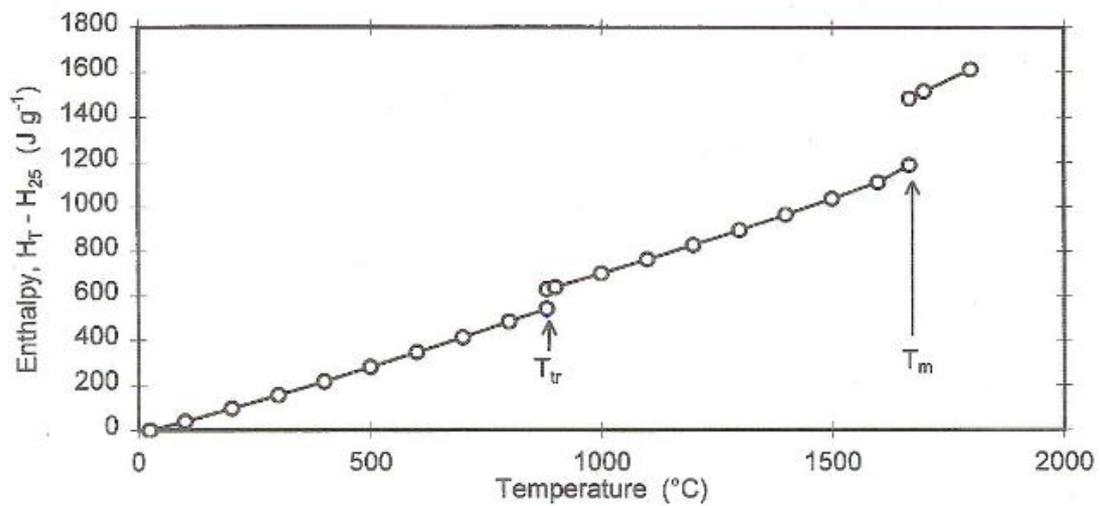


Figura 10: Evolución de la entalpía del titanio puro comercial con la temperatura.

(Recommended values of thermophysical properties for selected comercial alloys. Kenneth C. Mills)

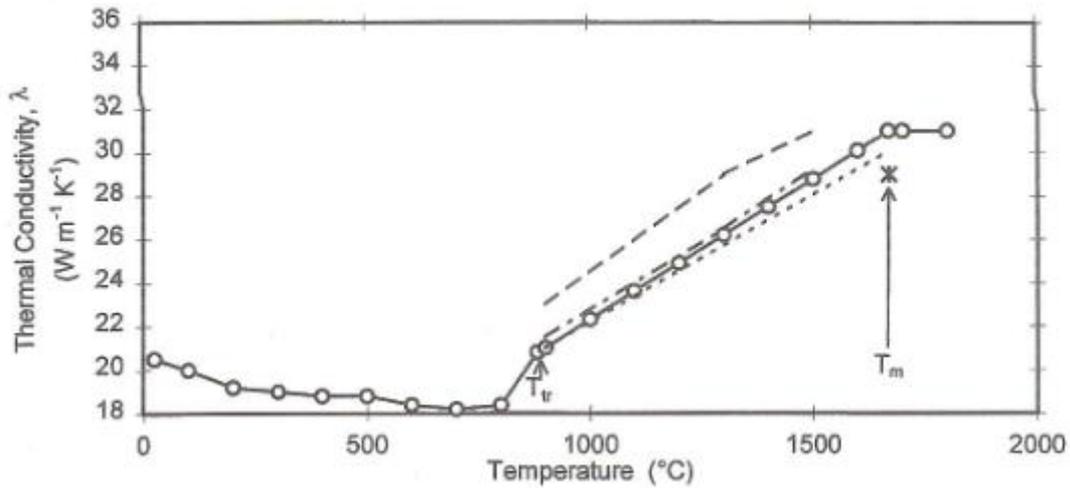


Figura 11: Evolución de la conductividad térmica del titanio puro comercial con la temperatura.

(Recommended values of thermophysical properties for selected comercial alloys. Kenneth C. Mills)

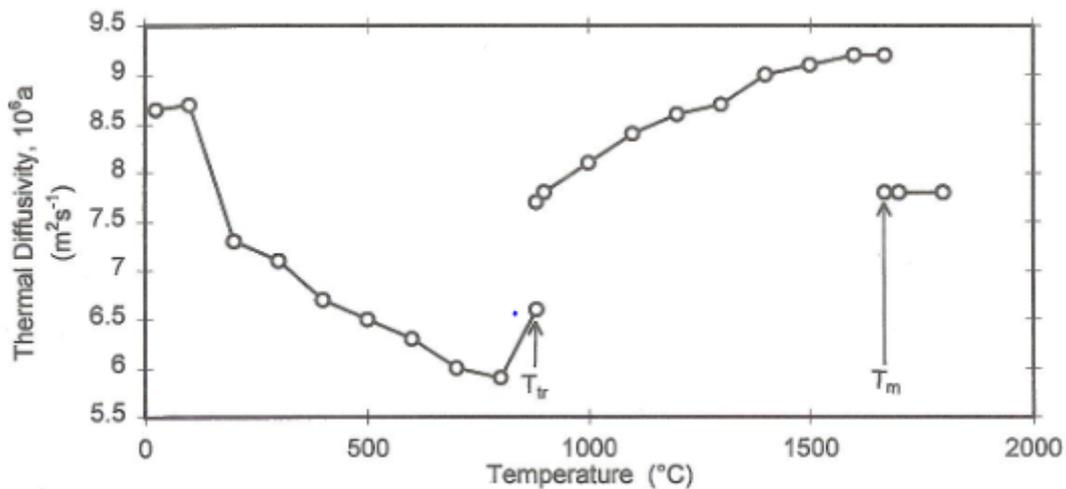


Figura 12: Evolución de la difusividad térmica del titanio puro comercial con la temperatura.

(Recommended values of thermophysical properties for selected comercial alloys. Kenneth C. Mills)

Entre sus propiedades físicas, es de destacar su alto punto de fusión, el cual indicó a los primeros investigadores del titanio las posibilidades de uso de este metal en condiciones de trabajo a altas temperaturas como fuselajes de avión o álabes de turbinas de gas. También son destacables su baja capacidad térmica, comparable a la del acero inoxidable, y sus bajos coeficientes de conductividad y dilatación térmica.

Propiedades	Valor
Número atómico	22
Peso atómico	47,88
Volumen atómico	10,6 W/D
Radio covalente	1,32 Å
Primer potencial de ionización	6,83 eV
Valencia	2, 3, 4
Punto de fusión	1670 ± 5 °C
Punto de ebullición	3260 °C
Estructura cristalina	α (HCP) para $T < 882$ °C β (BCC) para $T > 882$ °C
Parámetros de red cristalina	α : $c = 0,468$ nm; $a = 0,295$ nm β : $a = 0,332$ nm (a 900 °C);
Temperatura de transición $\alpha - \beta$	882 ± 2 °C
Densidad	fase α (20 °C): 4,507 g/cm ³ fase β (885 °C): 4,35 g/cm ³
Capacidad calorífica	523 J/kg °C
Conductividad térmica	17 W/m °C
Coeficiente de expansión térmica (a 20 °C)	8,41 · 10 ⁻⁶ °C ⁻¹
Conductividad eléctrica	2,38 · 10 ⁶ S/m

Tabla 4: Propiedades físicas del titanio.
(Aleaciones ligeras. Francisco Javier Gil Mur)

El titanio presenta transformación alotrópica, la cual permite que se puedan realizar tratamientos térmicos con transformación total. A temperatura ambiente, el titanio puro presenta una estructura cristalina hexagonal compacta (HCP), llamada fase α . Por encima de los 882 °C, dicha estructura cristalina sufre una transformación alotrópica, y se convierte en una estructura cúbica centrada en el cuerpo (BCC), llamada fase β .

El titanio es un mal conductor de la electricidad. Es treinta veces peor conductor que el cobre, y diez veces peor conductor que el aluminio. Debido a esto, el titanio no es usado en el transporte de electricidad (cabe destacar que la aleación $Ti - Nb$ es usada en aplicaciones de superconducción, debido a sus excelentes propiedades superconductoras a bajas temperaturas).

Respecto a sus propiedades magnéticas, el titanio puede ser clasificado entre los materiales que son paramagnéticos. Esto implica que el titanio es ligeramente atraído por un campo magnético, ya que su susceptibilidad magnética (K) es muy pequeña y positiva.

Material	Conductividad (%)
Cobre	100
Aluminio	30
Acero inoxidable	3,5
Titanio	3,1

Tabla 5: Conductividades de diversos materiales relativas a la del cobre. (Aleaciones ligeras. Francisco Javier Gil Mur)

3.1.3.2. *Propiedades químicas.*

El titanio tiene cinco isótopos, con pesos atómicos comprendidos entre 46 y 50, todos ellos estables. El más abundante es el $Ti - 48$. Además se conocen cuatro isótopos inestables.

Peso atómico	Proporción (%)
46	8,0
47	7,8
48	73,4
49	5,5
50	5,3

Tabla 6: Isótopos del titanio y abundancia relativa. (Aleaciones ligeras. Francisco Javier Gil Mur)

Como es característico en los elementos de transición, el titanio presenta una valencia variable entre el estado bivalente, trivalente y tetravalente. El mayor número de compuestos se da con la valencia tetravalente, pero se pueden formar compuestos en cada uno de los estados de valencia. El titanio puede formar soluciones sólidas y compuestos, bien con enlace metálico, bien covalente o bien iónico.

El titanio metálico puro es un metal blanco y lustroso, con una baja densidad. Presenta una excelente resistencia a la corrosión, ya que soporta el ataque de los ácidos inorgánicos, de la mayoría de orgánicos y del cloro húmedo. Sin embargo, reacciona muy rápidamente con el oxígeno, el nitrógeno, el hidrógeno y el carbono. Su comportamiento químico es similar al del circonio, hafnio y torio.

La reactividad térmica del titanio depende fuertemente de la temperatura. A altas temperaturas, la reactividad del titanio aumenta muchísimo. Esta propiedad es especialmente visible con la extrema reactividad del titanio con el oxígeno y otros gases a altas temperaturas. Con grandes intervalos de tiempo y altas temperaturas (mayores de 700 °C), los gases llegan a difundirse en la red cristalina del titanio.

El titanio metal se inflama a 1200 °C, con una incandescencia muy brillante. Este fenómeno se aprovecha en bengalas y otros artefactos pirotécnicos.

La gran reactividad del titanio con el oxígeno origina la rápida formación de una capa superficial de óxido. Los óxidos formados van desde el TiO hasta el Ti_7O_{12} , cada uno de los cuales muestra una gradación diferente, y para capas delgadas, muestran una superficie multicolorada. Esta capa de óxido, si bien es muy delgada, también es sumamente impermeable. De esta forma el metal queda protegido por una capa inerte que lo protege de la corrosión.

El titanio comparte esta característica con el aluminio, si bien la protección que proporciona la capa protectora de óxido de titanio es muy superior a la del óxido de aluminio, tanto frente a la corrosión como frente a oxidación. Esta notable propiedad hace del titanio un excelente material para su uso en ambientes corrosivos y en la industria química.

La resistencia a la corrosión es excelente en casi todos los medios usuales en la industria, incluidos el cloro húmedo, el ácido nítrico, ácidos orgánicos, disoluciones de cloruros, sulfatos, sulfuros, etc. y azufre fundido. Asimismo, su resistencia a la corrosión en ambientes marinos sólo es superada por el oro, el platino y la plata. La unión con otros metales no acelera la corrosión, ya que pasa a ser el positivo de cualquier par galvánico, a excepción de los que forma con metales nobles. Esto se debe a su alto potencial electropositivo.

Esta excelente resistencia a la corrosión se ve comprometida en ambientes que puedan disolver la capa de óxido, por lo que puede sufrir corrosión en ambientes reductores, y también en presencia de iones fluoruro o de cloro seco. En estos casos, es posible inhibir la corrosión añadiendo agentes oxidantes, iones metálicos, o bien, un poco de humedad al cloro.

En general, la reactividad química general del titanio no es peligrosa. A excepción de reacciones que impliquen titanio molido o en partículas muy finas, o de la exposición a ácido nítrico humeante por largo tiempo, no hay reacciones explosivas o inflamables. Los compuestos formados no son tóxicos. A pesar de esto, como muchos otros materiales, el polvo de titanio en suspensión es explosivo, y la acumulación de partículas finas arde ferozmente si llega a la ignición. Estos fuegos que involucren partículas de titanio se han de tratar del mismo modo que los incendios que afecten al magnesio.

La biocompatibilidad del titanio es excelente. Su no toxicidad, su excelente resistencia a la corrosión, su compatibilidad con tejidos y huesos y el hecho de que no induce la formación de un tejido fibroso a su alrededor lo convierten en un material excelente para su uso en prótesis óseas, dentales y en otras aplicaciones en traumatología.

3.1.3.3. *Propiedades mecánicas.*

Las propiedades mecánicas del titanio dependen de su pureza.

Propiedades	Valor
Resistencia	240 MPa
Límite elástico	170MPa
Alargamiento	50 %
Dureza	70 HR _B ; 85 HV

*Tabla 7: Propiedades del titanio grado 1.
(Aleaciones ligeras. Francisco Javier Gil Mur)*

La resistencia es baja, pero puede elevarse a expensas de disminuir su plasticidad (como en otros metales) disolviendo otros elementos en la red del titanio. También hay que tener en cuenta que es susceptible de recibir tratamientos térmicos con transformación total o parcial y de endurecerse por acritud.

En el caso del titanio, su gran reactividad, su afinidad por el oxígeno, nitrógeno, carbono e hidrógeno, y el hecho de que la solubilidad intersticial de estos elementos en el titanio es varios órdenes de magnitud mayor que en otros metales hace que la influencia de estos elementos en las propiedades mecánicas sea notable.

Metal	Elemento intersticial			
	Oxígeno	Nitrógeno	Carbono	Hidrógeno
Titanio	14,5 %	20 %	0,5 %	100 ppm
Hierro	1 ppm	< 5 ppm	100 ppm	< 1 ppm
Aluminio	< 1 ppm	< 1 ppm	< 1 ppm	< 1 ppm

Tabla 8: Solubilidades a temperatura ambiente de elementos intersticiales en metales.

(Aleaciones ligeras. Francisco Javier Gil Mur)

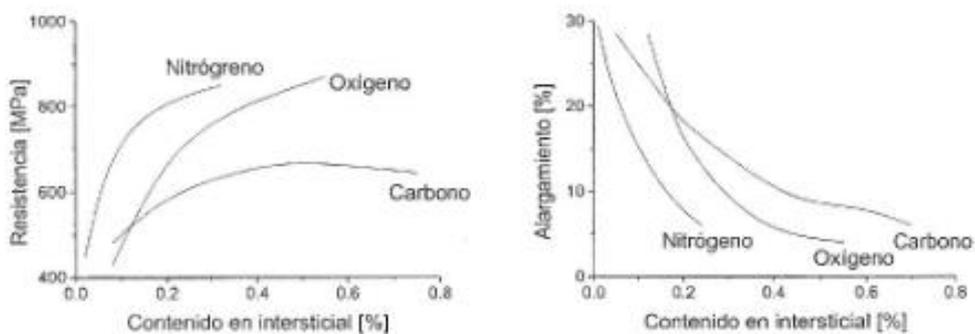


Figura 13: Influencia del contenido en intersticiales en la resistencia y ductilidad del titanio.

(Aleaciones ligeras. Francisco Javier Gil Mur)

Por esto se definen varios grados de titanio comercialmente puro en función del contenido de estos elementos (que controlan su resistencia y fragilidad) y del hierro (que controla su resistencia a la corrosión). Se definen así mismo

aleaciones ELI (Extra Low Intersticiales) con contenidos muy bajos en elementos intersticiales, que garantizan una buena plasticidad y una baja toxicidad (si su utilización es médica). Prueba de esta influencia es la comparación con los valores anteriores de los que se consideran representativos de un titanio de pureza 99 % (grado 4), y un grado más alto de intersticiales (0,4 % de oxígeno).

Propiedad	Valor
Resistencia	550 MPa
Límite elástico	480 MPa
Alargamiento	15 %

*Tabla 9: Propiedades del titanio grado 4.
(Aleaciones ligeras. Francisco Javier Gil Mur)*

La posibilidad de disolver elementos intersticiales y su influencia en el comportamiento mecánico tiene una gran importancia en el comportamiento en diversos procesos, obligando a realizar en atmósfera inerte o vacío cualquier calentamiento. Asimismo, su disolución altera en gran medida la temperatura de transformación alotrópica, por lo que puede originar un cambio en la microestructura. El comportamiento en caliente y a fluencia es inferior al que podría esperarse de su temperatura de fusión.

Grado ASTM	Tensión a la rotura (MPa)	Límite elástico (MPa)
Grado 1	240	170 – 310
Grado 2	345	275 – 450
Grado 3	440	380 – 550
Grado 4	550	480 – 655

*Tabla 10: Propiedades mecánicas de los grados ASTM de titanio comercialmente puro.
(Aleaciones ligeras. Francisco Javier Gil Mur)*

3.1.3.4. Las aleaciones de titanio.

El titanio es el único metal ligero que presenta dimorfismo, ya que en estado puro su estructura compacta hexagonal (α) presenta una transformación alotrópica en una estructura BCC (β) a la temperatura de 882 °C. La estructura β es inestable a temperaturas menores a 882 °C, descomponiéndose de nuevo en la fase α .

Esta transformación posibilita la realización de tratamientos térmicos con transformación total en las aleaciones de titanio siendo el único metal ligero cuyas aleaciones presentan esta capacidad. Por otra parte, esta transformación ofrece la posibilidad de obtener aleaciones con microestructuras de tipo α , β o α/β , dependiendo de los elementos aleantes que estabilizan una u otra fase.

El titanio puede formar soluciones sólidas y compuestos, con enlace metálico, covalente o iónico. Según la capacidad de los aleantes de estabilizar la fase α o

β se definen tres tipos de aleaciones de titanio: las aleaciones tipo α , aleaciones tipo α/β y aleaciones β . Las aleaciones tipo α/β se suelen clasificar a su vez en casi- α , cuando tiene una estructura esencialmente α a temperatura ambiente y casi- β , cuando la estructura a temperatura ambiente es principalmente β .

La temperatura mínima que permite obtener un 100 % de fase β se llama temperatura β -transus y es crítico para los procesos de transformación y para los tratamientos térmicos.

3.1.3.4.1. Efecto de los aleantes.

El titanio se puede alea con distintos materiales, que estabilizan una de las dos fases que presenta este metal. Los metales que estabilizan la fase α son elementos que incrementan la temperatura a la cual la fase α es estable. En general, los elementos con menos de 4 electrones de valencia por átomo estabilizan la fase α y se disuelven preferentemente en ella. Los elementos más importantes que se comportan de esta manera son el aluminio, el oxígeno, el carbono y el nitrógeno. El aluminio tiene una alta solubilidad en la fase α y en la fase β , mientras que los otros elementos son intersticiales.

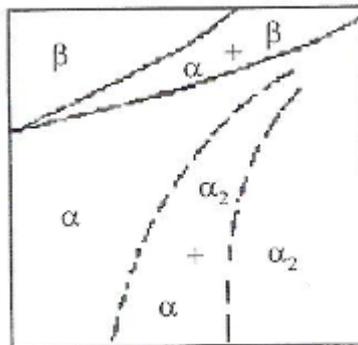


Figura 14: Diagrama de equilibrio del titanio con un metal α -estabilizante.
(Aleaciones ligeras. Francisco Javier Gil Mur)

Los elementos que estabilizan la fase β son elementos que permiten que sea estable a temperaturas menores de la temperatura de β -transus. Destacan como aleantes β el vanadio, el molibdeno y el tántalo. El vanadio y el molibdeno son β -isomorfos con el titanio BCC, que no forma compuestos intermetálicos con ellos.

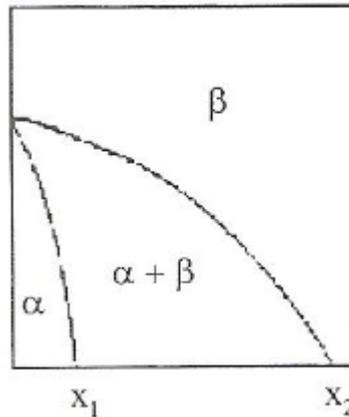


Figura 15: Diagrama de equilibrio del titanio con un metal β -estabilizante.
(Aleaciones ligeras. Francisco Javier Gil Mur)

Otro grupo de aleantes que estabilizan la fase β son los que forman sistemas eutectoides con el titanio, de forma que poseen una temperatura de transformación eutectoide mucho menor que la temperatura de β -transus. Además permiten minimizar a formación de compuestos intermetálicos que puede ocurrir en el servicio a altas temperaturas. Entre estos aleantes destacan el hierro, el manganeso, el cromo, el cobalto, el níquel, el cobre y el silicio.

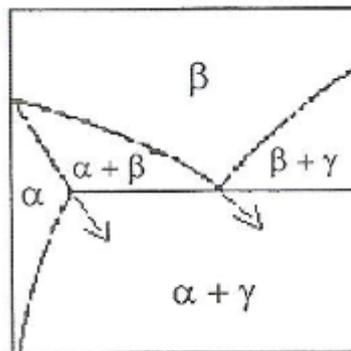


Figura 16: Diagrama de equilibrio del titanio con un metal β -estabilizante eutéctico.

(Aleaciones ligeras. Francisco Javier Gil Mur)

Otros elementos que son usados con frecuencia para alea el titanio son el estaño y el circonio. El estaño es muy soluble en la fase α y en la β , mientras que el circonio es isomorfo con ambas fases. Su efecto es el de retardar las velocidades de transformación, además de ser agentes endurecedores.

Por debajo de la temperatura de β -transus, si contiene elementos β -estabilizadores el titanio es una mezcla de fase α y fase β . Sin β -aleantes sería sólo α .

3.1.3.4.2. Clasificación de las aleaciones.

A partir de los diagramas de equilibrio que presenta el titanio aleado con diferentes aleantes, la realización de una clasificación de las aleaciones de titanio

es inmediata, según el tipo de fase que presenta la estructura de la aleación a temperatura ambiente.

Se denominan aleaciones α a aquellas aleaciones que presentan una estructura α a temperatura ambiente. El efecto de los aleantes usados en estas aleaciones es generalmente el de producir un aumento de la temperatura de β -transus. Estos son, por supuesto, los aleantes α ya citados anteriormente.

Las aleaciones β son aquellas en las que la estructura a temperatura ambiente es fase β . El efecto del aleante es conseguir estabilizar la fase β de la aleación a temperatura ambiente. Para lograr este propósito son muy utilizados los llamados aleantes β -isomorfos. Se denominan aleaciones α/β aquellas aleaciones de titanio en las que la estructura del material consiste en una mezcla de fase α y fase β , cuya proporción depende del efecto y del porcentaje de los aleantes añadidos al titanio. Aunque muchas aleaciones β son bifásicas en equilibrio, en general estas aleaciones se componen de titanio más un aleante alfa y otro beta.

3.1.3.5. *Aplicaciones.*

Las aplicaciones aeroespaciales (incluyendo su uso tanto en componentes estructurales como en los motores a reacción) todavía constituyen la mayor aportación en el uso de las aleaciones de titanio. De hecho, el titanio tuvo tanto éxito en su aplicación en la industria aeroespacial que el resto de otras aplicaciones potenciales no fueron explotadas. Estas otras aplicaciones se han comenzado a explorar recientemente (últimos 20 años), estando algunas en etapa de desarrollo, mientras que otras se están usando o empezando a usar, consumiendo cantidades importantes de metal. Entre estas aplicaciones se encuentran:

1. Aplicaciones donde el titanio se usa por su alta resistencia a la corrosión, tales como procesado químico, la industria del papel, aplicaciones marinas y producción y almacenaje de energía.
2. Aplicaciones biomédicas donde se aprovecha que el titanio es inerte dentro del cuerpo humano, usándose para la fabricación de implantes quirúrgicos y dispositivos prostéticos.
3. Aplicaciones especiales que explotan propiedades específicas como la superconductividad (aleado con niobio) y el efecto de memoria de forma (aleado con níquel).
4. Áreas de nueva aplicación donde la alta resistencia específica del metal es importante, como por ejemplo en la industria de la automoción.
5. Aplicaciones de consumo desde las cámaras a la joyería, los instrumentos musicales o el equipamiento deportivo.

3.1.3.5.1. Aeronáutica.

Su alta resistencia específica, resistencia a la fatiga y a la fluencia, así como su alta tenacidad a la fractura son características que hacen al titanio un material idóneo para la industria aeroespacial.

Con respecto a los componentes estructurales, la más temprana aplicación fue en 1952, para los incendios del avión comercial Douglas DC-7. Desde entonces el titanio se ha venido utilizando en componentes estructurales de aviones, desde el Boeing 707 y el avión de reconocimiento supersónico SR-71 Blackbird hasta los satélites espaciales y los misiles.

En lo que se refiere a componentes de los motores a reacción, se fabrican discos de ventilación, álabes y palas de turbinas de titanio y sus aleaciones. La investigación en el titanio es un aspecto muy importante para poder incrementar la eficacia de los motores, y su uso se espera que sea posible en las secciones que trabajan a altas temperaturas en los motores a reacción para conseguir aumentar los valores de las mismas. Los compuestos intermetálicos de titanio son otra clase de materiales que se espera que mejoren la relación empuje/peso en los motores a reacción. Asimismo, el uso de piezas de precisión moldeadas con titanio, tales como cámaras de admisión y camisas de compresor, está aumentando.

3.1.3.5.2. Corrosión.

El titanio comercialmente puro es más utilizado que las otras aleaciones de titanio cuando se requiere una alta resistencia a la corrosión, especialmente en aquellos casos en los que no es necesaria una alta resistencia mecánica. Habitualmente la razón de la posible elección del titanio en una aplicación donde se requiere alta resistencia a la corrosión es de tipo económico.

Dentro del campo de la industria del proceso, el titanio es utilizado para la construcción de bombas, depósitos, reactores químicos y columnas de fraccionamiento.

En aplicaciones marinas, sometidas al ataque de soluciones salinas, la aplicación de titanio incluye: hélices y ejes de timón, cascos de cámaras de presión submarina, componentes de botes salvavidas y plataformas petrolíferas.

Dentro del campo de la producción y almacenaje de energía, el titanio se está aplicando a la construcción de intercambiadores de calor, condensadores y conducciones en centrales que utilizan agua de mar como refrigerante. Una aplicación crítica corresponde a la construcción del condensador principal de las plantas nucleares, el cual no debe tener ningún tipo de pérdida.

Dos aplicaciones relativamente novedosas de las aleaciones de titanio son en las unidades de desulfuración de gases canalizados con el objetivo de eliminar

las emisiones de las centrales térmicas de carbón, y como bombonas contenedoras de residuos radioactivos de baja intensidad.

3.1.3.5.3. Biomedicina.

La utilidad del titanio como material biomédico radica en la falta de reacciones de rechazo por parte de los tejidos del cuerpo humano, debida principalmente a su alta resistencia a la corrosión en el medio fisiológico.

El titanio y sus aleaciones están siendo utilizadas en la construcción de prótesis articulares, prótesis orales y componentes para la fabricación de válvulas cardíacas y componentes de marcapasos. En el campo de la traumatología también se está utilizando en la elaboración de clavos y placas de osteosíntesis para la recuperación de fracturas óseas. Los implantes de titanio que están especialmente preparados con superficies porosas o rugosas promueven el crecimiento del hueso sobre estas superficies, lo cual resulta en un aumento de la fijación y una mejora en la respuesta del implante a largo plazo.

Otra aplicación, dentro del campo biomédico, es la utilización de materiales con memoria de forma para la construcción de clips o alambres de ortodoncia, con el objeto de presionar sobre las zonas a tratar. Estas aleaciones con memoria de forma (a base de titanio y níquel) también están siendo utilizadas en la elaboración de redes tubulares que se expanden al ser introducidas en las venas y las arterias en el momento en que son calentadas por el organismo, con el propósito de abrir y ensanchar las citadas venas y arterias.

3.1.3.5.4. Otras aplicaciones.

Las propiedades específicas del titanio lo hacen un material atractivo para los diseñadores de una gran variedad de industrias. El titanio todavía es relativamente caro cuando se compara con el acero o el aluminio, pero el aumento de su uso dentro de los campos comentados hasta ahora hace que se pueda esperar una disminución en los costes de producción, resultando en un crecimiento aún mayor en la diversidad de sus aplicaciones. Así pues, hay otros campos en los que el titanio y sus aleaciones se comienzan a aplicar. Hoy en día se hace de forma puntual, aunque se espera un amplio desarrollo en su aplicación:

1. Dentro del campo de la automoción, el titanio se utiliza en alta competición para la construcción de elementos de motor, sistemas de transmisión y suspensión. También hay empresas que están contemplando la posibilidad de incluir válvulas y muelles de suspensión en modelos de turismos. En cualquier caso, el desarrollo de la reducción de costes y de tratamientos superficiales para aumentar la durabilidad del titanio es esencial para incrementar el uso del titanio en la automoción.

2. Dentro del campo de la arquitectura, los arquitectos japoneses han utilizado el titanio como material de construcción durante algún tiempo. Un ejemplo es el techo del acuario municipal de Kobe, en el cual se usaron aproximadamente 11 T de titanio. Aunque es más costoso que el acero inoxidable, el titanio se considera económicamente rentable en estructuras levantadas en los trópicos y otras zonas que están expuestas a vientos cálidos y muy fuertes.
3. Su aplicación como bienes de consumo en la joyería, el deporte, etc. está cada vez más extendida.

3.2. Ti-6Al-4V

El Ti-6Al-4V es la aleación de titanio de uso más común y cuenta con numerosas aplicaciones en diversos campos como la aviación, la biomedicina...

Al	Fe	Ti	V	H	O ₂ +N ₂
5,5 – 6,7	0,03	90	3,5 – 4,5	0,0125	0,25

Tabla 11: Composición química del Ti-6Al-4V.

(Recommended values of thermophysical properties for selected commercial alloys. Kenneth C. Mills)

3.2.1. Propiedades.

El Ti-6Al-4V tiene una densidad a temperatura ambiente de aproximadamente $4374 \frac{kg}{m^3}$ siendo su punto de fusión a los 1650 °C.

Además sufre una transformación alotrópica en estado sólido a una temperatura de 995 °C aproximadamente.

T °C	25-200	25-300	25-400	25-500	Estimado
$\alpha \cdot 10^{-6}$	9	9,5	9,8	16	$\alpha = 1,1 \cdot 10^{-5} K^{-1}$

Tabla 12: Coeficiente de dilatación térmica para diferentes intervalos de temperaturas.

(Recommended values of thermophysical properties for selected commercial alloys. Kenneth C. Mills)

A continuación se muestran una serie de gráficas con la evolución de una serie de propiedades del Ti-6Al-4V con la temperatura.

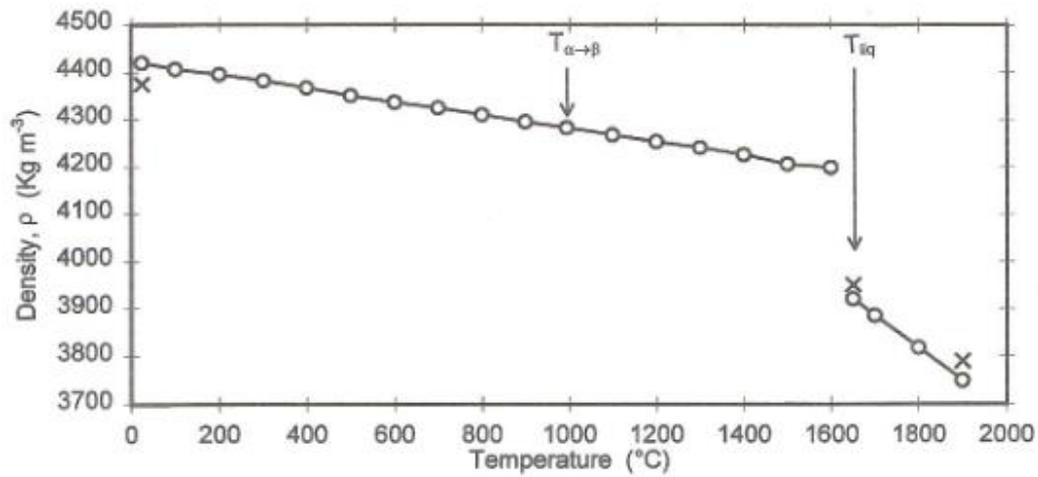


Figura 17: Evolución de la densidad del Ti-6Al-4V con la temperatura.
(Recommended values of thermophysical properties for selected commercial alloys. Kenneth C. Mills)

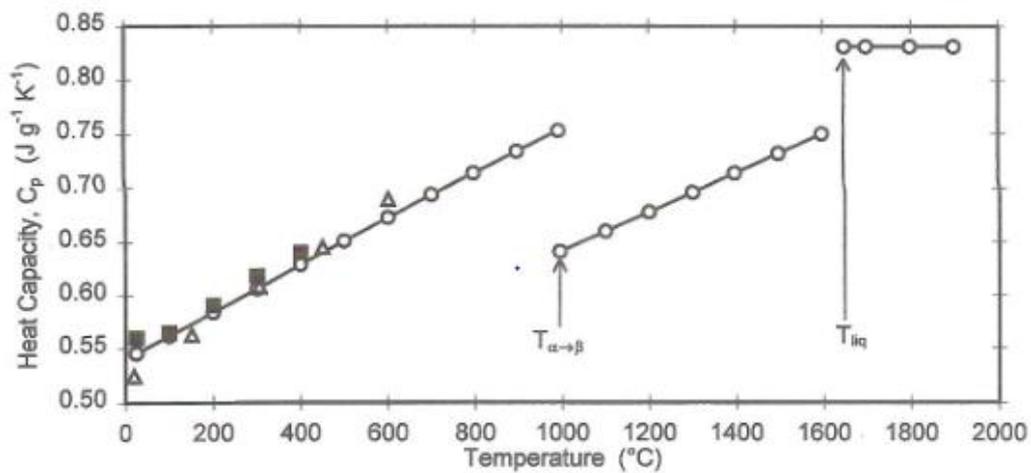


Figura 18: Evolución de la capacidad calorífica del Ti-6Al-4V con la temperatura.
(Recommended values of thermophysical properties for selected commercial alloys. Kenneth C. Mills)

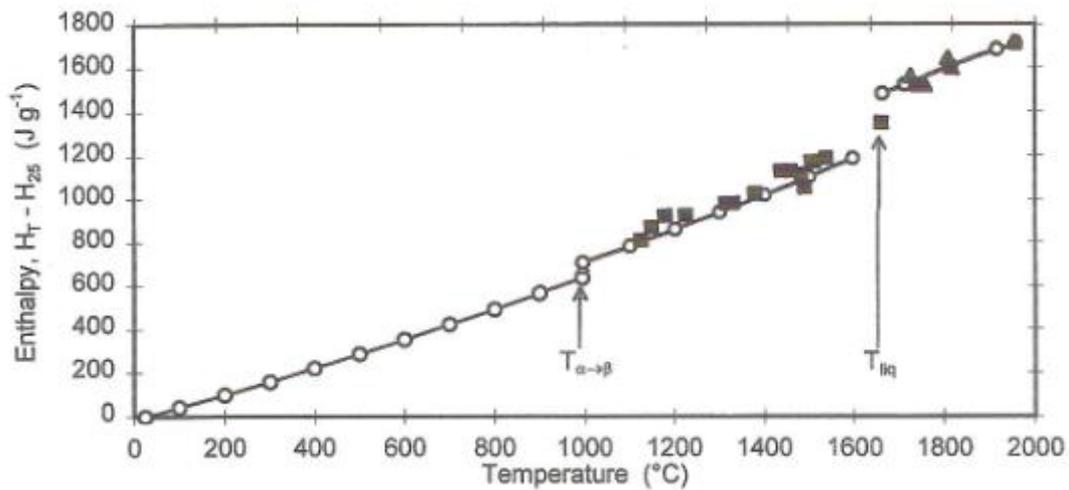


Figura 19: Evolución de la entalpía del Ti-6Al-4V con la temperatura.
(Recommended values of thermophysical properties for selected commercial alloys. Kenneth C. Mills)

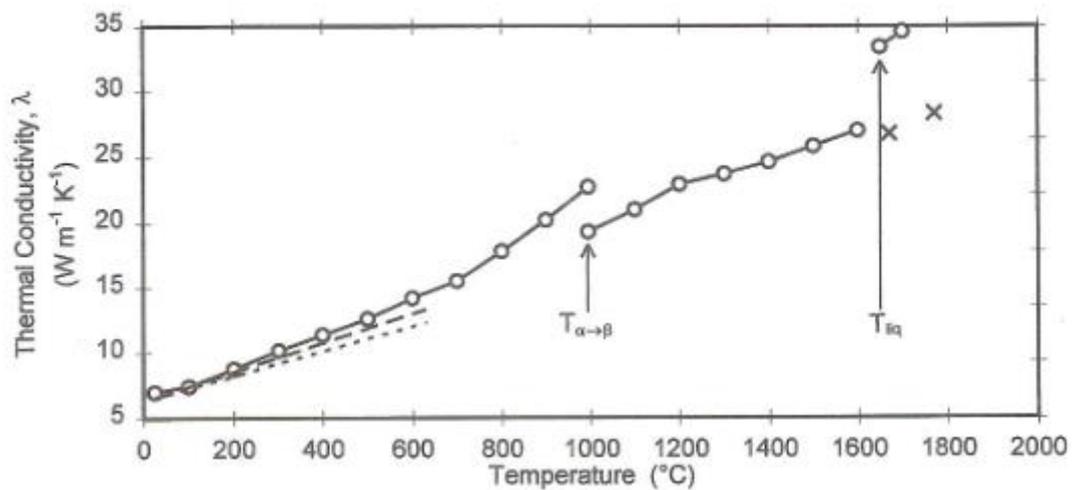


Figura 20: Evolución de la conductividad térmica del Ti-6Al-4V con la temperatura.
(Recommended values of thermophysical properties for selected commercial alloys. Kenneth C. Mills)

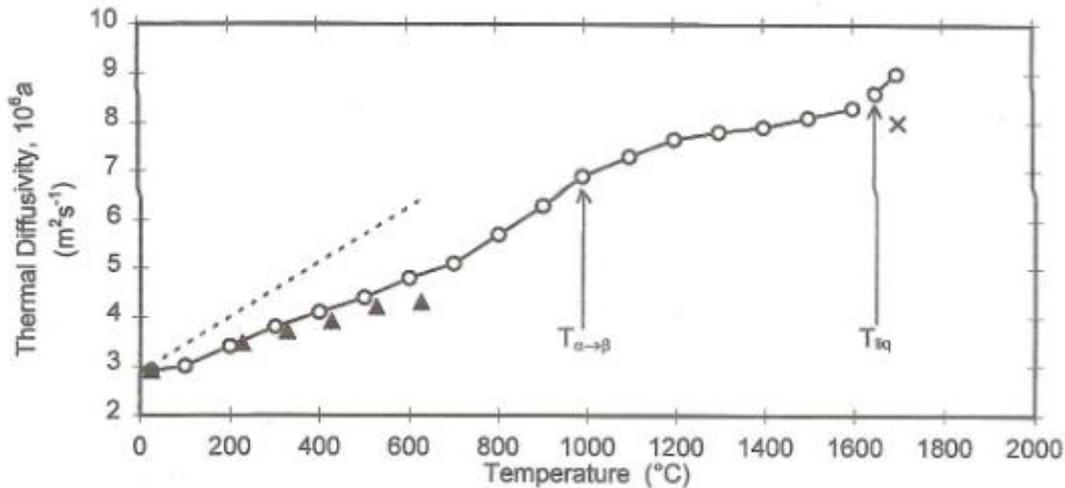


Figura 21: Evolución de la difusividad térmica del Ti-6Al-4V con la temperatura. (Recommended values of thermophysical properties for selected commercial alloys. Kenneth C. Mills)

Es destacable la similitud en el comportamiento de estas propiedades con las del titanio puro comercial presentadas anteriormente.

3.2.2. Aplicaciones.

Es por mucho la aleación de titanio $\alpha + \beta$ más comúnmente utilizada. Una de sus mayores aplicaciones es en partes estructurales de aeronaves. La elección de este material sobre otras aleaciones metálicas, como aleaciones de aluminio de alta resistencia, es debida al mayor rendimiento en cuanto a estrés y resistencia a la fatiga., mejor resistencia a la corrosión, mayor módulo de elasticidad y sus prestaciones a alta temperatura. Además, hay que tener en cuenta que para piezas estructurales tan grandes como las empleadas en aviación, la propiedad mecánica más importante será la propagación de macrogrietas por fatiga resultando en un requerimiento para establecer el tiempo de servicio entre reconocimientos.

Otra importante área de aplicación es en las partes rotativas y no rotativas de los motores de aviones. La mayor limitación del Ti-6Al-4V es que la máxima temperatura de aplicación es de aproximadamente de 300 °C lo que restringe el uso de esta aleación en la sección rotativa del motor a la plataforma del ventilador, a la sección de baja presión del compresor (LP) y a las plataformas frontales en el compresor de alta presión (HP). Más atrás en el compresor de alta presión la temperatura es tan alta que tienen que ser empleadas las llamadas aleaciones de titanio de alta temperatura.

La aleación Ti-6Al-4V es también el material más común en discos. Para discos, la duración del LCF (Low Cycle Fatigue) es a menudo limitante porque cada

tramo requiere máxima capacidad, lo que cuenta como un ciclo en la duración del LCF. De todas las posibles microestructuras, la microestructura bi-modal es seleccionada para materiales de discos debido a la mucha mejor resistencia LCF y resistencia a la propagación de microgrietas comparado con la microestructura enteramente laminar así como con propiedades mejores y más fácilmente reproducibles que las estructuras enteramente equiaxiales y recocidas.

La nueva tecnología de manufactura de componentes de rotores integrados mediante acoplamiento directo de las aspas al disco usando soldadura por fricción lineal en estado sólido está también hecha con Ti-6Al-4V como material.

Componentes no rotativos en motores de aviación hechos de Ti-6Al-4V como material pueden ser cubiertas, conductos, estatores, colectores, etc., dependiendo del tipo de motor. Los criterios de selección sobre materiales competidores (principalmente aleaciones de aluminio) son: mayor rigidez, mayor ratio de tensión de fluencia-densidad, prestaciones a más altas temperaturas y mejor resistencia a la combustión. Las propiedades de fatiga son de menor importancia, sin embargo para algunos componentes no rotativos pueden aparecer vibraciones y tendrán que ser tenidas en cuenta en ese caso.

En el área de la producción de energía hay también una limitada aplicación del Ti-6Al-4V como material en álabes de turbinas de vapor.

En el área de la producción de petróleo y gas en alta mar, el Ti-6Al-4V ofrece una gran ventaja en sistemas de elevación turbulares sobre los materiales de acero de la competencia debido al bajo módulo de elasticidad (50 % del acero) combinado con una mejor resistencia a la fatiga provocada por el agua de mar. En particular, el bajo módulo de elasticidad en combinación con la tecnología de juntas para la reducción gradual del estrés permite una mayor deflexión de los conductos en los sistemas flotantes de producción en alta mar.

Se han encontrado algunas aplicaciones limitadas para el Ti-6Al-4V en componentes de blindajes, por ejemplo en el Vehículo de Combate de Infantería M2 Bradley y en el carro de combate principal Abrams M1. La principal ventaja sobre los blindajes convencionales de acero es el menor peso de los componentes reduciendo el peso total de los pesados carros de combate.

El Ti-6Al-4V tiene además diversas aplicaciones en campos como la biomedicina, los artículos deportivos y la automoción.

Tradicionalmente el Ti-6Al-4V fue uno de los primeros materiales basados en el titanio usados en biomedicina e incluso hoy día se usa en múltiples aplicaciones. Las propiedades que lo hacen tan deseable son: resistencia a la corrosión, biocompatibilidad, bioadhesión (el crecimiento del hueso), módulo de elasticidad (que debe ser lo más cercano posible al del hueso que está en el rango de 10-

30 GPa), resistencia a la fatiga y buena procesabilidad incluyendo unión y fundición.

En el campo de la automoción el Ti-6Al-4V podría ser empleado en bielas debido a su gran resistencia a la fatiga y adecuada prestación a temperatura.

En los artículos deportivos destaca su uso en la fabricación de cabezas de palos de golf.

4. La tecnología láser.

La propiedad más relevante del láser en su aplicación en el campo de los materiales es la capacidad de concentrar una gran cantidad de energía en un área muy reducida lo que permite una gran precisión en múltiples aplicaciones, reduciendo al mínimo los perjuicios para el material.

En el presente capítulo se pretende dar una visión general de la tecnología láser y las múltiples aplicaciones que tiene la misma.

4.1. Principios fundamentales de tecnología láser.

La palabra LASER es un acrónimo de «*Light Amplification by the Stimulated Emission of Radiation*» (Amplificación de Luz por Emisión Estimulada de Radiación). En 1917 Albert Einstein predijo la existencia de la emisión estimulada, pero no fue hasta 1960 cuando T. H. Maiman produjo por primera vez el fenómeno láser en frecuencias ópticas trabajando con un cristal de rubí. El desarrollo de la tecnología láser y sus aplicaciones a partir de aquel momento, ha sido vertiginoso. Hoy en día, los generadores láser con potencia en el rango del kW trabajan varios turnos en la industria realizando aplicaciones de corte y soldadura, mientras unidades de potencia notablemente inferior son utilizadas en medicina, metrología...

4.1.1. Estadística de Boltzmann.

De acuerdo con resultados que se obtienen en mecánica estadística, cuando una colección de átomos idénticos se encuentra en equilibrio térmico a la temperatura T , el cociente entre los niveles poblacionales (número de átomos) de dos estados del sistema de energías $E_2 > E_1$ se puede expresar por la relación de Boltzmann:

$$\frac{N_2}{N_1} = e^{\frac{-(E_2 - E_1)}{kT}}$$

donde:

N_2 y N_1 = número de átomos en los niveles de energía E_1 y E_2 .

E_1 y E_2 = energía de los átomos en los estados 1 y 2 (J).

T = temperatura absoluta del conjunto de átomos (K).

k = constante de Boltzmann ($1,38066 \cdot 10^{-23}$ J/K).

Teniendo en cuenta las propiedades de la función exponencial, en la imagen siguiente puede apreciarse el rápido crecimiento del número de átomos en cada nivel energético al crecer la energía asociada a los estados.

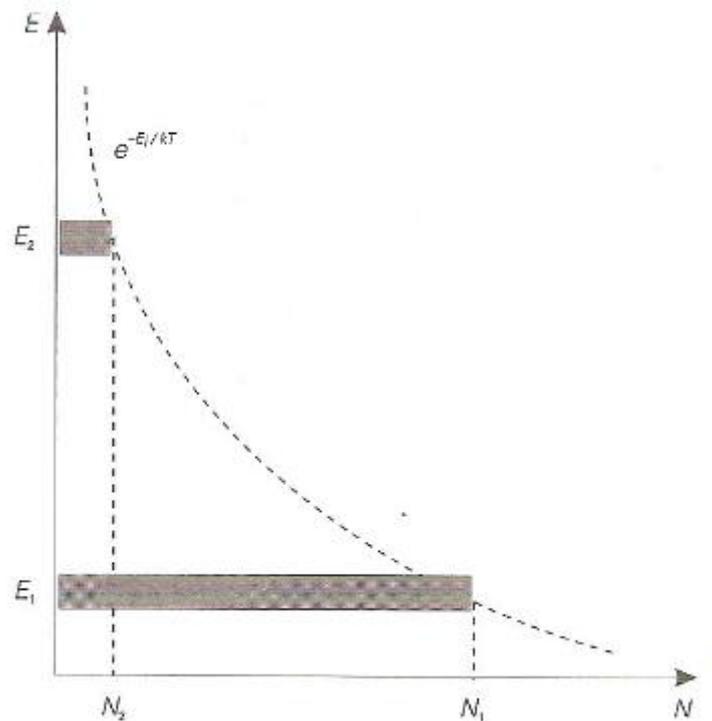


Figura 22: Número de átomos en cada estado energético según la estadística de Boltzmann.

(La tecnología láser. Fundamentos, aplicaciones y tendencias. Miguel Dorronsolo Mendiguren)

4.1.1.1. Interacción entre la radiación y la materia.

4.1.1.1.1. Procesos elementales en la interacción entre la radiación y la materia.

Cuando un átomo o molécula experimenta una transición energética entre dos de sus estados permitidos, bien emite o absorbe un fotón de energía radiante proporcional a la diferencia de energías entre ambos estados.

$$\Delta E = E_2 - E_1 = h \cdot \nu_{12}$$

donde:

E_2, E_1 = energía superior e inferior de la transición (J).

h = constante de Planck ($6,626076 \cdot 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}$).

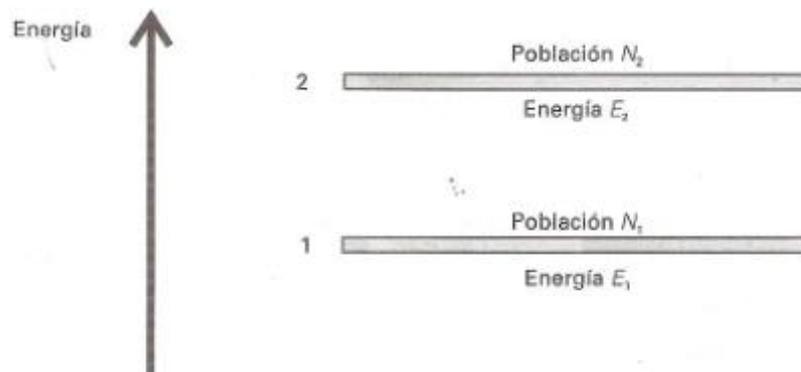
ν_{12} = frecuencia de la onda asociada al fotón emitido (Hz).

Se considerará un sistema formado por un conjunto de átomos y se hará referencia a los niveles energéticos de los mismos. Los cambios de energía de los átomos se deberán a transiciones electrónicas, y se supondrá, por simplicidad, que existen sólo dos niveles de energías E_1 y E_2 . El número de átomos por unidad de volumen en los estados de energía E_2 y E_1 es, respectivamente, N_2 y N_1 .

En este modelo se considerarán los siguientes procesos elementales:

- **Absorción estimulada:** proceso que tiene lugar cuando un átomo, inicialmente en el estado de baja energía, se produce una transición electrónica $E_1 \rightarrow E_2$ por efecto de la absorción de un fotón de energía radiante $E_2 - E_1 = h \cdot \nu_{12}$.
- **Emisión espontánea:** proceso en el cual el átomo, inicialmente en estado excitado, experimenta una transición electrónica $E_2 \rightarrow E_1$, emitiendo un fotón de energía $E_2 - E_1 = h \cdot \nu_{12}$.
- **Emisión estimulada:** proceso en el cual el átomo, inicialmente en el estado excitado, por efecto de un fotón incidente de energía $E_2 - E_1 = h \cdot \nu_{12}$ es forzado a realizar la transición electrónica, emitiendo un segundo fotón idéntico en fase, dirección y estado de polarización al primero. El resultado son dos fotones de la misma energía, viajando en la misma dirección y que superponen sus efectos.

La diferencia fundamental entre emisión espontánea y estimulada reside en el hecho de que en la primera, los átomos, por efecto de las transiciones electrónicas desde niveles excitados, emiten fotones que se superponen de manera incoherente (los fotones son emitidos en direcciones e instantes aleatorios), mientras que en la emisión estimulada los átomos emiten fotones que se suman coherentemente. En este segundo caso, al ir avanzando la onda fotónica en un conjunto de átomos en el estado excitado, se produce un efecto netamente constructivo, al irse añadiendo de forma ordenada nuevos fotones al flujo de fotones que avanza. Es precisamente esta situación la que constituye la base de la amplificación óptica.



*Figura 23: Sistema atómico con dos niveles de energía.
(La tecnología láser. Fundamentos, aplicaciones y tendencias. Miguel Dorronsolo Mendiguren)*

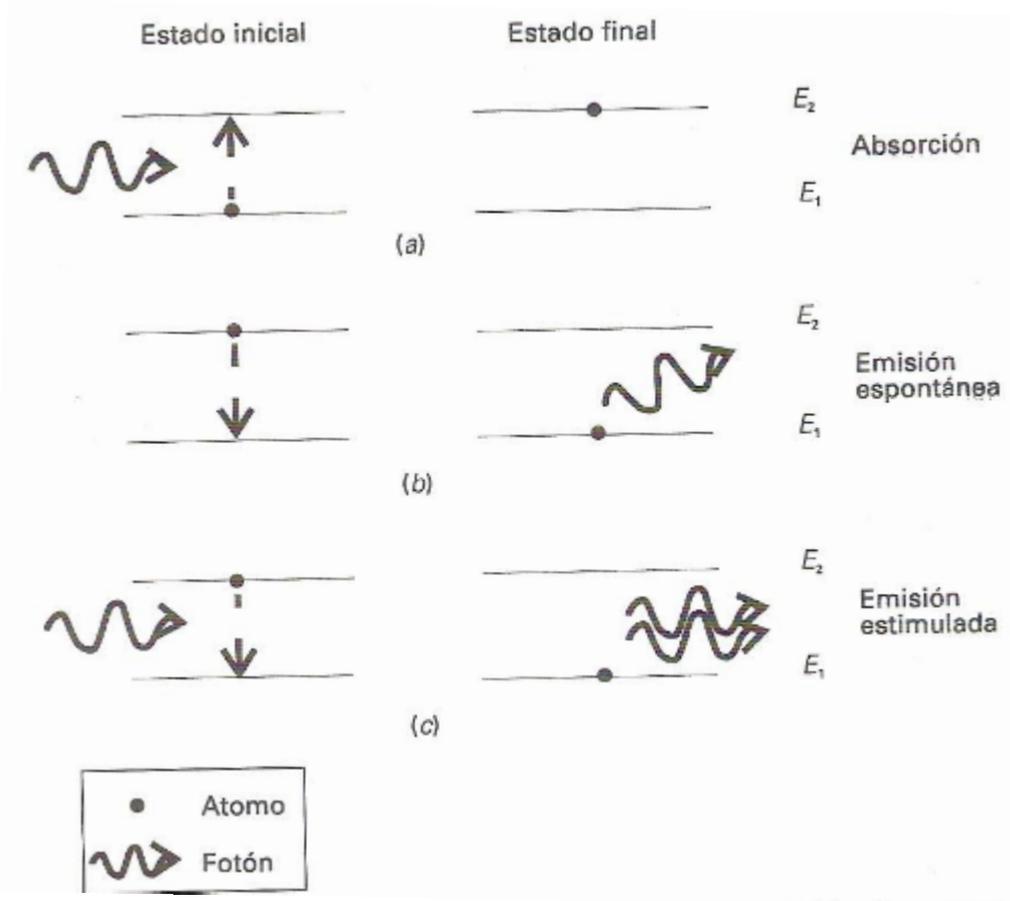


Figura 23: Procesos elementales de absorción y emisión de radiación por la materia.

(La tecnología láser. Fundamentos, aplicaciones y tendencias. Miguel Dorronsolo Mendiguren)

4.1.1.1.2. Las relaciones de Einstein.

Se trata de relaciones entre los parámetros que describen los tres procesos elementales anteriormente citados. En el presente apartado se presentará el razonamiento empleado por Einstein para el cálculo de los mismos.

Las hipótesis de partida son:

1. Se supone un sistema de átomos con dos niveles energéticos (se trata de una simplificación) E_1 y E_2 que se encuentra en equilibrio termodinámico a una determinada temperatura T .
2. El número de átomos por unidad de volumen, o densidad de población, en ambos niveles es N_1 y N_2 , siendo $N_1 + N_2 = N_{total}$ constante.

Como la colección de átomos que consideramos se encuentra en equilibrio termodinámico, dará lugar a una radiación con una distribución igual a la del llamado cuerpo negro. La densidad de energía de la radiación emitida por el cuerpo negro se obtiene mediante la ley de Planck:

$$\rho(\nu) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \frac{h\nu}{e^{h\nu/kT} - 1}$$

donde:

$\rho(\nu)$ = densidad espectral de radiación ($J \cdot s/cm^3$).

ν = frecuencia de la radiación (Hz).

k = constante de Boltzmann.

h = constante de Planck.

c = velocidad de la luz ($3 \cdot 10^8$ m/s).

El equilibrio termodinámico exige que el número de transiciones $E_1 \rightarrow E_2$ sea igual al número de transiciones $E_2 \rightarrow E_1$. A continuación se evaluarán las transiciones debidas a los tres procesos elementales:

➤ **Transiciones $E_1 \rightarrow E_2$**

Absorción: la disminución de la densidad de la población N_1 por unidad de tiempo es proporcional al producto de la misma por la densidad de radiación para la frecuencia ν_{12} (que es a su vez proporcional al número de fotones con frecuencia próxima a ν_{12})

$$\frac{dN_1}{dt} = -B_{12}\rho(\nu_{12})N_1$$

donde:

B_{12} = constante de proporcionalidad ($m^3/J \cdot s^2$).

N_1 = átomos por unidad de volumen en el estado de baja energía E_1 ($1/m^3$).

ν_{12} = frecuencia de la transición (Hz).

➤ **Transiciones $E_2 \rightarrow E_1$**

Emisión espontánea: la disminución de población del nivel de energía superior por efecto de la emisión espontánea es proporcional a la propia densidad de población del nivel 2:

$$\frac{dN_2}{dt} = -A_{21}N_2$$

donde:

A_{21} = constante de proporcionalidad ($1/s$).

Se define el inverso de A_{21} como el tiempo de vida del estado excitado:

$$\frac{1}{A_{21}} = \tau_{21}$$

Emisión estimulada: debido a este fenómeno se produce un decremento de población del nivel superior por unidad de tiempo de acuerdo con la siguiente expresión:

$$\frac{dN_2}{dt} = -B_{21}\rho(\nu_{12})N_2$$

donde:

B_{21} = constante de proporcionalidad ($m^3/J \cdot s^2$).

N_2 = átomos por unidad de volumen en el estado de baja energía E_2 ($1/m^3$).

ν_{12} = frecuencia de la transición (Hz).

En el equilibrio térmico, el número de transiciones $E_2 \rightarrow E_1$ será igual al número de transiciones $E_1 \rightarrow E_2$, con lo que podrá escribirse:

$$\begin{array}{ccc} \textit{Emisiones espontáneas} & \textit{Emisiones estimuladas} & \textit{Absorciones} \\ N_2 A_{21} & + N_2 \rho(\nu_{12}) B_{21} & = N_1 \rho(\nu_{12}) B_{12} \end{array}$$

Utilizando la ecuación de Boltzmann y la ecuación de Planck se obtienen los siguientes resultados:

$$B_{12} = B_{21}$$

$$\frac{A_{21}}{B_{21}} = \frac{8\pi h \nu_{12}^3}{c^3}$$

Estas relaciones se conocen con el nombre de relaciones de Einstein.

Si se analiza la razón del número de transiciones espontáneas al de transiciones inducidas, se tiene que:

$$\frac{\textit{Emisiones espontáneas}}{\textit{Emisiones estimuladas}} = \frac{N_2 A_{21}}{N_2 \rho(\nu_{12}) B_{21}} = \frac{A_{21}}{\rho(\nu_{12}) B_{21}}$$

Teniendo en cuenta la ley de Planck, se obtiene:

$$\frac{A_{21}}{\rho(\nu_{12}) B_{21}} = e^{\frac{h\nu_{12}}{kT}} - 1$$

De las relaciones de Einstein se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Al ser $B_{12} = B_{21}$, para una determinada densidad de radiación incidente sobre el sistema de átomos, las emisiones estimuladas son igual de probables que las absorciones.
- En condiciones de equilibrio termodinámico, el número de emisiones estimuladas es muy poco significativo en comparación con el de emisiones espontáneas

4.1.1.2. *Absorción y amplificación de radiación.*

A continuación se analizará el comportamiento de una onda electromagnética que atraviesa un medio material, en dos situaciones diferentes:

- Medio en equilibrio termodinámico.
- Medio excitado en el cual se ha producido una inversión de población.

4.1.1.2.1. *Absorción en medios materiales.*

Se supone una onda electromagnética colimada (frentes de onda planos) y monocromática (corresponde a un único color).

Considerando que esta onda tiene una sección transversal, unidad, y atraviesa un medio material homogéneo que, para simplificar, se supondrá que es un conjunto de átomos con dos estados de energías $E_2 > E_1$. El cambio de intensidad que experimenta la onda es, en primera aproximación, proporcional a la intensidad incidente y al camino recorrido por la onda dentro del medio material:

$$\Delta I = I(x) - I(0) = -\alpha I(0)\Delta x$$

donde:

I = intensidad de la onda (W/m^2).

Δx = espesor del medio material medido en la dirección de propagación de la onda (m).

α = coeficiente de absorción ($1/m$).

En forma diferencial puede expresarse como:

$$\frac{dI(x)}{dx} = -\alpha I(x)$$

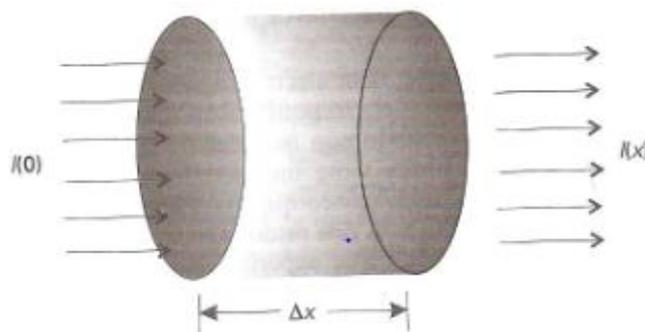


Figura 24: Medio material homogéneo atravesado por una onda electromagnética de intensidad inicial $I(0)$.

(La tecnología láser. Fundamentos, aplicaciones y tendencias. Miguel Dorronsolo Mendiguren)

que integrada queda:

$$I(x) = I(0)e^{-\alpha x}$$

Esta expresión se conoce como ley de Beer. El coeficiente α es una constante positiva conocida como coeficiente de absorción del material. De acuerdo con la expresión anterior, la intensidad de la onda disminuye a medida que avanza por el medio material.

La relación entre el coeficiente de absorción y los parámetros característicos del sistema de átomos viene dada por la siguiente expresión:

$$\alpha = (N_1 - N_2)\beta_{21}h\nu_{21}\frac{n}{c}$$

donde:

α = coeficiente de absorción ($1/m$).

N_1, N_2 = número de átomos por unidad de volumen en los estados 1 y 2 ($1/m^3$).

β_{21} = coeficiente proporcional a la constante de Einstein B_{12} ($m^3/J \cdot s$).

n = índice de refracción del medio; $n = c/v$ siendo v la velocidad de la luz en el medio material y c la velocidad de la luz en el vacío.

Como puede apreciarse, el coeficiente de absorción es proporcional a la diferencia de poblaciones entre el nivel de energía inferior y el superior. Para sistemas en equilibrio termodinámico, al ser $E_2 > E_1$, y teniendo presente la relación de Boltzmann, se tendrá $N_1 > N_2$ y, por tanto, α es positivo. Sin embargo, en caso de que se forzase al sistema a cumplir la condición $N_2 > N_1$, α sería negativo y la evolución de la intensidad de la onda predicha por la ecuación de Beer indica que la intensidad se amplifica a medida que atraviesa el medio. Se tendrá bajo estas circunstancias un medio amplificador óptico.

A los medios amplificadores ópticos se les denomina medios activos. Para estos medios la ecuación de Beer adopta la forma:

$$I = I_0 e^{kx}$$

donde el coeficiente k ($k = -\alpha$) se denomina coeficiente de ganancia para pequeña señal y viene dado por la expresión:

$$k = (N_2 - N_1)\beta_{21}h\nu_{21}\frac{n}{c}$$

El valor k , de acuerdo con la anterior expresión, es proporcional a la inversión de población ($N_2 - N_1$) y a magnitudes específicas del tipo de sistema material utilizado. Por ejemplo, para los láseres de Nd-YAG el valor de k es del orden de $0,05 \frac{1}{cm}$ mientras que para los de CO₂ es del orden de $0,6 \frac{1}{cm}$.

4.1.1.2.2. Inversión de población y amplificación óptica.

La condición $N_2 > N_1$ es una condición de no equilibrio conocida como inversión de población. Para conseguir esta situación habrá que suministrar energía al

medio, excitando los átomos para que ocupen los niveles de energía superior E_2 . Este proceso de excitación se conoce como bombeo del medio activo. El proceso de bombeo rompe la situación de equilibrio térmico, produciendo una inversión de población en el medio y convirtiéndolo en un amplificador óptico.

4.1.1.2.3. Bombeo del medio activo. Esquemas de 3 y 4 niveles.

Existen diversas técnicas para bombear una colección de átomos produciendo una inversión de población. Los tipos de bombeo más comunes corresponden a dos esquemas típicos:

- Esquema de tres niveles.
- Esquema de cuatro niveles.

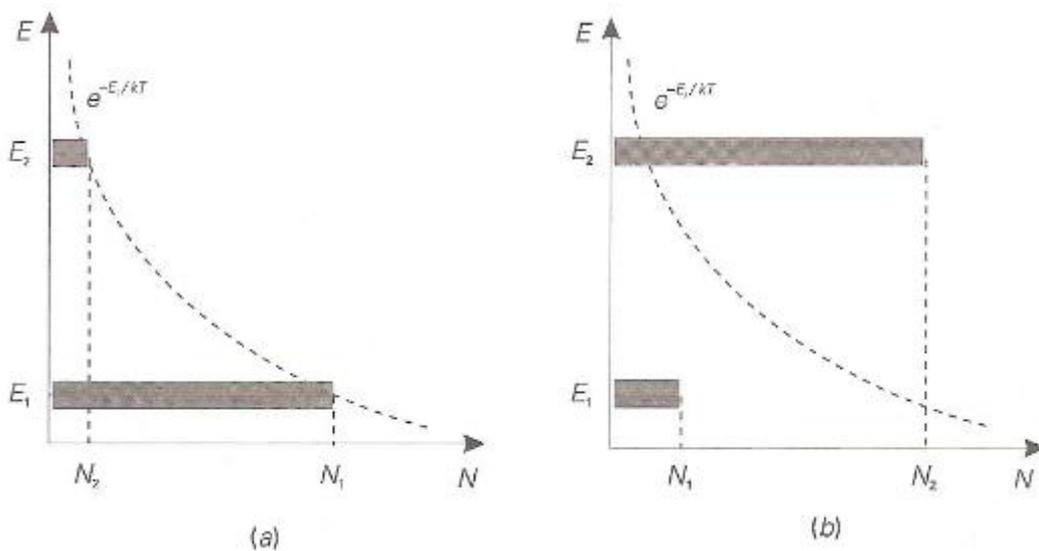


Figura 25: a) Poblaciones en equilibrio termodinámico. b) Inversión de población producida por el bombeo.

(La tecnología láser. Fundamentos, aplicaciones y tendencias. Miguel Dorronsolo Mendiguren)

Inicialmente la distribución de la población de los estados atómicos es la situación de equilibrio predicha por la relación de Boltzmann. Si se ilumina intensamente la colección de átomos puede tener lugar un gran número de transiciones al estado de energía superior E_2 . De ahí decaen al nivel metaestable E_1 que se caracteriza por tener baja probabilidad de transición a estados de menor energía. Con un bombeo suficientemente intenso, un número importante de átomos en el estado base pueden ser bombeados al nivel E_2 . La inversión de población se produce cuando la población de E_1 supera a la del estado fundamental de energía E_0 ($N_1 > N_0$).

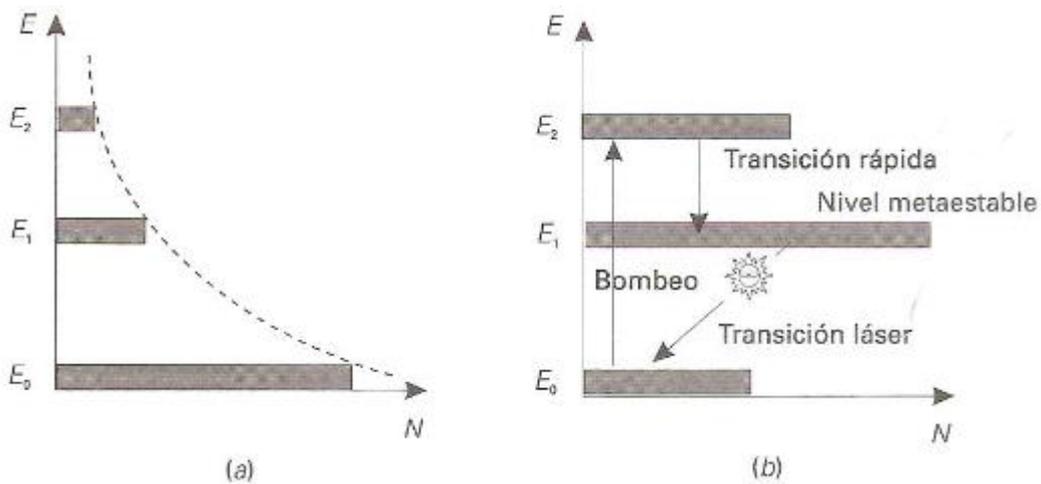


Figura 26: Distribución de población en un sistema de tres niveles. a) Distribución de equilibrio antes del bombeo. b) Distribución después del bombeo.

(La tecnología láser. Fundamentos, aplicaciones y tendencias. Miguel Dorronsolo Mendiguren)

Para conseguir la inversión fácilmente, es necesario que la transición de E_2 a E_1 sea rápida (es decir, que la transición $2 \rightarrow 1$ tenga un tiempo de vida τ_{21} muy corto), y que el estado de energía E_1 sea metaestable (tiempo de vida de la transición $1 \rightarrow 0$ τ_{10} largo). Si se satisfacen estas dos condiciones los átomos en el estado fundamental se bombean rápidamente al estado E_1 , donde tienden a acumularse. La transición rápida de E_2 a E_1 asegura que la cantidad $(N_0 - N_2)$ permanezca grande ($N_2 \approx 0$), y, por tanto, que la transición de bombeo sea altamente absorbente (al ser proporcional a N_0).

Como ejemplo de este tipo de esquemas está el láser de rubí. Los esquemas de tres niveles necesitan de potencias de bombeo altas, porque el estado final de la transición láser es el estado fundamental, debiendo bombearse más de la mitad de los átomos al nivel superior para conseguir la inversión de población.

El esquema de bombeo de cuatro niveles se caracteriza porque reduce significativamente las necesidades de bombeo. La excitación de bombeo lleva los átomos del nivel fundamental hasta el más alto de los cuatro niveles implicados en el proceso. Desde este nivel, los átomos excitados realizan la transición al estado metaestable E_2 , y la población del mismo crece rápidamente. Si los tiempos de vida de las transiciones $3 \rightarrow 2$ τ_{32} y $1 \rightarrow 0$ τ_{10} son cortos, y el de la $2 \rightarrow 1$ τ_{21} es largo, puede conseguirse y mantenerse una inversión de población con solo un bombeo moderado. Las poblaciones de los niveles E_3 y E_1 permanecen esencialmente inalteradas por efecto del bombeo. Sólo un pequeño número de átomos necesita ser añadidos a la población del nivel de energía E_2 para hacer que N_2 sea mayor que N_1 .

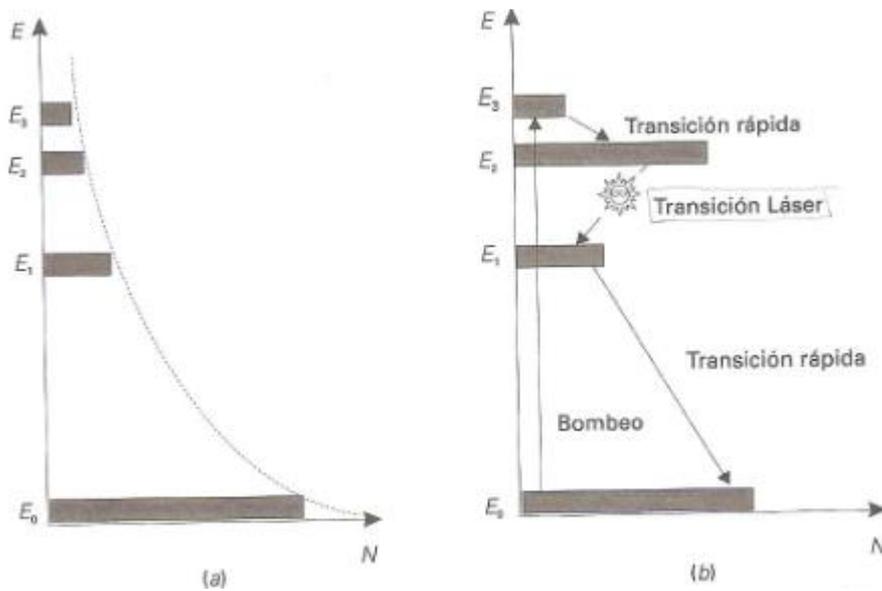


Figura 27: Sistema de cuatro niveles en equilibrio termodinámico a) y con bombeo b).

(La tecnología láser. Fundamentos, aplicaciones y tendencias. Miguel Dorronsolo Mendiguren)

Los métodos de bombeo más comunes son:

- **Bombeo óptico:** la luz emitida por una fuente luminosa de gran potencia es absorbida por el material activo. Este método resulta particularmente adecuado para materiales activos de estado sólido y líquido.
- **Bombeo eléctrico:** el bombeo se produce por una descarga eléctrica suficientemente intensa en el interior del medio activo. Se aplica en láseres de medio activo gaseoso y láseres de semiconductor.

4.1.1.3. El resonador óptico.

Consiste básicamente en un par de espejos enfrentados, en medio de los cuales se coloca el medio activo que produce la amplificación óptica. Estos espejos obligan a la radiación a rebotar entre los mismos, atravesando el medio activo en los sucesivos viajes de uno a otro.

La necesidad de este dispositivo se basa en el hecho de que para la mayor parte de los medios activos los niveles de amplificación óptica por paso (e^{kL} donde L es la longitud del medio activo) son muy bajos, siendo necesario que la radiación atraviese una longitud L grande para conseguir niveles de potencia apreciables. Dos soluciones son posibles para lograrlo:

- Medios activos de gran longitud L : la cual desde un punto de vista práctico no se aplica.
- Realimentación óptica por un resonador óptico en medio del cual se coloca el medio activo: esta solución es la más extendida.

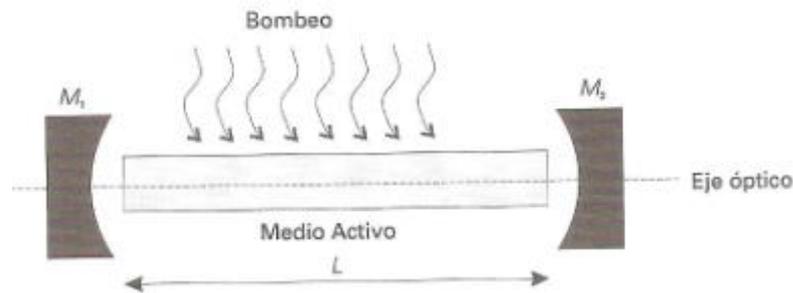


Figura 28: Esquema de un resonador óptico formado por dos espejos esféricos.

(La tecnología láser. Fundamentos, aplicaciones y tendencias. Miguel Dorronsolo Mendiguren)

Normalmente uno de los espejos tiene una reflectancia del 100 %, mientras que el otro la tiene de menor valor, por lo que transmite parcialmente la energía láser. Este es el mecanismo de extracción de la energía láser que rebota entre los espejos de la cavidad.

El estímulo inicial para que se produzca el fenómeno láser proviene de aquellas emisiones espontáneas que coinciden o son próximas al eje óptico del resonador. A partir de ésta, la radiación es amplificada progresivamente por el medio activo en las sucesivas idas y vueltas de un espejo a otro. La situación estacionaria se alcanza cuando la amplificación que experimenta la radiación en un camino completo de ida y vuelta entre espejos, iguala a las pérdidas en el citado recorrido. Se utiliza el término haz láser para denominar a la radiación confinada en el resonador o a la que sale del mismo.

4.1.1.3.1. La condición umbral de oscilación.

La situación estacionaria independiente del tiempo, se alcanza cuando la amplificación iguala a las pérdidas en un recorrido de ida y vuelta entre espejos. En esta situación trabajan los láseres que emiten energía en forma continua. Para los láseres pulsados, la situación es diferente. Los siguientes resultados son aplicables a láseres en funcionamiento continuo.

La condición necesaria para la producción del fenómeno láser es la existencia de una inversión de población, Sin embargo, esta condición no es suficiente, ya que la amplificación óptica producida por el medio activo debe compensar las pérdidas que se producen y mantener un nivel de salida de potencia láser. Es necesario, por tanto, un nivel umbral de ganancia que se pueda relacionar con una inversión de población umbral.

Los diferentes mecanismos que contribuyen a producir pérdidas de intensidad en el haz que viaja a través del sistema, son las siguientes:

1. Transmisión de los espejos.
2. Absorción y dispersión de los espejos.
3. Absorción por el medio activo.

4. Dispersión por inhomogeneidades del medio activo.
5. Pérdidas por difracción en los espejos.

A excepción de la transmisión de los espejos, el resto de pérdidas se asocia a un único coeficiente γ que reduce el coeficiente de ganancia del medio activo al valor $(k - \gamma)$.

Para el cálculo del coeficiente de ganancia umbral se parte de un medio activo de longitud L que llena completamente el espacio intermedio entre los espejos de la cavidad. Los espejos tienen reflectancias (Energía reflejada/Energía incidente) R_1 y R_2 .

El cambio en la intensidad I_0 de una onda al realizar un camino completo de ida y vuelta a través del medio activo es:

$$I_f = I_0 R_1 R_2 e^{2(k-\gamma)L}$$

donde:

I_f, I_0 = intensidad del haz láser al comienzo y al final de un camino completo de ida y vuelta dentro del resonador (W/m^2).

R_1, R_2 = reflectancias de los espejos de la cavidad.

k = coeficiente de ganancia ($1/m$).

γ = coeficiente de pérdidas del medio activo ($1/m$).

L = longitud del medio activo (m).

La ganancia en la intensidad del haz en un camino completo de ida y vuelta es:

$$G = \frac{I_f}{I_0} = R_1 R_2 e^{2(k-\gamma)L}$$

La condición umbral de oscilación se produce cuando $G = 1$, es decir, cuando $I_f = I_0$. En estas condiciones las pérdidas igualan a la amplificación y se produce una situación estacionaria independiente del tiempo. El coeficiente de ganancia umbral es:

$$k_{umbral} = \gamma + \frac{1}{2L} \ln \left(\frac{1}{R_1 R_2} \right)$$

donde:

k_{umbral} = coeficiente de ganancia umbral ($1/m$).

γ = coeficiente de pérdidas intrínsecas del resonador ($1/m$).

$\frac{1}{2L} \ln \left(\frac{1}{R_1 R_2} \right)$ = coeficiente de pérdidas a través de los espejos ($1/m$).

Conviene resaltar que medios activos con un alto coeficiente de ganancia k no siempre son eficientes. La eficiencia de un láser es proporcional al cociente entre su potencia de salida y la potencia de bombeo suministrada. Ciertos láseres como el de CO_2 se caracterizan por poseer alta eficiencia y ganancia, simultáneamente. Por el contrario, otros láseres como el de argón, a pesar de poseer altos coeficientes de ganancia, se caracterizan por su baja eficiencia.

4.1.1.3.2. Cavidades estables e inestables.

Debido a los efectos de la difracción no es posible mantener una radiación colimada entre espejos planos de dimensión finita. En cada choque con los espejos, parte de la radiación se perdería, dando lugar a un factor de pérdidas γ grande. Esto normalmente conduce a la inviabilidad de la producción del efecto láser. En general, el problema de excesivas pérdidas por difracción se supera colocando espejos esféricos cóncavos que concentran la energía radiante hasta el interior de la cavidad, produciendo un estrechamiento conocido como «cintura del haz» (*beam waist* es el término en inglés).

Aplicando consideraciones de trazado de rayos basadas en la óptica geométrica, es posible determinar las combinaciones de espejos esféricos que corresponden a configuraciones de bajas y altas pérdidas por difracción. La línea que une los centros de curvatura se conoce como eje óptico del resonador.

Se supone un rayo viajando en el interior de la cavidad con una pequeña inclinación respecto a la del eje óptico, y se analiza su comportamiento tras sucesivas reflexiones en los espejos. Si después de sucesivos rebotes en los espejos diverge y sale del resonador, se concluye que éste tiene altas pérdidas por lo que se denominará resonador inestable. Si por el contrario el rayo permanece en las proximidades del eje óptico del resonador, el resonador tendrá bajas pérdidas y se denominará resonador estable. La región de estabilidad cumple la siguiente condición:

$$0 < g_1 g_2 < 1$$

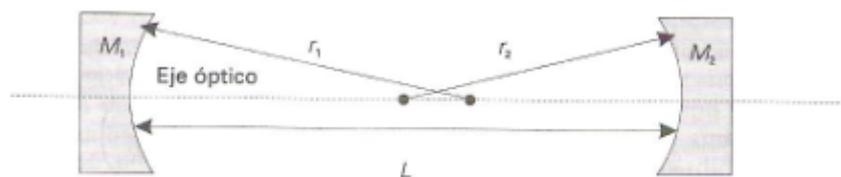


Figura 29: Resonador óptico formado por espejos esféricos. Los radios de curvatura son positivos si los espejos son cóncavos como en la figura. (La tecnología láser. Fundamentos, aplicaciones y tendencias. Miguel Dorronsolo Mendiguren)

donde:

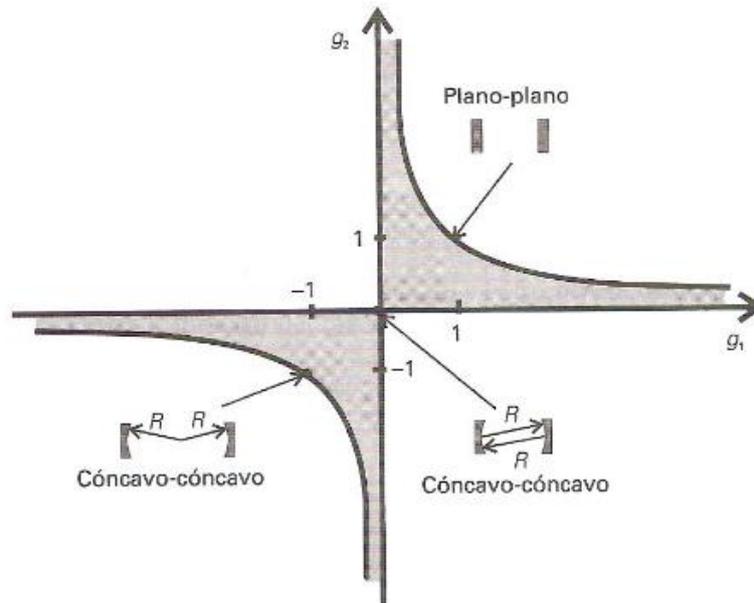
$$g_1 = 1 - \frac{L}{r_1} \quad \text{y} \quad g_2 = 1 - \frac{L}{r_2}$$

donde:

L = distancia entre espejos (m).

r_1, r_2 = radios de curvatura de los espejos (m).

El signo de r_1 y r_2 será positivo cuando ambos espejos sean cóncavos hacia el interior de la cavidad.



*Figura 30: La zona sombreada corresponde a la zona de estabilidad.
(La tecnología láser. Fundamentos, aplicaciones y tendencias. Miguel Dorronsolo Mendiguren)*

La configuración estable de resonador óptico más utilizada es la plano-cóncava, con el espejo cóncavo con gran radio de curvatura. Dos factores son especialmente interesantes en esta cavidad:

- Su relativa facilidad de alineamiento, entendiéndose por alineamiento la colocación de los centros de curvatura de los espejos en el eje de simetría del resonador.
- Su eficiencia de aprovechamiento del medio activo, en el sentido de que una porción razonable del volumen de medio activo es utilizado en el proceso de amplificación.

Con relación a los resonadores inestables, es destacable lo siguiente:

- Son altamente eficientes en la utilización del medio activo, incluso con configuraciones de longitud reducida.
- Llevan asociadas altas pérdidas y sólo podrían utilizarse con medios activos de elevada ganancia (como láser de CO_2).
- En su salida, el haz láser intercepta uno de los espejos de la cavidad. Normalmente tienen forma de corona circular en un plano perpendicular a la dirección de propagación.

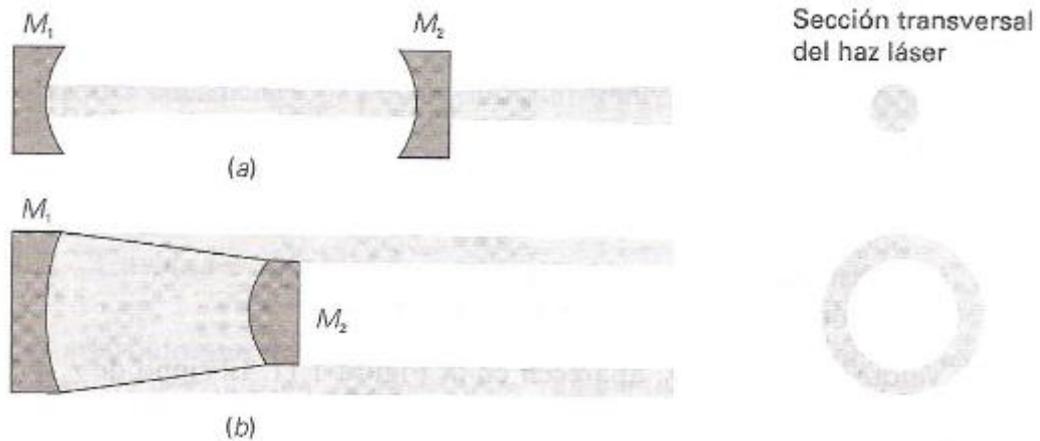


Figura 31: Zonas donde está confinada la energía láser en un resonador estable a) y en uno inestable b).

(La tecnología láser. Fundamentos, aplicaciones y tendencias. Miguel Dorronsolo Mendiguren)

4.1.2. Propiedades de la emisión láser.

La emisión láser presenta una serie de propiedades:

1. **No es perfectamente monocromático**, es decir, la onda no vibra con una única frecuencia, siendo la perfecta monocromaticidad una situación ideal no alcanzable cuando se trabaja con ondas luminosas reales.
2. **Coherencia**: se dice que dos puntos de una onda son coherentes cuando guardan una relación de fase constante, es decir, cuando conocido el valor instantáneo del campo eléctrico en uno de los puntos, es posible reproducir el del otro. Se puede hablar de coherencia temporal y espacial.
 - a) La coherencia temporal está relacionada con la correlación de la fase de la onda en un determinado punto alcanzado por la misma en dos instantes de tiempo diferentes. El elevado índice de coherencia temporal de los generadores láser, es empleado en diversas aplicaciones como medida de distancias, velocidades, vibraciones, etc.

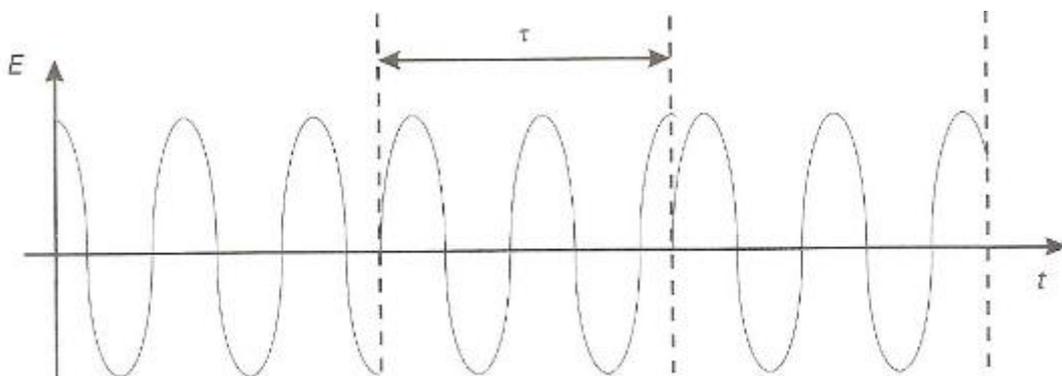


Figura 32: Tiempo de coherencia en una onda.

(La tecnología láser. Fundamentos, aplicaciones y tendencias. Miguel Dorronsolo Mendiguren)

- b) La coherencia espacial hace referencia a una relación de fase definida entre puntos distintos en una sección transversal de un haz luminoso. La coherencia espacial va a influir en la divergencia del haz láser y, por tanto, va a estar relacionada con la direccionalidad. Generalmente la coherencia espacial y la divergencia podrían considerarse inversamente proporcionales. Esta propiedad es muy importante en experimentos de holografía, donde se iluminan objetos de dimensiones apreciables por medio de haces luminosos con coherencia espacial del orden del tamaño del objeto.

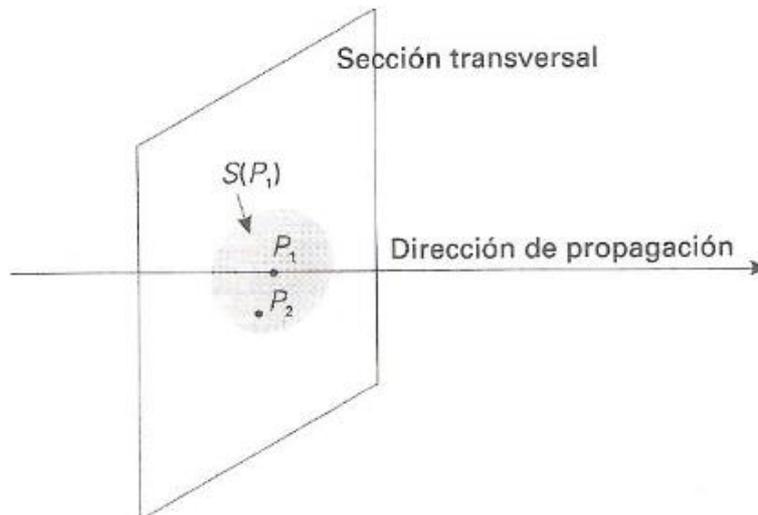
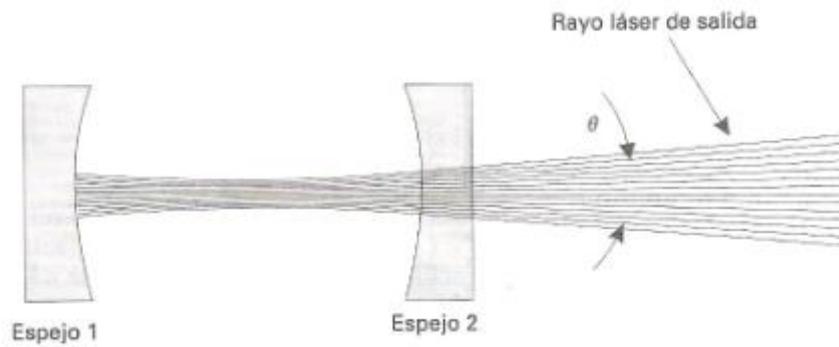


Figura 33: Sección transversal a la dirección de propagación.
 $S(P_1)$ es el área de coherencia en torno a P_1 .

(La tecnología láser. Fundamentos, aplicaciones y tendencias. Miguel Dorronsolo Mendiguren)

3. **Direccionalidad:** quizás la propiedad más llamativa del haz láser. Es consecuencia del hecho de que el medio activo está colocado en una cavidad resonante. Sólo las ondas que viajan a través del eje de la cavidad (o en una dirección muy próxima a la misma) son amplificadas por el medio activo y contribuyen al haz láser de salida. La direccionalidad del haz se expresa en términos del ángulo de divergencia, que es dos veces el ángulo que la envolvente del haz forma con el eje central de éste. La divergencia indica cómo cambia la sección transversal del haz después de ser emitido por el generador láser. La costumbre es especificar el ángulo de divergencia en radianes. Para un láser típico, la divergencia es de 1 milirradián, lo cual significa que el diámetro de su sección transversal aumenta de tamaño en 1 mm por cada metro de viaje. La divergencia de un haz láser es una consecuencia natural del ensanchamiento espacial que experimenta cualquier haz luminoso al propagarse en el espacio.



*Figura 34: Divergencia de un haz láser a la salida de la cavidad óptica.
(La tecnología láser. Fundamentos, aplicaciones y tendencias. Miguel Dorronsolo Mendiguren)*

4. **Dirección de polarización:** hace referencia a la dirección de vibración del campo eléctrico puesto que la radiación láser es una onda electromagnética y, como tal, lleva asociado un determinado valor del campo eléctrico \vec{E} y del magnético \vec{H} , en cada punto del espacio alcanzado por la misma. Ambos vectores son perpendiculares entre sí y perpendiculares a la dirección de propagación. La mayor parte de los láseres producen ondas luminosas caracterizadas por un campo eléctrico \vec{E} cuya dirección de vibración tiene lugar en direcciones concretas bien determinadas. Existen diversas formas de polarización:

- a) Polarización lineal: tiene lugar cuando el campo eléctrico \vec{E} vibra en una dirección constante a lo largo del tiempo. Si consideramos una onda plana polarizada linealmente viajando a lo largo del eje z , al ser \vec{E} perpendicular a la dirección de propagación z , resulta que el vector campo eléctrico sólo tendrá componentes según x e y . Se cumplirá en ese caso:

$$E_x = a_x \cdot \cos(\omega t - kz)$$

$$E_y = a_y \cdot \cos(\omega t - kz)$$

donde:

a_x, a_y = amplitudes de oscilación en las direcciones x e y (V/m).

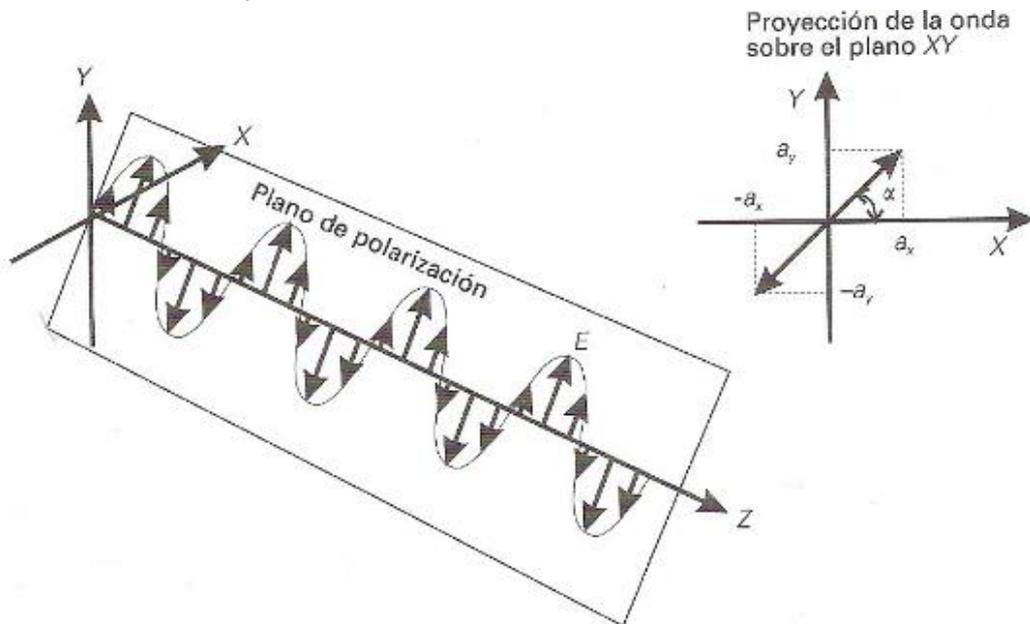


Figura 35: Onda polarizada linealmente. Dirección de vibración del campo eléctrico formando un ángulo α con el eje X.

(La tecnología láser. Fundamentos, aplicaciones y tendencias. Miguel Dorronsolo Mendiguren)

- b) Polarización elíptica (circular): en este caso existe un cierto desfase entre las dos componentes del campo E_x y E_y y el vector campo \vec{E} describe una elipse a lo largo del tiempo para planos $z = \text{constante}$. La expresión de los componentes del campo es:

$$E_x = a_x \cdot \cos(\omega t - kz)$$
$$E_y = a_y \cdot \cos(\omega t - kz + \delta)$$

Un caso de especial importancia se da cuando $a_x = a_y$ y $\delta = \pi/2$. Esta situación se conoce como polarización circular, y tiene una gran importancia en aplicaciones de corte y soldadura por láser de materiales metálicos.

Respecto a los métodos para producir luz polarizada, destacan dos:

- a) Polarización por reflexión: cuando un haz de luz con polarización aleatoria incide sobre la superficie de separación de dos medios, se tiene que su componente perpendicular al plano de incidencia es reflejada en mayor proporción que la componente paralela. La reflectancia de la superficie (cociente entre la intensidad luminosa reflejada y la incidente) es distinta para ambas componentes y depende del ángulo de incidencia. Para un cierto ángulo de incidencia ($\theta = \theta_B$), llamado ángulo de Brewster, la reflectancia de la componente paralela es cero, lo que quiere decir que esta

componente es transmitida íntegramente a través de la superficie de separación de los medios. Esto ocurrirá cuando el haz reflejado y el refractado formen un ángulo de $\pi/2$. El cálculo del ángulo de Brewster se realiza mediante la siguiente ecuación:

$$\theta_B = \arctan\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$$

donde:

n_1, n_2 = índices de refracción del medio 1 y 2.

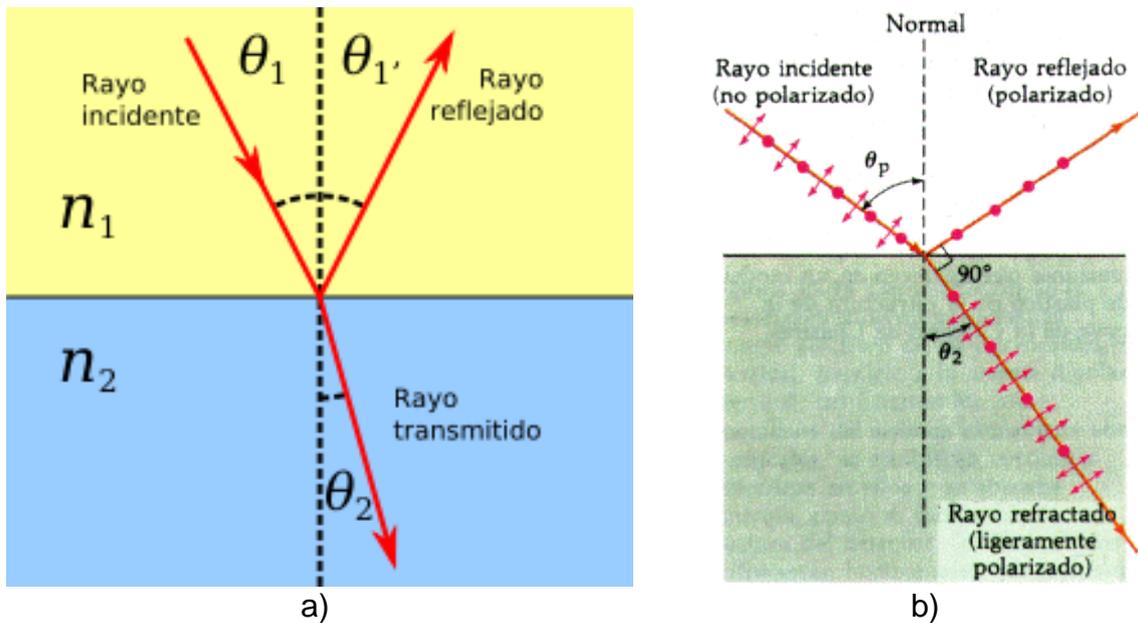


Figura 36: Reflexión y refracción en la superficie de separación de dos medios de índices $n_1 < n_2$ a) y la situación cuando la incidencia es en el ángulo de Brewster b).

(La tecnología láser. Fundamentos, aplicaciones y tendencias. Miguel Dorronsolo Mendiguren)

b) Polarización por absorción: se puede producir una onda polarizada por medio de la absorción selectiva de una de las componentes de la luz polarizada aleatoriamente. Esto se lleva a cabo haciendo que el haz luminoso atraviese ciertas sustancias como las turmalinas o las láminas polaroid. La radiación de salida de la mayor parte de los láseres es linealmente polarizada. Generalmente esto se consigue colocando superficies en ángulo de Brewster en la cavidad óptica:

- En los láseres cuyo medio activo es una barra de cristal, se tallan sus extremos de acuerdo con dicho ángulo.
- En los láseres de gas, el tubo donde se produce el efecto láser es sellado por ventanas colocadas en la adecuada inclinación.

En ambos casos, la superficie colocada en ángulo de Brewster garantiza que la componente del plano paralela al plano de incidencia, se transmita fuera del medio activo hacia los espejos de la cavidad, y de vuelta hacia el medio activo, sin prácticamente ninguna pérdida. Sin embargo, para la componente ortogonal se produce una gran atenuación, impidiendo su oscilación en la cavidad. Como resultado de esta situación, sólo la componente del campo contenida en el plano de incidencia, contribuye al haz láser de salida, y éste será linealmente polarizado.

La polarización del haz láser es una propiedad de gran importancia en aplicaciones como por ejemplo el corte de materiales metálicos con láser.

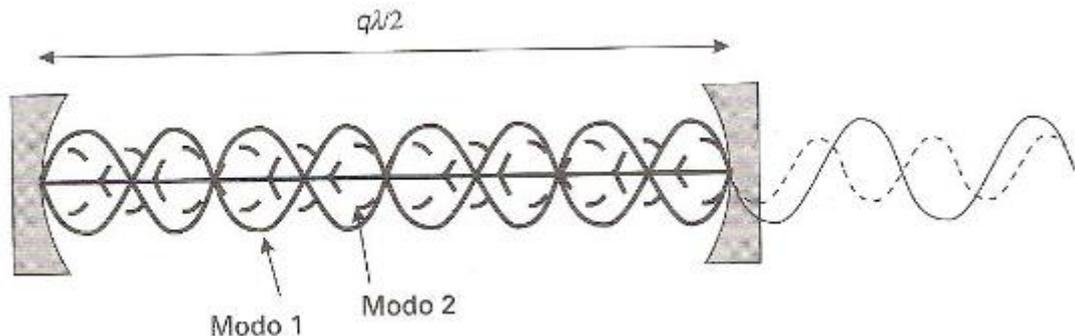
5. **Modos en cavidades resonantes:** se definen como modos de una cavidad óptica, todas aquellas distribuciones estacionarias del campo electromagnético que cumplen las ecuaciones de Maxwell y las ecuaciones de contorno de la cavidad. Un resonador óptico común permite la oscilación de diversos modos TEM (TEM significa que \vec{E} y \vec{H} son perpendiculares a la dirección de propagación, si bien existen técnicas para seleccionarlos). Los modos más comunes son dos:
- a) Modo longitudinal: hace referencia al comportamiento axial del modo y a la condición que debe verificar para ser una onda estacionaria de la cavidad. El modo longitudinal va a influir en la monocromaticidad y la longitud de coherencia de la emisión del láser.
 - b) Modo transversal: hace referencia a la distribución de campo en una sección transversal a la de propagación del modo. El modo transversal va a influir en el diámetro del haz a la salida del generador, su divergencia, y la distribución de intensidad en una sección transversal.

Los modos de una cavidad resonante se designan con la notación TEM_{mnq} , donde TEM significa que \vec{E} y \vec{H} son perpendiculares a la dirección de propagación de la onda, y (m, n, q) son los índices correspondientes al modo transversal y al longitudinal. El valor de m y n para las situaciones prácticas, es pequeño, mientras que el valor de q es muy grande ($\approx 10^6$) y se omite normalmente. Es común que la notación se transforme en TEM_{mn} . Sin embargo, conviene resaltar que a pesar de esta omisión, los modos tienen un determinado carácter longitudinal dado por un valor concreto de q.

Sólo los modos que superan la ganancia umbral de oscilación (1,2) contribuyen a la salida láser.

Las condiciones que deben cumplir los modos en la cavidad son:

- a) El cambio de fase total de la onda, al realizar un camino completo de ida y vuelta debe ser $2\pi q$, siendo q un número entero. Esta condición es equivalente a afirmar que la onda debe ser una onda estacionaria.



*Figura 37: Dos modos longitudinales en una cavidad estable.
(La tecnología láser. Fundamentos, aplicaciones y tendencias. Miguel Dorronsolo Mendiguren)*

- b) La distribución de campo en una sección transversal de la cavidad debe reproducirse a sí misma después de un camino completo de ida y vuelta.

El modo TEM_{00} , también conocido como gaussiano se caracteriza porque:

- Posee un elevado grado de coherencia espacial.
- Es el modo de sección transversal más reducida.
- Presenta divergencia inferior a los modos de orden superior.
- Al ser focalizado por una lente, produce una mayor concentración de la energía (tamaño del punto de focalización más pequeño).
- Presenta una distribución gaussiana de intensidad en las secciones transversales a la dirección de propagación de acuerdo con la expresión:

$$I = I_0 e^{\frac{-2r^2}{w^2}}$$

Si P es la potencia total transmitida por el haz, se tiene:

$$I = \frac{2P}{\pi w^2} e^{\frac{-2r^2}{w^2}}$$

donde:

I = intensidad del haz (W/m^2).

w = radio del modo o distancia radial para la cual la intensidad cae a I_0/e^2 (m).

P = potencia del haz (W).

r = distancia radial al eje del haz (m).

En gran cantidad de situaciones, la salida TEM_{00} es la más adecuada para la aplicación que se desea abordar. Algunas de las razones para ello son:

- Las aplicaciones basadas en los fenómenos de la interferencia de la luz, como por ejemplo la holografía, requieren un alto grado de coherencia espacial.
- En aplicaciones que requieren la propagación de un haz luminoso sobre grandes distancias, como es el caso de los telémetros, se requieren haces de muy baja divergencia.
- Existen aplicaciones donde se hace uso de puntos de focalización muy pequeños, como es el caso del taladrado.

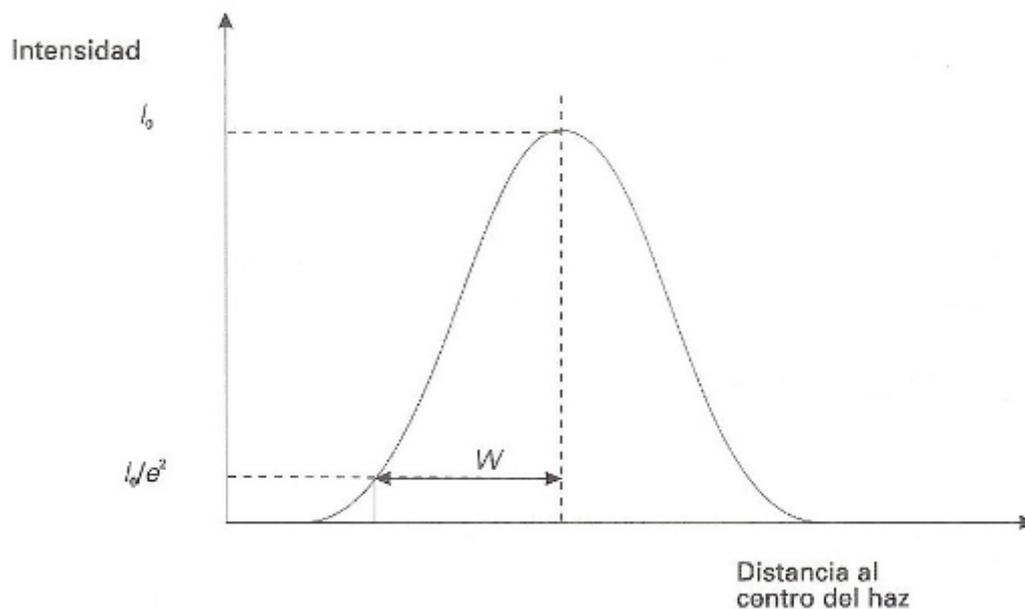


Figura 38: Perfil de intensidad de un modo TEM₀₀.

(La tecnología láser. Fundamentos, aplicaciones y tendencias. Miguel Dorronsolo Mendiguren)

Si no se toma ningún tipo de precaución, la salida de un generador láser puede estar formada por varios modos transversales y longitudinales. Interesa para ciertas aplicaciones que el modo de salida sea TEM₀₀ puro. Para ello se aplican procedimientos de selección del modo TEM₀₀ frente a modos de orden superior, normalmente introduciendo pérdidas selectivas dentro de la cavidad. Los modos de orden superior se caracterizan por dimensiones transversales mayores a las del modo fundamental. La introducción de un diafragma ajustable, centrado en el eje óptico de la cavidad, permite incrementar las pérdidas de los modos de orden superior frente a las del fundamental, consiguiendo de esta manera la selección del mismo.

El perfil Top-hat es un caso particular del modo TEM₀₀ que posee una densidad de energía casi uniforme y una forma cilíndrica. Se forma normalmente empleando elementos ópticos difractivos sobre un haz gaussiano. Los perfiles Top-hat son empleados habitualmente en la industria, por ejemplo, en la perforación láser de agujeros para circuitos impresos. Son

también usados en sistemas láser de muy alta potencia, que usan series de amplificadores ópticos para producir un intenso haz.

4.1.3. Tipos de láser.

Cualquier tipo de láser consta normalmente de tres elementos:

1. **Medio activo:** colección de átomos o moléculas que son excitados hasta producirse una inversión de población. Se trata de un amplificador óptico: un haz de luz coherente que entra por uno de sus extremos, se amplifica por medio de la emisión estimulada, resultando a su salida, un haz coherente de más intensidad. Puede ser un gas, un líquido, un sólido o una unión P-N en un semiconductor.
2. **Mecanismo de excitación:** fuente de energía, que excita o bombea los átomos (o moléculas del medio activo), desde estados de baja energía a estados excitados, para crear la inversión de la población. En los láseres de gas y en los de semiconductor, la excitación es de tipo eléctrico, mientras que en los láseres de estado sólido y en los de líquido, el bombeo suele ser de tipo óptico mediante lámpara de flash u otros láseres.
3. **Resonador óptico:** consiste generalmente en un par de espejos colocados a ambos extremos del medio activo, su misión es hacer rebotar adelante y atrás la radiación a través del medio activo, dejando salir únicamente un porcentaje de la energía presente en el interior del mismo. Esto último se consigue generalmente haciendo que uno de los espejos de la cavidad sea parcialmente transparente.

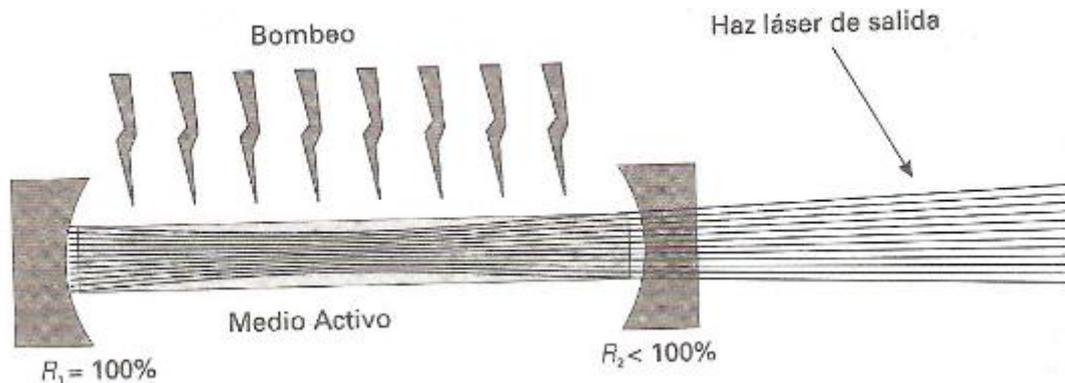


Figura 39: Elementos fundamentales de un generador láser.

(La tecnología láser. Fundamentos, aplicaciones y tendencias. Miguel Dorronsolo Mendiguren)

El generador láser es un dispositivo conversor de distintos tipos de energía (eléctrica, luminosa...) en energía luminosa en forma de haz láser de salida. Para evaluar esta conversión se emplean los siguientes coeficientes de eficiencia:

- El **coeficiente de eficiencia cuántica** (η_c), definido como el cociente entre la energía láser producida por el sistema y la energía suministrada al sistema en forma de bombeo, en las condiciones más eficientes de producción de energía láser en el medio activo.

$$\eta_c = \frac{\text{Energía láser producida por el sistema}}{\text{Energía suministrada al sistema en forma de bombeo}}$$

- El **coeficiente de eficiencia cuántica de bombeo** (η_b) como la fracción de átomos que una vez excitados a una determinada banda, realizan transiciones al nivel superior de la transición láser.
- El **rendimiento electroóptico** (η_{eo}), definido como el cociente entre la potencia láser de salida y la potencia en la descarga eléctrica. Los valores de η_{eo} son inferiores al factor de eficiencia $\eta_c \eta_b$, ya que tiene en cuenta todos los mecanismos de pérdida de energía que tienen lugar en el proceso de generación de la energía láser.

$$\eta_{eo} = \frac{\text{Potencia láser de salida}}{\text{Potencia en la descarga eléctrica}}$$

- El **coeficiente de rendimiento global** (η_{global}), definido como el cociente entre la potencia láser de salida y la potencia total consumida por el generador.

$$\eta_{global} = \frac{\text{Potencia láser de salida}}{\text{Potencia total consumida por el generador}}$$

La conversión a energía láser de otros tipos de energía (eléctrica, óptica...) es un proceso poco eficiente. La energía no convertida en fenómeno láser se transforma en calor que habrá que disipar. Común a todos los generadores láser es, por tanto, la necesidad de algún tipo de dispositivo disipador de calor.

A continuación se presenta una clasificación de los láseres a medida que aumenta la longitud de onda:

λ (μm)	Zona del espectro	Tipo de láser	Medio activo	Potencia (W)
0,03 – 0,39	Ultravioleta (UV)	Excímero	Gas de excímeros	≈ 100
0,39 – 0,455	Violeta (visible)	Colorante	Colorante orgánico	≈ 1
0,455 – 0,492	Azul (visible)	Colorante	Colorante orgánico	≈ 1
0,492 – 0,577	Verde (visible)	Colorante	Colorante orgánico	≈ 1
0,577 – 0,597	Amarillo (visible)	Colorante	Colorante orgánico	≈ 1
0,597 – 0,622	Naranja (visible)	Colorante	Colorante orgánico	≈ 1
0,622 – 0,780	Rojo (Visible)	He-Ne Diodo Colorante	Mezcla gaseosa: He y Ne Colorante orgánico	0,0001 – 0,05 0,0005 – 0,05 ≈ 1
0,780 – 3000	Infrarrojo (IR)	CO ₂ Nd-YAG Diodo	Mezcla gaseosa: CO ₂ , N ₂ , He Cristal YAG con impurezas Nd ³⁺ Unión P-N de un semiconductor	1 – 15000 1 – 2000 0,0005 – 0,05

Tabla 13: Clasificación de los láseres en función de su longitud de onda. (La tecnología láser. Fundamentos, aplicaciones y tendencias. Miguel Dorransolo Mendiguren)

4.1.3.1. Láseres de medio activo gaseoso.

El medio activo es una mezcla gaseosa que se excita mediante una descarga eléctrica. Dentro de este grupo destacan por su gran variedad de aplicaciones el láser de He-Ne y el láser de CO₂.

4.1.3.1.1. El láser de He-Ne.

Las especificaciones más usuales son las siguientes:

λ	633 nm
Medio activo	Mezcla gaseosa de helio y neón.
Potencia	0,1 – 50 mW
η_{eo}	$\leq 0,1 \%$

Tabla 14: Especificaciones más usuales de los láseres de He-Ne. (La tecnología láser. Fundamentos, aplicaciones y tendencias. Miguel Dorransolo Mendiguren)

En el láser de He-Ne, el medio activo es una mezcla gaseosa formada por 10 partes de helio y 1 parte de neón. El neón proporciona los niveles energéticos entre los que tendrá lugar la transición láser. El helio no está involucrado directamente en la transición láser, su tarea es garantizar una eficiente transición de la energía de bombeo a los estados excitados del neón. El proceso de

bombeo del medio activo tiene lugar al hacer pasar una corriente continua a través de la mezcla gaseosa colocada en un tubo de vidrio. Para ello se necesita un alto voltaje ($2 - 4 \text{ kV}$) y que la mezcla se encuentre a una presión del orden de 10 torr .

Los láseres de He-Ne tienen gran diversidad de aplicaciones:

- Lectura de código de barras.
- Operaciones de alineamiento en ingeniería y construcción civil.
- Control de calidad dimensional junto con visión artificial, detección superficial de grietas y medida de la rugosidad superficial.
- Medida de desplazamientos por procedimientos interferométricos.
- Obtención y reproducción de hologramas.

4.1.3.1.2. El láser de CO_2 .

El láser de CO_2 ocupa el liderazgo en aplicaciones industriales. Ofrece a la vez alta potencia y eficiencia para longitudes de onda infrarrojas, pudiendo ser utilizado en gran diversidad de aplicaciones: corte, soldadura y tratamientos térmicos de metales, aplicaciones en medicina...

λ	$10,6 \mu\text{m}$
Medio activo	Mezcla de aproximadamente un 10 % de CO_2 , 40 % de N_2 y 50 % de He.
Potencia	Desde unos pocos vatios hasta 15 kW.
η_{eo}	$\approx 15 \%$

Tabla 15: Especificaciones más usuales de los láseres de CO_2 .
(La tecnología láser. Fundamentos, aplicaciones y tendencias. Miguel Dorronsolo Mendiguren)

Los láseres de anhídrido carbónico son capaces de producir grandes cantidades de energía debido a la alta eficiencia de la transición de $10,6 \mu\text{m}$. Un sistema bien construido puede alcanzar una eficiencia de un 30 % (la eficiencia del láser de He-Ne es de aproximadamente un 0,02 %).

Una diferencia importante entre el láser de CO_2 y otros láseres radica en el tipo de ópticas que utiliza. En el caso del CO_2 , la óptica debe estar hecha de materiales específicos que reflejen o sean transparentes a la radiación infrarroja. Materiales típicos que se utilizan son el germanio (Ge), el seleniuro de zinc (ZnSe) y el arseniuro de galio (GaAs). Estos materiales son transparentes para la longitud de onda de $10,6 \mu\text{m}$, una región del espectro electromagnético en la que la mayoría de los materiales, incluyendo el vidrio convencional, son opacos.

En el láser de CO_2 , el medio activo se excita mediante una descarga eléctrica. El rendimiento electroóptico (η_{eo}) es típicamente del 10 – 15 %. El resto de la potencia eléctrica se disipa en forma de calor, aumentando la temperatura de la mezcla gaseosa.

Para obtener una ganancia máxima, la temperatura óptima de la mezcla gaseosa debe ser aproximadamente 150 – 200 °C. Para mantener la mezcla a esta temperatura es necesario refrigerarla, distinguiéndose dos tipos de mecanismos de refrigeración:

- Refrigeración por conducción, típica de láseres de baja potencia.
- Refrigeración por convección, típica de láseres de alta potencia.

Se distinguirá entre láseres de baja potencia, con potencia de salida hasta 200 W, y láseres de alta potencia para potencias superiores a dicho valor.

Las aplicaciones de los láseres de baja potencia suelen ser en el campo industrial, científico y médico. Algunos ejemplos son el marcado, el soldeo de componentes electrónicos, corte de tejidos y materiales orgánicos y aplicaciones en cirugía.

Las aplicaciones de los láseres de alta potencia tienen sus aplicaciones principales en el campo del procesamiento de materiales: corte, soldadura, tratamientos térmicos superficiales, taladrado, marcado...

4.1.3.2. Láseres de estado sólido.

El medio activo es un cristal dopado, es decir, un cristal con iones de impurezas. Son láseres robustos, de fácil mantenimiento y capaces de generar pulsos muy intensos. Por su relevancia en aplicaciones industriales se hará hincapié en el tipo Nd-YAG.

4.1.3.2.1. El láser de Nd-YAG.

Las especificaciones más usuales son las siguientes:

λ	1,06 μm
Medio activo	Cristal de YAG dopado con Nd^{3+} .
Potencia	Desde unos pocos vatios hasta 2000 vatios.
η_{global}	$\approx 15 \%$

Tabla 16: Especificaciones más usuales de los láseres de Nd-YAG.
(La tecnología láser. Fundamentos, aplicaciones y tendencias. Miguel Dorronsolo Mendiguren)

El medio activo es una barra de cristal de granate de itrio y aluminio ($\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$), conocido comúnmente como YAG, dopado aproximadamente con un 1 % de ión Nd^{3+} . El ión Nd^{3+} se distribuye aleatoriamente como impureza de sustitución en lugares ocupados por el ión Y^{3+} , proporcionando los niveles de energía tanto del bombeo como de la transición láser.

El bombeo del medio activo es de tipo óptico por medio de lámparas de flash (típicamente de Xe o Kr). La forma de las lámparas puede ser helicoidal o cilíndrica, y están colocadas paralelamente a la barra de medio activo. En el caso

de lámparas cilíndricas, es necesario usar espejos elípticos para recoger la totalidad de la energía que sale del tubo de flash.

Respecto a la cavidad óptica, la configuración más común es la barra de material activo colocada entre dos espejos exteriores, uno de los cuales tiene una transmitancia del 10 %. Es importante evitar las reflexiones parásitas entre cada espejo y el extremo inmediato de la barra de material activo. Para ello se realizan tratamientos antirreflejantes en ambos extremos de la barra de material activo.

El disparo de la lámpara de flash se produce por la descarga de una batería de condensadores. Para romper la alta impedancia inicial del gas de la lámpara, se utiliza un pulso de alto voltaje ($\approx 20 \text{ kV}$) producido por una fuente externa de pulsos.

La salida es generalmente pulsada.

Respecto al consumo, típicamente un láser pulsado de 550 W de potencia media de salida, consume una potencia aparente de 22 kVA y una potencia activa de 18 kW .

Un aspecto importante a tener presente con este tipo de generadores es el hecho de que el haz láser que producen, puede ser transmitido por fibra óptica de SiO_2 . Esto va a permitir el uso de sistemas de transmisión del haz láser de gran flexibilidad, que facilitarán la integración de estos generadores con manipuladores como robots o mesas X-Y.

Los láseres de Nd-YAG tienen diversidad de aplicaciones en el procesado de materiales: corte, soldadura, taladrado, marcado, etc. También son de relevancia sus aplicaciones científicas (fusión nuclear, medida de contaminantes...) y en medicina.

4.1.3.3. Láseres de semiconductor.

Las especificaciones más usuales son las siguientes:

λ	0,63 – 1,58 μm
Medio activo	Unión P-N de un semiconductor fuertemente dopado.
Potencia	0,5 – 2000 mW
η_{global}	5 – 50 %

Tabla 17: Especificaciones más usuales de los láseres de semiconductor. (La tecnología láser. Fundamentos, aplicaciones y tendencias. Miguel Dorransolo Mendiguren)

Los láseres de semiconductor son los más pequeños existentes y pueden ser producidos en gran escala. Gracias a su eficiencia y pequeño tamaño, son especialmente adecuados como fuentes luminosas para comunicaciones con fibra óptica.

El medio activo más simple está constituido por un diodo (unión P-N) con elevada concentración de impurezas donadoras en la zona N y aceptadoras en la zona P, y en el cual el material base es el mismo para ambas zonas (por ejemplo GaAs o InP). Se conoce con el nombre de homounión.

Normalmente los diodos láser comerciales son del tipo de heterounión, es decir, formados por la unión de dos materiales distintos (por ejemplo GaAs y $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$). Este tipo de estructuras presenta ciertas ventajas respecto a la homounión:

- Mayor ganancia óptica por unidad de volumen.
- La radiación láser queda confinada en la región donde se produce la ganancia óptica, produciéndose un efecto de guía de onda por diferencia de índices de refracción.

Con la presente tecnología de diodos láser, son habituales umbrales de densidad de corriente del orden de 50 A/cm^2 con $\eta_{global} \approx 50 \%$. Las potencias máximas obtenidas son cercanas a los 2000 mW .

Las aplicaciones de diodos láser son muy variadas, pero destacan sobre todo aquellas en el campo de las comunicaciones por fibra óptica. Debido a la gran velocidad con la que pueden encenderse y apagarse, y a la monocromaticidad de su emisión, son candidatos idóneos para comunicaciones por fibra óptica de alta velocidad. En este campo se utilizan diodos con λ próxima a 1300 y a 1550 nm , que corresponden a una frecuencia del orden de $2 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$. Esta frecuencia de onda portadora permite una gran cantidad de señales moduladoras. Usando fibras monomodo (a través de las mismas puede propagarse un único modo) se consiguen habitualmente velocidades de transmisión del orden de $2,4 \cdot 10^9 \text{ bit/s}$ sobre distancias de 100 km . En esta situación una sola fibra óptica puede transmitir 37.500 conversaciones telefónicas.

Otras aplicaciones de interés son el reconocimiento dimensional, la lectura del código de barras, lectura de «compact disc», impresoras de escritorio, sistemas de apunte, aplicaciones médicas en dermatología, etc.

4.1.3.4. Láseres de colorante.

Las especificaciones más usuales son las siguientes:

λ	400 – 900 nm
Medio activo	Colorante líquido.
Potencia	Máximo del orden de 1 W.
$\eta = \frac{\text{Potencia láser de salida}}{\text{Potencia óptica de bombeo}}$	20 – 40 %

Tabla 18: Especificaciones más usuales de los láseres de colorante.
(La tecnología láser. Fundamentos, aplicaciones y tendencias. Miguel Dorransolo Mendiguren)

El medio activo es una disolución de ciertos tintes orgánicos en líquidos como alcohol etílico, alcohol metílico o agua. La principal propiedad de los mismos, además de su simplicidad, es la posibilidad de sintonizarlos en un amplio rango de frecuencias.

Cuando un colorante es excitado por una fuente externa de longitud de onda corta, emite posteriormente radiación en una banda de longitud de onda más larga (fenómeno de fluorescencia). La diferencia entre la energía absorbida y la emitida por el colorante se traduce en calor.

Se han ensayado una gran cantidad de colorantes como medios activos. Solapando la acción de varios de ellos se puede barrer completamente el espectro visible. Entre los colorantes más utilizados destaca la Rodamina 6G con metanol como disolvente. La eficiencia $\left(\eta = \frac{\text{Potencia láser de salida}}{\text{Potencia óptica de bombeo}}\right)$ de esta sustancia es del orden del 20 % y permite obtener emisiones láser en el rango espectral comprendido entre 570-660 nm.

El bombeo de estos láseres es de tipo óptico. Para esta operación se requiere una fuente luminosa que tenga una longitud de onda cercana al pico de absorción del colorante. Los métodos más corrientes de bombeo son:

- Lámpara de flash, de forma muy parecida al bombeo en los láseres de estado sólido (Nd-YAG).
- Láser de nitrógeno para emisiones comprendidas entre 350 y 680 nm.
- Láser de argón para emisiones con longitud de onda mayor que 560 nm.

Gracias a la elevada ganancia de los láseres de colorante ($\approx 10^3 \text{ cm}^{-1}$), solamente una pequeña cantidad de medio activo es necesaria para conseguir niveles apreciables de amplificación óptica. Sin embargo, la intensa absorción, con los efectos asociados de calentamiento que produce, junto con la degeneración del medio hacen necesario un continuo y rápido cambio del medio activo. Por esta razón se hace fluir el colorante a través de la luz de bombeo.

Una de las características más destacables de los láseres de colorante es la posibilidad de sintonizar la salida en un amplio rango espectral. La selección de la longitud de onda de emisión puede realizarse mediante diferentes dispositivos como un prisma, una red de difracción o un interferómetro Fabry-Perot.

Estos láseres encuentran aplicaciones en espectroscopia, disociación molecular, separación de isótopos y reacciones químicas. También están siendo utilizados con éxito en aplicaciones médicas (rotura de cálculos de riñón).

4.1.3.5. Láseres de excímeros.

Las especificaciones más usuales son las siguientes:

λ	193 – 351 nm
Medio activo	Gas de excímeros.
Potencia	100 W
η_{eo}	2 %

Tabla 19: Especificaciones más usuales de los láseres de excímeros. (La tecnología láser. Fundamentos, aplicaciones y tendencias. Miguel Dorronsolo Mendiguren)

El primer láser de excímeros fue construido en 1975.

Los láseres de excímeros tienen medio activo gaseoso y funcionamiento pulsado, emitiendo energía luminosa en el ultravioleta. La longitud de onda de la radiación emitida depende del tipo de componentes gaseosos utilizados.

	F	Cl
Ar	193 nm	—
Kr	248 nm	222 nm
Xe	351/353 nm	308 nm

Tabla 20: Longitudes de onda más frecuentes para las diversas opciones de compuestos gaseosos.

(La tecnología láser. Fundamentos, aplicaciones y tendencias. Miguel Dorronsolo Mendiguren)

Los láseres excímeros presentan las siguientes propiedades:

- La corriente de descarga debe ser bombeada con una elevada velocidad (valores típicos de 10^{12} A/s).
- La ganancia es muy elevada.
- La salida es normalmente multimodo y pulsada, con pulsos de muy corta duración (10 – 40 ns). Esto va a traer como consecuencia que las coherencias espacial y temporal del haz de salida van a ser muy bajas comparadas con otros tipos de generadores láser.

La última característica determina que los láseres de excímero sean especialmente adecuados para aplicaciones donde se necesite una iluminación uniforme y exenta de efectos de difracción remarcables (por ejemplo en aplicaciones de fotolitografía).

Respecto a la interacción de la radiación de estos láseres con la materia, son importantes dos consideraciones:

- La absorción de la energía láser por la materia es mayor en el ultravioleta que en el visible o el infrarrojo.
- La energía de los fotones de una onda en el ultravioleta es mayor que para los de una onda en el visible o en el infrarrojo.

Debido a estos dos hechos, la interacción con la materia de los láseres de excímeros es completamente diferente a la que se produce con otros láseres como el láser de CO₂ o el de Nd-YAG. En estos últimos, el láser calienta el material, y al ir aumentando la temperatura se produce su fusión y posterior

evaporación. Los láseres de excímeros, debido a la alta energía de los fotones emitidos, al interaccionar con la materia, rompen los enlaces moleculares. La materia es eliminada con gran eficiencia, reduciendo al máximo el daño térmico al material adyacente.

Las aplicaciones de estos láseres abarcan campos como la medicina (corrección de la miopía...), las aplicaciones científicas y las aplicaciones industriales (fotolitografía en la industria electrónica).

4.1.4. Modos de funcionamiento.

La potencia láser emitida por un generador puede ser continua o pulsada.

4.1.4.1. *Funcionamiento continuo.*

Se caracteriza por un nivel continuo de potencia emitida. Para que esta situación tenga lugar, se requiere que el bombeo del medio activo se realice también de forma continua en el tiempo. Normalmente la estabilidad de potencia de salida que se obtiene suele ser del orden del 2 %. Algunos de los factores que influyen en la misma son: refrigeración del medio activo, uniformidad de la descarga eléctrica en el caso de láseres gas, inhomogeneidades en el medio activo, etc.

El funcionamiento continuo es ampliamente utilizado para aplicaciones industriales. Es el caso de numerosas aplicaciones de corte, soldadura y tratamientos térmicos de metales.

4.1.4.2. *Funcionamiento pulsado.*

En un láser pulsado la potencia sufre variaciones periódicas.

En la definición del modo pulsado intervienen las siguientes variables:

- Duración temporal del pulso.
- Potencia de pico.
- Energía del pulso.
- Frecuencia de repetición de los pulsos.

Se utiliza frecuentemente en dos circunstancias:

- Cuando se necesita disminuir la potencia media suministrada sin variar los niveles de densidad de potencia sobre la misma. Esto es útil, por ejemplo, en el corte de esquinas agudas en chapa.
- Cuando se desea obtener elevadas potencias de pico. Es el caso del taladrado o el marcado.

Algunas de las técnicas empleadas en la producción de pulsos son las siguientes:

- **Pulsado por obturación del haz de salida:** con esta técnica se consigue obtener pulsos cuya potencia de pico es igual al nivel de potencia en continuo. Para producir este pulsado se utilizan dispositivos electromecánicos exteriores a la cavidad óptica, siendo su versión más simple un obturador giratorio que obstruye periódicamente la salida del haz láser.
- **Pulsado por bombeo:** en este caso el bombeo del medio activo se realiza de forma pulsada. Es el modo de trabajo de gran parte de los láseres de Nd-YAG y de excímeros. Los láseres de CO₂ suelen incorporar de este modo, además del modo continuo, para aplicaciones de corte.
- **Pulsos con gran potencia de pico:** para algunas aplicaciones industriales, metrológicas o científicas, interesa trabajar con pulsos de elevada potencia de pico y de corta duración. Dos técnicas son utilizadas para estos propósitos:
 - Conmutación del factor Q: el factor Q es proporcional al cociente entre la energía media temporal almacenada en la cavidad óptica y la potencia perdida por la cavidad. La técnica de conmutación del factor Q consiste en introducir en la cavidad un obturador que inhiba la acción del láser de una forma controlada. Se consiguen pulsos de entre 10⁻⁸ y 10⁻⁷ segundos con potencias de pico de 10⁶ vatios. Esta técnica se utiliza, por ejemplo, en los láseres Nd-YAG de marcado.
 - Acoplamiento de modos: se basa en forzar a los diferentes modos longitudinales a mantener relaciones de fase constantes, utilizando para ello un modulador de las pérdidas de la cavidad óptica. Se consiguen pulsos de duración del orden de 10⁻¹¹ segundos. Gran parte de los generadores industriales para el procesamiento de materiales suelen disponer simultáneamente de modo continuo y pulsado. En aplicaciones de corte por láser este requerimiento está ampliamente extendido. Para ciertas aplicaciones que necesitan elevadas potencias de pico se suele recurrir a láseres exclusivamente pulsados. Es el caso de aplicaciones de taladrado o marcado.

4.1.5. Influencia del material y de los parámetros láser.

La interacción de un haz láser con un determinado material va a depender de dos tipos de factores:

- Propiedades intrínsecas del material (ópticas, térmicas...).
- Características del haz láser sobre el material.

4.1.5.1. Propiedades del material.

Las propiedades del material que tienen una influencia relevante en la interacción con un haz incidente son:

4.1.5.1.1. Reflectancia del material, R .

Para un haz láser incidente sobre la superficie de un material, se define como el cociente entre la potencia reflejada por la superficie y la potencia incidente. Depende del ángulo de incidencia, de la radiación incidente, y en el caso de la incidencia normal adopta la forma:

$$R = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2$$

donde:

n_1, n_2 = índices de refracción del primer y segundo medio.

En el caso de metales, se demuestra que n_{metal} es proporcional a $\sqrt{\sigma/\nu}$ donde σ es la conductividad eléctrica del metal ($1/(\Omega \cdot m)$) y ν la frecuencia de la onda incidente ($1/s$). Esto quiere decir que los metales que poseen alta conductividad, presentan reflectividad elevada, siendo las ondas de mayor frecuencia (longitud de onda más corta) mejor absorbidas. Debido a su alta conductividad, metales como la plata, el oro y el cobre son altamente reflectivos. Por tanto, sólo una pequeña cantidad de energía láser incidente será absorbida por dichos materiales. La reflectancia de los metales decrece rápidamente para temperaturas próximas a la de fusión del material.

4.1.5.1.2. Calor específico, C .

Es la cantidad de energía necesaria para elevar un grado kelvin la temperatura de la unidad de masa del material. En el sistema internacional de unidades se mide en ($J/(kg \cdot K)$).

4.1.5.1.3. Conductividad térmica, K .

Coefficiente que relaciona el flujo de calor con el gradiente térmico. La ecuación de conducción del calor unidimensional adopta la forma:

$$Q = -KA \frac{dT}{dz}$$

donde:

Q = flujo de calor (W).

A = área considerada (m^2).

$\frac{dT}{dz}$ = gradiente térmico (K/m).

K = conductividad térmica ($W/m \cdot K$).

La anterior ecuación se aplica a problemas de flujo de calor en condiciones estacionarias no dependientes del tiempo.

4.1.5.1.4. Difusividad térmica, κ .

Es una medida de la velocidad de difusión del calor en el material. Las unidades suelen venir dadas en m^2/s . Los materiales con alta difusividad térmica, bajo el efecto de un pulso de energía láser, experimentan un aumento de temperatura pequeño, siendo el grado de penetración del calor elevado.

4.1.5.1.5. Calor latente de fusión y evaporación, L_f y L_v .

La absorción de calor por un material, provoca un aumento de temperatura del mismo. A determinados valores de la temperatura (T_f, T_v) se producen cambios de estado del material. Se define el calor latente de fusión L_f como la energía que hay que suministrar a la unidad de masa del material para que experimente el cambio de estado sólido a líquido. De igual forma, el calor latente de evaporación L_v se define como la energía que hay que suministrar a la unidad de masa del material para que experimente el cambio de estado líquido a vapor. Las unidades más frecuentes para ambas magnitudes son (J/kg). Además, los cambios de fase conllevan cambios en las magnitudes descritas anteriormente (R, C, K, κ).

4.1.5.2. Parámetros láser.

Hace referencia a la forma en que la potencia láser es aplicada en función del tiempo y a las características relacionadas con el haz láser.

Las principales características del haz láser que influyen en la interacción con la materia son:

- **Longitud de onda:** influye en el porcentaje de energía absorbida por el material.
- **Densidad de onda incidente:** es función tanto de la potencia del haz láser como del tamaño del mismo sobre la pieza.
- **Distribución de modos transversales del haz láser:** influye en el tamaño del punto de focalización y en la distribución de potencia en el interior del mismo.

Respecto a la forma en que la potencia láser es aplicada a lo largo del tiempo, existen dos posibilidades:

- **Funcionamiento pulsado:** en el que la energía láser incidente sobre el material llega en forma de pulsos separados temporalmente. La anchura del pulso, su energía, potencia de pico e incluso la forma del mismo, son

aspectos relevantes que tienen gran influencia en el procesado de materiales.

- **Funcionamiento continuo.**

4.1.6. Balance energético en la interacción entre el láser y la materia.

En el presente apartado se presentará un balance energético que da idea, de una manera aproximada, de la interacción del haz láser con un determinado material.

Considérese un haz láser que es focalizado por medio de una lente sobre la superficie de un material. Supongamos que éste absorbe completamente la energía del haz láser (esto es una aproximación, ya que parte de energía incidente es reflejada), como consecuencia de lo cual alcanza una temperatura T a una profundidad z , siendo la sección transversal de esta zona calentada coincidente con el punto de focalización. Esta simplificación equivale a ignorar la difusión lateral del calor. La energía U requerida para que este cilindro de material alcance la temperatura T , siendo $T > T_v$, es:

$$U = (C \cdot T + L_f + L_v) \rho \pi a^2 z$$

donde:

U = energía necesaria para subir la temperatura del material hasta T (J).

C = calor específico (J/kg · K).

T = temperatura alcanzada (K).

L_f, L_v = calores latentes de fusión y vaporización (J/kg).

a, z = radio y altura del cilindro considerado (m).

ρ = densidad del material (kg/m³).

Se ha supuesto que C y ρ son constantes con la temperatura, y prácticamente iguales para el estado sólido y el líquido.

Dependiendo del tipo de aplicación, la ecuación anterior puede simplificarse más:

- En el caso del temple superficial (sin fusión ni evaporación), de los tres sumandos sólo permanece el primero.
- En aplicaciones de soldadura (despreciando la evaporación), sólo se consideran los dos primeros.
- Para aplicaciones de corte hay que tener presentes los tres sumandos.

La ecuación anterior es una primera aproximación al problema, ya que no tiene en cuenta la transmisión lateral del calor y presupone un incremento uniforme de temperatura en todo el cilindro de material calentado por el láser. Su validez, por tanto, es restringida, y servirá sólo para proporcionar una cota inferior a la energía necesaria para llevar a cabo un proceso.

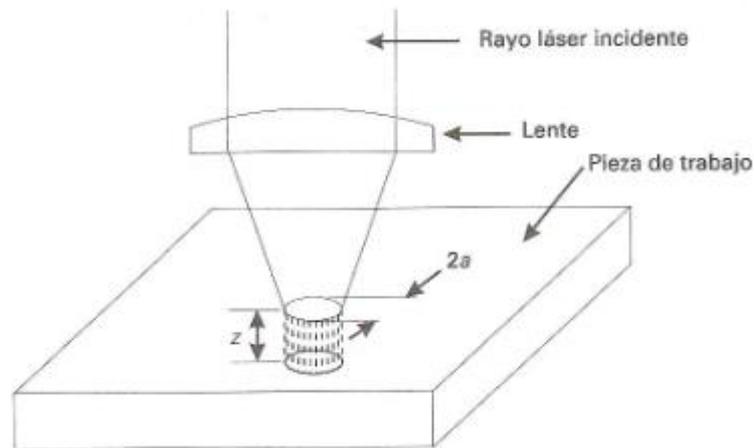


Figura 40: Interacción de un haz láser focalizado en un punto de focalización de diámetro $2a$.

(La tecnología láser. Fundamentos, aplicaciones y tendencias. Miguel Dorronsolo Mendiguren)

Una vez calculada U mediante la ecuación anterior, si se supone un láser pulsado con potencia uniforme P , se tiene que la duración del pulso para conseguir introducir en el material una cantidad de energía igual a U es (suponiendo $R = 1$):

$$\tau = \frac{U}{P}$$

donde:

τ = duración del pulso (s).

U = energía depositada por el haz láser (J).

P = potencia del pulso (W).

Como medida de la profundidad de penetración del calor en un material radiado por un pulso láser se utiliza:

$$z_p = \sqrt{\kappa\tau}$$

donde:

z_p = profundidad de penetración (m).

κ = difusividad térmica (m^2/s).

Cuando un haz láser continuo de potencia P , se desplaza con velocidad v sobre la superficie del material, se tiene que el tiempo que el haz actúa sobre un determinado punto es $\tau = 2a/v$. Este tiempo se conoce como tiempo de interacción. La energía suministrada por el haz láser sobre el punto de focalización será:

$$U = \frac{2aP}{v}$$

donde:

U = energía depositada sobre el material (J).

a = radio del punto de focalización (m).

P = potencia continua del láser (W).

v = velocidad relativa entre la pieza y el haz (m/s).

Los diferentes procesos que pueden tener lugar por efecto de la interacción de un haz láser sobre un material, están íntimamente relacionados con dos parámetros:

- **Densidad de potencia**, o cociente entre la potencia láser incidente y el área del punto de focalización (W/cm^2).
- **Tiempo de interacción**.

4.1.7. Aplicaciones del láser al procesado de materiales.

Cuando la energía de un haz láser se focaliza sobre una pieza de trabajo una parte de la misma es absorbida produciéndose calor. Este calor se usa para vaporizar, fundir o transformar el material. La característica más importante del procesado de materiales por láser es que la energía del haz se puede aplicar en una porción muy pequeña de la pieza de trabajo y durante un intervalo de tiempo muy corto. El calor no influye a otras áreas de la pieza, no causando distorsiones ni tensiones como en algunos de los métodos convencionales. Se aplica específicamente allí donde se necesita realizar el trabajo. Como consecuencia, el láser ofrece eficiencias de proceso extremadamente altas; comparativamente muy superiores a los sistemas clásicos.

4.1.7.1. Corte.

El corte industrial con láser se lleva a cabo generalmente por medio de generadores de CO_2 o Nd-YAG en funcionamiento continuo o pulsado. El proceso está asistido por gas a alta presión, el cual tiene por misión arrastrar el material fundido fuera del surco de corte.

El corte por láser es un proceso térmico en el que el material es parcialmente fundido y parcialmente evaporado. El haz láser es focalizado por debajo o sobre la superficie del material a cortar por medio de una lente. El diámetro del punto de focalización varía generalmente entre $0,15 - 0,5 \text{ mm}$, alcanzándose densidades de potencia del orden de 10^6 W/cm^2 . El haz láser calienta un cilindro de material, fundiendo y evaporando parte del mismo. La eliminación del material fundido de la zona de interacción se produce por medio de un flujo de gas coaxial con el haz láser. El movimiento relativo entre el haz y la pieza produce un surco en el material.

Algunas de las ventajas atribuibles al corte por láser son las siguientes:

- El proceso tiene lugar sin contacto mecánico con la pieza.
- Se trata de un proceso que admite una fácil automatización.
- Debido al reducido tamaño del punto de focalización, el surco de corte producido es muy reducido ($\approx 0,1 - 0,5 \text{ mm}$).
- La zona afectada por el calor en el borde de corte es muy reducida.
- Las velocidades de corte obtenibles son altas comparadas con otras tecnologías.
- Es posible el corte de perfiles muy agudos, gracias al reducido efecto térmico lateral que produce.
- Se pueden cortar gran diversidad de materiales, independientemente de su dureza.

Sin embargo, también pueden mencionarse algunos aspectos negativos:

- El coste de los sistemas láser es elevado comparado con otras tecnologías (especialmente para corte de formatos de chapa tridimensionales).
- Se trata de un proceso con buenos resultados dentro de unos determinados límites de espesor del material. Para grandes espesores, la calidad de corte desciende notablemente, siendo muy evidentes los defectos como las estriaciones y la falta de perpendicularidad en el borde de corte.

4.1.7.2. *Perforado.*

La aplicación de perforado se lleva a cabo normalmente con láseres de Nd-YAG o CO_2 pulsados, siendo necesarias densidades de potencia del orden de 10^6 a 10^9 W/cm^2 . El abanico de aplicaciones es muy amplio: perforado de boquillas de cigarros, tetinas de biberones y elementos difusores de aerosoles, agujeros en aletas de turbina, materiales cerámicos...

Se distinguen dos métodos de perforado:

- **Perforado por percusión:** el agujero se produce con el haz láser y la pieza inmóviles. Se utiliza para producir agujeros de pequeño diámetro (inferior a 1 mm) y generalmente se utilizan láseres de Nd-YAG pulsados. El agujero es producido, dependiendo de los casos, por uno o varios pulsos.
- **Trepanado:** se emplea para agujeros de diámetro superior a los obtenidos por la anterior técnica. Es una variante del proceso de corte ya que el agujero se obtiene por el movimiento relativo entre el haz láser y la pieza, de acuerdo, generalmente, con un patrón circular. El tamaño del agujero está determinado por el sistema que produce el movimiento relativo entre la pieza y el haz láser. Se utilizan láseres de CO₂ o Nd-YAG.

Las ventajas del perforado con láser son básicamente las mismas que se mencionaron para el corte. Además es una técnica con alto grado de repetibilidad de resultados, capaz de trabajar sobre materiales de difícil mecanizado y con productividades elevadas.

Entre las desventajas se pueden mencionar fundamentalmente dos:

- Presencia de material refundido en la superficie de entrada del haz y rebabas en la superficie de salida.
- El perfil del agujero no se ajusta perfectamente a un cilindro.

4.1.7.3. *Soldadura.*

La soldadura se define como la operación en la que se unen dos o más partes de un material por medio del calor, la presión o la acción combinada de ambos, de tal forma que después del proceso, se produce una continuidad en la naturaleza del material entre las partes soldadas. Existen dos tipos de soldaduras láser, una que se realiza en continuo y otra en pulsado. El modo continuo de soldadura es típico de los láseres de CO₂ y de algunos de Nd-YAG. El modo pulsado es utilizado en algunas aplicaciones del láser de Nd-YAG.

La luz láser dirigida sobre una pieza de metal es parcialmente absorbida. La luz absorbida calienta la superficie en el punto de incidencia, y el calor penetra en el material por conducción térmica. Si se transfiere suficiente potencia al material, éste puede ser fundido en el punto de interacción y de esta forma producirse una soldadura. Estas condiciones de soldadura se conocen como régimen de conducción ya que la energía láser es absorbida superficialmente y transmitida por conducción hacia el interior de la pieza. Puesto que el calentamiento del material depende de sus propiedades de conducción y difusión del calor, las penetraciones de soldadura que se consiguen están limitadas normalmente a menos de 2 mm. En este régimen funcionan los láseres pulsados Nd-YAG y los láseres de CO₂ de baja potencia (inferior a 500 W), siendo utilizados en la soldadura de pequeños espesores.

Sin embargo, para láseres de 1 kW o más de potencia continua, capaces de alcanzar densidades de potencia del orden de 10^6 W/cm^2 sobre la superficie del material, la interacción del haz con el material ocurre de una forma distinta a la descrita anteriormente. El fenómeno que se produce es conocido como «keyhole», y gracias al mismo se consiguen penetraciones mucho mayores que en el caso de soldadura por conducción.

En el «keyhole» la energía incidente del láser calienta la zona fundida más allá del punto de fusión, formando un agujero en el metal. Esta cavidad de forma cilíndrica, llena de gas metálico vaporizado, captura prácticamente el 100 % de la potencia láser incidente. La eficiencia del proceso es, por tanto, muy elevada.

El calor se transfiere desde las paredes del «keyhole» hacia el material, formando una región fundida alrededor del vapor. Cuando el haz se mueve relativamente respecto a la pieza de trabajo, el metal fundido llena por detrás el hueco y se solidifica formando la soldadura. Con láseres de alta potencia pueden conseguirse penetraciones superiores a 1 cm en la soldadura sobre metales.

Las principales ventajas de la soldadura con láser son:

- Distorsión reducida de las piezas soldadas gracias al reducido aporte térmico.
- Zona alterada por el calor pequeña, debido al rápido enfriamiento del baño fundido.
- Buena apariencia externa del cordón de soldadura.
- Proceso de fácil automatización, que permite realizar soldaduras con elevada precisión en los posicionamientos.
- Es posible soldar materiales distintos y algunos materiales de difícil soldabilidad.
- Accesibilidad a áreas no permitidas por otras técnicas.
- Velocidad de soldadura mayor, en general, que en otras técnicas.

Las desventajas más relevantes de la aplicación son:

- En materiales con tendencia a templar, los rápidos calentamientos y enfriamientos que se generan en el proceso de soldadura se traducen en una acentuada tendencia al agrietamiento tanto de la unión soldada como de la zona afectada por el calor.
- Las aplicaciones de soldadura involucran generalmente instalaciones de mayor potencia que las de corte y perforado. El coste es alto comparado con algunas tecnologías alternativas.

4.1.7.4. Temple.

En el temple superficial con láser, un haz láser desfocalizado con potencia incidente de varios kilovatios es barrido sobre la superficie de un material

templable para elevar localmente la temperatura por encima de la temperatura de transformación.

La aplicación más relevante es el temple de los aceros, por lo que será la que se tome como ejemplo para exponer el temple con láser. Al ser necesarias, normalmente, grandes cantidades de potencia láser incidente, los láseres más utilizados para llevar a cabo este proceso son los de CO₂.

El temple superficial de aceros es un proceso empleado para mejorar las propiedades mecánicas, y frente a desgaste de piezas sometidas a procesos erosivos o que sufren grandes esfuerzos. Para llevarlo a cabo es necesario que el material realice el siguiente ciclo térmico:

1. Calentamiento por encima de la temperatura de austenización para obtener la completa transformación del hierro α en hierro γ .
2. Mantenimiento a esta temperatura por un tiempo suficiente para obtener la disolución, al menos parcial, de los carburos y la homogeneización de la concentración de carbono en disolución sólida en la austenita.
3. Enfriamiento hasta la temperatura ambiente con una velocidad no inferior a un valor crítico, para la obtención de martensita.

El temple superficial difiere del temple convencional en que solamente una delgada zona superficial de la pieza es calentada por encima de la temperatura de austenización antes de ser enfriada, dejando inalterada la zona interior de la pieza.

Cuando un haz láser incide sobre la superficie de un acero, parte de la energía incidente es absorbida, produciéndose un calentamiento superficial. Si la densidad de potencia es suficientemente alta, se introduce calor a una velocidad superior a la que penetra por conducción en la pieza, aumentando rápidamente la temperatura en un pequeño estrato superficial. En unos instantes, dicho estrato alcanza la temperatura de austenización, mientras el interior de la pieza está todavía frío. Al mover el haz láser sobre la superficie, cualquier punto de la misma, alcanzado por la energía láser es rápidamente calentado durante su movimiento. Esta zona se enfriará rápidamente al fluir por conducción el calor al interior de la pieza.

Para obtener un espesor uniforme de la capa templada es necesario que la distribución de energía láser se haga uniformemente sobre la superficie de la pieza. Para ello se utilizan haces de sección cuadrada que se consiguen por medio de integradores de haz o dispositivos de barrido. Las densidades de potencia utilizadas son del orden de 1000 – 2000 W/cm². La anchura y profundidad de la zona templada dependen de la distribución de intensidad del haz láser incidente y de las propiedades térmicas y metalúrgicas del material.

Dos aspectos de importancia a tener en cuenta en el temple de aceros con láser son:

- Necesidad de un recubrimiento absorbente.
- No se necesitan agentes externos de enfriamiento (agua, aceite...).

El primer punto surge como consecuencia de la alta reflectividad de los metales para la longitud de onda láser de CO₂. El porcentaje de energía absorbida sin recubrimiento oscila entre el 10-15 %. Con recubrimientos de pintura negra, grafito, fosfatos, etc., se consiguen absorciones del orden del 60-80 %.

El segundo punto se debe a que el enfriamiento se produce por conducción del calor hacia el interior de la pieza. La validez de este mecanismo de enfriamiento es aplicable para piezas con gran masa térmica, es decir, piezas donde la absorción de la energía láser no supone un aumento en la temperatura significativo del conjunto de la pieza.

Los parámetros de temple con láser deben elegirse de tal forma que la temperatura que se consiga sea algo superior a la que se utiliza para alcanzar la austenización en los procesos de temple convencionales. El límite superior de temperatura admisible es el punto de fusión del material. En general, la fusión superficial es un resultado no aceptable, ya que origina la necesidad de mecanizados posteriores sobre la pieza.

Una situación que se presenta con cierta frecuencia es la necesidad de superponer diversas pasadas para cubrir una zona que no puede ser procesada por una única. Teniendo presente que un cierto flujo lateral del calor siempre se produce al ser absorbida la energía láser por la superficie del material, cuando se efectúa un segundo paso del temple superpuesto a uno previamente realizado, se produce un efecto de revenido en el primero.

Entre las ventajas del proceso de temple destacan:

- La cantidad de calor suministrada a la pieza es baja, lo que minimiza las posibles distorsiones de la misma. Normalmente no es necesario el uso de agentes refrigerantes externos como agua o aceite.
- La profundidad de temple es controlable dentro de ciertos límites. Las propiedades del material base permanecen inalteradas.
- Es un proceso que permite el temple selectivo de áreas reducidas sin afectar las propiedades del material adyacente.

También se pueden mencionar las siguientes desventajas:

- No es un proceso apto para el temple superficial de grandes áreas.
- La alta reflectividad de los metales para $\lambda_{CO_2} = 10,6 \mu m$ hace necesario el uso de recubrimientos superficiales que mejoren la absorción de la energía incidente.

- Elevado coste de los sistemas láser para realizar tratamientos.

4.1.7.5. *Recubrimiento y aleación superficial.*

Tanto el recubrimiento como la aleación con láser son dos técnicas aplicadas a la modificación superficial de metales para mejorar sus propiedades mecánicas o de resistencia frente al desgaste y la corrosión.

A diferencia de la aplicación de temple, el recubrimiento y la aleación superficial suponen una fusión de la superficie de la pieza y un cambio químico en la misma (más intenso en la aleación).

4.1.7.5.1. *Recubrimiento con láser (laser cladding).*

El objetivo de esta aplicación es fundir una aleación sobre la superficie de un sustrato, con una dilución mínima con el mismo y con una buena unión metalúrgica. Existen diversas formas de llevar a cabo el proceso:

- Colocando con antelación aleación en polvo sobre el sustrato. Normalmente suele colocarse el polvo aglutinado en forma de pasta, ya que permite una mayor uniformidad en la cantidad de material depositado.
- Inyección del polvo en el baño fundido generado por el láser sobre el sustrato. Generalmente el polvo es transportado por un chorro de gas inerte. Este procedimiento es el más extendido.
- Aplicación del material en forma de hilo o predeposición por «plasma spray».

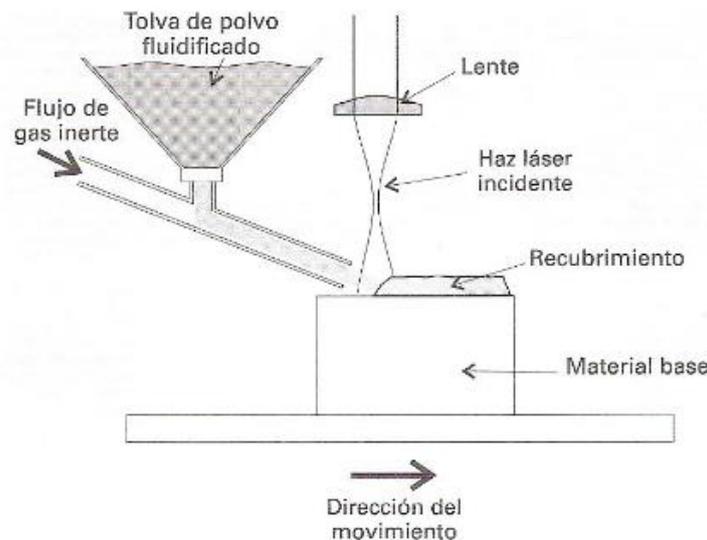


Figura 41: Sistema de inyección de polvo en aplicaciones de recubrimiento láser.

(La tecnología láser. Fundamentos, aplicaciones y tendencias. Miguel Dorronsolo Mendiguren)

En relación con los parámetros láser, son válidas las siguientes consideraciones:

- La aplicación se lleva a cabo generalmente con láseres de CO₂ de alta potencia.
- La densidad de energía (densidad de potencia × tiempo de interacción) necesaria en este proceso, es mayor que para la aplicación de temple. La razón se debe al hecho de que en esta aplicación hay que alcanzar la fusión superficial del material sustrato.
- Se trabaja también con el haz láser desfocalizado.
- La superficie del material sustrato se suele granallar para mejorar la absorción de la energía láser.

Los recubrimientos que se realizan en un único paso tienen una anchura típica de 10 mm. Su espesor puede alcanzar varios milímetros. El recubrimiento de un área extensa se consigue mediante la superposición de varios pasos con un cierto solapamiento.

Las características más notables de este proceso son las siguientes:

- Bajos niveles de dilución del recubrimiento con el material base.
- La distorsión térmica es reducida.
- Cuando se utiliza la técnica de inyección de polvo, existe un cierto control sobre la forma del recubrimiento.
- Suave acabado superficial.
- Buena unión metalúrgica.

Algunos ejemplos donde se ha aplicado con éxito esta técnica son el recubrimiento de válvulas de motores de explosión, herramientas para forja, aletas de turbina, etc.

4.1.7.5.2. Aleación con láser.

En la aleación superficial con láser un material externo, generalmente en forma de polvo o gas, es añadido en el baño fundido producido por la interacción del láser con la superficie del material base. A diferencia del recubrimiento, en la aleación se produce una gran dilución entre el material base y el nuevo material añadido durante el proceso. Esto se deberá al movimiento convectivo del material fundido que se produce como consecuencia de los elevados niveles de densidad de energía involucrados en el proceso (mayores que para el recubrimiento).

Para añadir el nuevo material sobre el baño fundido, se utilizan fundamentalmente dos técnicas:

- **Proceso en atmósfera gaseosa:** en este caso el baño fundido reacciona con el gas circundante.
- **Inyección de polvo:** como en el caso del recubrimiento.

Con respecto a los parámetros láser utilizados, son aplicables las consideraciones expuestas para el recubrimiento. No obstante, los niveles de densidad de energía necesarios son mayores.

Algunos ejemplos de aplicaciones de la aleación superficial láser son:

- Mejora del comportamiento al desgaste de aleaciones de Ti utilizadas en aviación, gracias a la formación de fases duras, como TiN, en la matriz de Ti. Esto se consigue por reacción de Ti fundido en atmósfera de N₂.
- Aumento de la dureza superficial de aceros de bajo contenido en carbono mediante aleación superficial con grafito.
- Aleación superficial con Si de aleaciones de Al utilizadas en la fabricación de camisas de cilindros de motores de automóvil. Se consigue de esta manera mejorar su comportamiento frente al desgaste.

Tanto el recubrimiento como la aleación superficial son aplicaciones poco extendidas en comparación con otras como el corte o la soldadura. Las razones residen, fundamentalmente en que son técnicas no suficientemente maduras y en muchos casos de difícil justificación económica.

4.1.7.6. *Marcado.*

La aplicación de marcado se utiliza para producir cambios permanentes en la superficie de diferentes tipos de pieza, al objeto de poder realizar posteriormente una identificación de las mismas. Algunos ejemplos son el marcado de códigos de barras, identificaciones alfanuméricas o logotipos. Los láseres utilizados para la aplicación son:

- Láseres Nd-YAG en funcionamiento pulsado o en conmutación del factor Q . Las potencias medias utilizadas varían entre 10 – 90 W. Los materiales que pueden marcarse son los metales, algunos plásticos, el silicio y las cerámicas, y piezas pintadas o anodizadas.
- Láseres CO₂ del tipo TEA, que funcionan también en modo pulsado y son capaces de producir altas potencias de pico. La longitud de onda del láser de CO₂ lo hace adecuado para el marcado de la mayoría de los plásticos y materiales orgánicos, siendo también utilizado sobre superficies pintadas o anodizadas.

El marcado láser se produce como consecuencia de un cambio de coloración o de estructura de la superficie de la pieza. El tipo de material y los parámetros láser van a determinar diversos fenómenos sobre la pieza, dando lugar a diferentes tipos de marcado:

- **Marcado por modificación química debida al calor producido por la radiación láser incidente:** Este cambio químico va acompañado de un

cambio de coloración. Un cambio típico es el marcado de plásticos con láser TEA.

- **Marcado por evaporación o fusión superficial:** la evaporación crea un surco en el material, mientras que la fusión provoca una variación del acabado superficial. El método de evaporación es especialmente efectivo sobre materiales recubiertos o anodizados. En este caso la evaporación del recubrimiento deja al descubierto la diferencia con el material base.

Las principales ventajas del marcado láser son:

- Alto grado de automatización y de velocidad de trabajo.
- Es un procedimiento donde no hay contactos de tipo mecánico.
- Los caracteres, dibujos, etc., pueden ser modificados o cambiados de forma directa, permitiendo una gran flexibilidad.
- Las marcas son indelebles.

La principal desventaja radica en el elevado coste de los sistemas láser. La justificación económica de un sistema de este tipo ha de buscarse en el mejor control del inventario y de la calidad.

Algunos ejemplos de aplicaciones de marcado son:

- Teclados de ordenador y de máquinas de escribir.
- Instrumental quirúrgico.
- Caracteres alfanuméricos, códigos de barras, esquemas de conexionado, etc., para piezas metálicas y de plástico en cadenas de montaje de componentes.
- Componentes electrónicos.
- Marcado de vidrio.

4.2. Láser cladding.

Con el rápido crecimiento de las aplicaciones láser y el reducido precio de los sistemas láser, el procesamiento de materiales con láser ha ido ganando importancia en diversos sectores de la industria: aeroespacial, automoción, naval, defensa y muchos otros sectores están adaptando ampliamente la tecnología láser para fundir, cortar y endurecer. Entre las aplicaciones de la tecnología láser, el láser cladding ha recibido una atención significativa en los últimos años debido a sus diversas posibilidades en el procesado de materiales tales como los recubrimientos metálicos, reparación de componentes de alto valor, prototipado e incluso manufactura de pequeños volúmenes.

El láser cladding es una tecnología interdisciplinar que utiliza la tecnología láser, diseño y manufactura asistidos por ordenador (CAD/CAM), robótica, sensores y control, y metalurgia en polvo.

El láser cladding utiliza una fuente láser de calor para depositar un delgado estrato de un material deseado sobre un sustrato en movimiento. El material depositado puede ser transferido al sustrato por varios métodos: aporte de polvo, polvo pre-situado en el sustrato o por aporte de hilo. Entre estos métodos, el láser cladding por aporte de polvo ha demostrado ser el más efectivo. En este proceso, el haz láser funde las partículas de polvo y un fino estrato del sustrato móvil para depositar un estrato de las partículas de polvo sobre el sustrato. Una gran variedad de materiales pueden ser depositados sobre el sustrato empleando el láser cladding por aporte de polvo para formar un estrato con espesores que van desde los 0,05 a los 2 mm y anchos de 0,4 mm.

Además de aplicaciones de recubrimiento de metales, el proceso de láser cladding es de gran ayuda en manufactura y técnicas de prototipado. La integración de la tecnología de láser cladding con un modelo CAD sólido tridimensional, que esté separado en muchos estratos, proporciona la capacidad de fabricar complejos componentes sin pasos intermedios.

El desarrollo de la tecnología de láser cladding depende de la mejora de las técnicas involucradas, la comprensión de las interconexiones entre las tecnologías involucradas en el proceso y la calidad del proceso son pasos primordiales para el desarrollo del láser cladding.

Sin embargo, numerosas interacciones entre las tecnologías involucradas en el láser cladding no solo aumentan la complejidad del proceso sino también aumentan el número de parámetros del proceso.

4.2.1. Origen y desarrollo.

La invención del primer aparato láser por Maiman en los años 60 fue un hito en la ciencia. Inmediatamente después de esta invención, había científicos que aseguraban que el láser era la respuesta a multitud de problemas científicos que no habían podido ser resueltos durante esos años. Estos problemas han surgido en muchas áreas resultando en que los láseres fueran adaptados a muchas tecnologías para resolver esos problemas gracias a sus características únicas. Una de las áreas que se ha beneficiado de la tecnología láser fue el procesado de materiales, que fue rápidamente desarrollado en los años 70 cuando la potencia y eficiencia de los láseres se volvía cada vez mayor. El desarrollo de láseres gaseosos (como los de CO₂) de alta potencia en 1975 hizo posible en esa década la soldadura, el corte y el endurecimiento de metales por láser. Entre las tecnologías de procesado de materiales por láser, el láser cladding fue usado por Gnanamuthu de la Rockwell International Corporation en Thousand Oaks (California) a finales de los 70. Un precursor del método de láser cladding fue usado para investigar la factibilidad del proceso en la aplicación de densos revestimientos cerámicos en piezas metálicas.

Aproximadamente al mismo tiempo, varios grupos de investigación alrededor del mundo comenzaban proyectos para desarrollar aparatos y sistemas para el desarrollo y mejora del proceso. Entre estos grupos, el proyecto dirigido por William M. Steen tuvo un gran impacto en el desarrollo de la tecnología de láser cladding. Él, junto a Vijitha Weerasinghe, introdujo el láser cladding por aporte de polvo en el mundo académico y llevó a cabo numerosos proyectos para evaluar el proceso desarrollado. Otro grupo de investigación, liderado por Jyoti Mazumder, contribuyó a muchos de los principios fundamentales de esta área en los años 80. El equipo de Mazumder no sólo desarrolló modelos y estudió los mecanismos del proceso sino que además aplicaron la tecnología a muchos metales y cerámicas para investigar su potencial para recubrimientos y también su resistencia a la corrosión y el desgaste.

Una revisión de la literatura muestra que el número de estudios y patentes relacionados con esta tecnología se incrementó significativamente en los años 80. Estos estudios revelaron los mecanismos para la mejora de esta tecnología, como el desarrollo de alimentadores de polvo, sistemas de refrigeración, mecanismos de reflexión hemisféricos para la reabsorción de la luz reflejada, etc. Las aplicaciones de esta tecnología para aleaciones resistentes al desgaste y la corrosión fueron también relatadas por muchos de los grupos de investigación en los años 80.

La industria comenzó a prestar atención a las características de esta tecnología también durante los años 80. El láser cladding fue apreciado como una técnica con ventajas significativas sobre las convencionales para los revestimientos contra la corrosión y el desgaste. Las investigaciones llevadas a cabo por diversas industrias llegaron a adelantar a los proyectos académicos. El primer uso registrado del láser cladding en la industria fue en 1981. El tratamiento de palas de turbina mediante láser cladding fue de las primeras aplicaciones industriales del láser cladding que ganarían aceptación.

En la industria de la automoción, el láser cladding fue empleado en los revestimientos para los asientos de las válvulas por algunas compañías europeas y asiáticas como Fiat, Toyota y Mercedes-Benz.

En el mercado de reparación de componentes, el láser cladding atrajo mucha atención durante los años 80. Fue utilizado con éxito para la reconstrucción y revestimiento de partes de turbinas. Un gran número de compañías y grupos de investigación alrededor del mundo han utilizado el láser cladding para la reparación de palas de turbina.

Otra aplicación del láser cladding, el prototipado rápido o fabricación por capas, recibió una gran atención en los años 90 y continúa siendo explorado en los últimos años. En 1986, se patentó la estereolitografía, un proceso para el prototipado de piezas complejas. Este proceso usaba láseres ultravioleta. En

1988, se vendió la primera máquina de estereolitografía comercial estableciéndose una nueva industria de prototipado rápido. La estereolitografía les dio a los desarrolladores de productos la capacidad de visualizar, cambiar, optimizar y fabricar nuevos diseños de forma rápida y precisa partiendo de un modelo sólido tridimensional en CAD. A pesar de que la mayoría de sistemas comerciales usaban polímeros y fotopolímeros, la industria estaba buscando aplicar esta técnica para hacer prototipos metálicos que pudieran ser usados directamente en máquinas reales. La competitividad a nivel global estaba forzando a que los fabricantes de los productos buscasen nuevas maneras de reducir el tiempo y costes de fabricación. En respuesta a esta situación, se comenzó a utilizar el láser cladding para el desarrollo de máquinas para prototipado directo con metal.

Muchos grupos de investigación y desarrolladores empezaron proyectos para elaborar métodos para el prototipado de piezas metálicas basados en el láser cladding por aporte de polvo.

En los años 90 un grupo de investigación liderado por Xue e Islam desarrolló aparatos y métodos para la fabricación por capas, llamado “consolidación láser”. Sus éxitos tuvieron un gran impacto en este campo debido a la calidad única de la superficie de las piezas producidas usando esta técnica. En los últimos años, un equipo de investigación de la Universidad de Waterloo llevó a cabo un estudio para el desarrollo de un aparato inteligente de láser cladding.

El principal foco de interés de investigación es el orientado al desarrollo de técnicas de modelado inteligente y controladores basados en el conocimiento del proceso. Estos controladores basados en el conocimiento se usarían en una máquina de láser cladding autónoma, que no sólo pueda depositar un amplio rango de aleaciones sino que también pueda hacer formas complejas sin necesitar la presencia de especialistas.

La flexibilidad del láser cladding está empezando a ser reconocida por muchas industrias y grupos de investigación. El potencial de esta técnica es grande, por lo que grupos de investigación continúan contribuyendo a su expansión a través de programas de investigación y la enseñanza a estudiantes de las técnicas de láser cladding.

4.2.2. Equipamiento.

El láser cladding requiere los siguientes equipos: un láser, un alimentador de polvo junto con boquillas para el aporte y un mecanismo de posicionamiento equipado con Software CAD/CAM. Es esencial entender que la construcción de estos mecanismos y su desempeño bajo diferentes condiciones de trabajo condicionan el éxito del proceso de láser cladding.

4.2.2.1. Láseres.

En el proceso de láser cladding, es esencial proveer una apropiada densidad de potencia y un tiempo de interacción entre el haz láser y el material. El proceso de láser cladding requiere una densidad de potencia desde los 70 a los 100 W/mm^2 y un tiempo de interacción de 0,01 a 1 segundo; cualquier láser que se pretenda utilizar en el proceso de láser cladding debería proporcionar este nivel de densidad de potencia. Además, la calidad del haz es un factor fundamental para el éxito del proceso.

Otro importante factor para cualquier procesamiento de material por láser es la reflexión de la luz por la superficie de los metales. La reflexión es una propiedad fuertemente dependiente de la longitud de onda del láser y varía de un metal a otro.

También es importante considerar la contribución de la temperatura en la reflectividad. Conforme la temperatura de las zonas en proceso se eleva, ocurre un incremento de la absorptividad, lo que indica una mayor absorción de energía por el material.

4.2.2.1.1. Tipos de láseres en procesos de láser cladding.

Los láseres de CO_2 , los láseres de Nd-YAG de bombeo por lámparas, los láseres de Nd-YAG de bombeo por diodo y los láseres de diodo de alta potencia (*“High-Power Diode Lasers”*, HPDL) son los más usados en los procesos de láser cladding.

No hay registro del uso de láseres líquidos de colorante en el proceso de láser cladding. Este láser no es ampliamente utilizado en la industria de materiales debido a su baja potencia.

Tampoco hay reportes del uso de láseres de fibra en el proceso de láser cladding. Sin embargo, los láseres de fibra pueden ser adaptados al proceso debido a la alta calidad de su haz, la efectividad en cuanto a costes y la eficiencia en el futuro cercano.

En láser cladding se han usado tanto láseres continuos como pulsados; sin embargo, con láseres pulsados, es necesario mantener la potencia de pico en cada pulso en un rango limitado. Los pulsos con gran potencia de pico (incluso aquellos con baja potencia media) pueden vaporizar las partículas de polvo anteriores para llegar a la zona de proceso.

Hay grandes diferencias de funcionamiento entre los láseres de Nd-YAG, los HPDL y los de CO_2 . La luz emitida por los de Nd-YAG y los HPDL es emitida a longitudes de onda de 1,024 y 0,85 μm respectivamente, que están cerca del infrarrojo, mientras que en los de CO_2 la luz es emitida a 10,6 μm . Las interacciones materiales a estas longitudes de onda difieren.

Los metales son más reflexivos a $10\ \mu\text{m}$ que a $1\ \mu\text{m}$; como resultado, los láseres de Nd-YAG y HPDL son más eficientes que los de CO_2 para tratamiento de metales. Los haces de los láseres de CO_2 pueden ser enfocados a zonas más pequeñas y además son más simétricos, lo que mejora el ancho del cordón.

4.2.2.2. Características del haz láser en el láser cladding.

Dado que la zona de tratamiento en el láser cladding está normalmente situada debajo del punto focal, una gran distancia entre el sistema óptico y la pieza de trabajo está disponible, lo que facilita la protección del sistema óptico. En general, en láser cladding, se prefiere tener una gran distancia focal debido a la reducción de la sensibilidad de las dimensiones de la muestra a los cambios en las características del haz y también la reducción de la intensidad de la potencia de pico en el punto de la muestra, lo que puede causar la formación de plasma.

En el láser cladding pre-colocado, un haz láser circular con distribución uniforme de potencia será más adecuado que un haz gaussiano. La principal razón de esto es la necesidad de transferir energía de forma homogénea en el estrato de polvo pre-colocado. Si se usara un haz gaussiano, causaría una distribución de energía no homogénea, lo que podría causar la formación de plasma o incluso un ancho de cordón inesperado.

En el láser cladding por aporte de polvo, usar un haz gaussiano puede resultar en una mejor calidad, dilución y homogeneidad en la microestructura del cordón. En el caso de boquillas laterales, las partículas de polvo normalmente tienen una distribución gaussiana.

El modo TEM_{00} se ha usado en muchos estudios relacionados con el láser cladding.

Habrán casos en los que se prefieran otros modos, especialmente cuando se quiera producir un fino cordón. Esta forma puede generarse usando dos espejos cilíndricos o un espejo segmentado.

En láser cladding también es posible usar una forma rectangular con una potencia uniforme, como la generada por un diodo láser. Tal forma puede ser generada también usando un integrador de haz bidimensional. Una alternativa al uso de ópticas integradoras para conseguir un perfil de temperatura uniforme a lo ancho de la trayectoria es el uso de ópticas de escaneado.

Los láseres de alta potencia pueden volverse inestables cuando funcionan por un largo periodo en el proceso de cladding. Las propiedades de los láseres pueden ser influidas por el proceso mismo, causando que el proceso falle o no dé un resultado satisfactorio. Por lo tanto, supervisar y controlar los parámetros del haz láser es una importante labor en los procesos de láser cladding.

4.2.2.3. *Alimentadores de polvo y boquillas inyectoras de polvo.*

Los alimentadores de polvo están entre las piezas más importantes del equipo en numerosas aplicaciones industriales que involucran el transporte de polvo, tales como pulverización térmica, láser cladding y procesado avanzado de materiales. Así como los distintos polvos tienen tamaños, formas y otras propiedades físicas y mecánicas muy distintas entre sí, es casi imposible transportar cada tipo de ellos con un flujo continuo usando un único alimentador. Disminuyendo el tamaño de grano del polvo, la fluidez del polvo decrece, lo que causa problemas en el transporte del polvo. La fluidez también disminuye dramáticamente con polvos viscosos. El factor vacío también juega un papel importante en la fluidez del polvo. Por estas razones, diferentes alimentadores de polvo son necesarios para cada tipo de polvo. Por lo tanto, una máquina alimentadora de polvo debe ser cuidadosamente controlada para asegurar que una corriente estable de polvo con el alimento deseado se genera.

La selección de un adecuado alimentador de polvo es un factor vital para el éxito de los procesos de láser cladding. Un alimentador de polvo debería proveer una corriente continua y uniforme con gran precisión en términos de ratio de flujo de alimentación. Es crucial controlar el ratio de alimentación en tiempo real. Además, en los procesos de láser cladding, se le presta una particular atención a minimizar las vibraciones y aglomeraciones en la corriente de polvo. Desafortunadamente los actuales alimentadores de polvo en el mercado no pueden proporcionar una baja constante de tiempo y un bajo ratio de alimentación de polvo con gran precisión, los cuales son dos importantes parámetros en la tecnología de láser cladding. Por esta razón se han diseñado alimentadores de polvo especiales con diferentes estrategias de control.

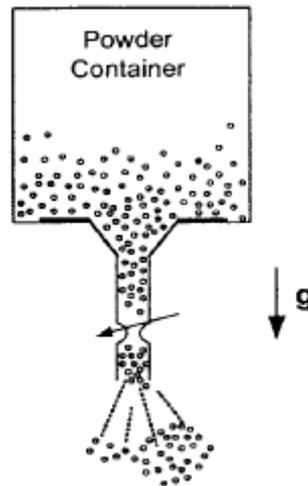
Además, los investigadores están desarrollando alimentadores para polvos ultrafinos para conseguir una corriente continua con bajo ratio de alimentación. Estos alimentadores de polvo están basados en vibraciones o asistidos por presión, los cuales pueden ser usados en deposición directa.

4.2.2.3.1. *Tipos de alimentadores de polvo.*

Hay muchos tipos de alimentadores de polvo empleados en la industria. En todos los tipos de alimentadores de polvo, un gas portador debería suministrarse para transportar las partículas de polvo desde el punto inicial a la localización deseada. En general, los alimentadores de polvo se pueden clasificar en los siguientes tipos basados en sus diferentes principios de operación.

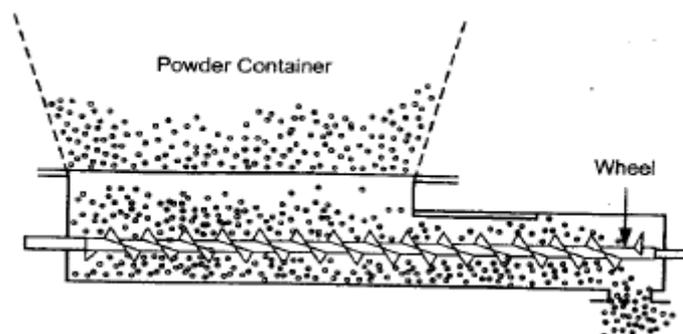
- **Basados en la gravedad:** el alimentador de polvo consiste básicamente en una célula de carga basada en una balanza electrónica y un orificio. Debido al peso, el material fluye desde la tolva al orificio si las partículas de polvo tienen la fluidez requerida. Reduciendo o aumentando el área

del orificio, la cantidad de polvo entregada a la boquilla disminuye o aumenta.



*Figura 42: Esquema de un alimentador de polvo por gravedad.
(Laser cladding. Ehsan Toyserkani, Amir Khajepour & Stephen Corbin)*

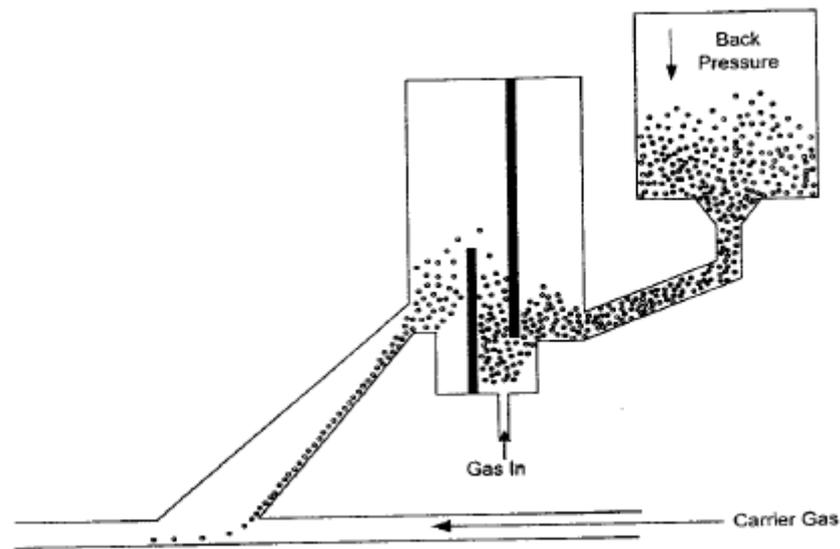
- **Rueda mecánica:** los alimentadores de rueda mecánica manejan un amplio rango de polvos con diferentes tamaños. Normalmente trabajan con una baja presión diferencial entre la entrada y la salida. Un típico alimentador mecánico tiene un paso con diferente ratio de diámetro o un rotor que puede coger partículas de polvo desde el área de almacenamiento. Hay muchas configuraciones que pueden usarse para promover un flujo uniforme con diferentes ratios de alimentación. Una desventaja de este tipo de alimentador de polvo es la interacción de partes móviles y partículas de polvo abrasivas, lo que causa un rápido deterioro en la rueda. Esto puede causar variaciones en la calidad del revestimiento y también aumentar los costes de mantenimiento.



*Figura 43: Esquema de un alimentador de polvo con rueda mecánica.
(Laser cladding. Ehsan Toyserkani, Amir Khajepour & Stephen Corbin)*

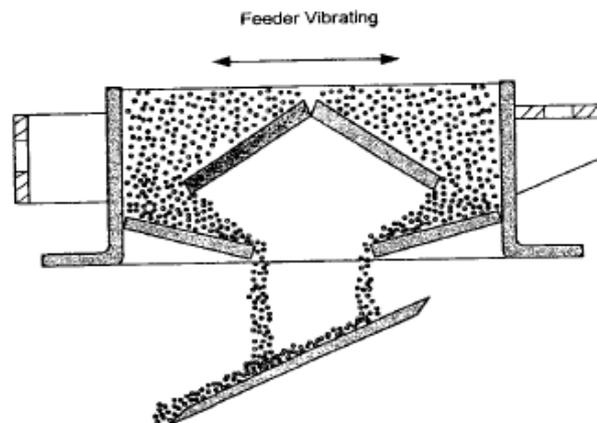
- **De lecho fluido:** opera basado en principios de fluídica, lo que elimina la necesidad de piezas mecánicas móviles para llevar el polvo. Estos alimentadores proporcionan una alimentación de polvo continua, asegurando de este modo un control óptimo por parte del usuario y revestimientos de mejor calidad. Otro beneficio es los costes de

mantenimiento y recambio de piezas. El sistema está diseñado de tal forma que una cantidad predeterminada de gas es llevado a una tolva cerrada que contiene el polvo. La tolva es construida de tal forma que el gas pasa a lo largo de un filtro localizado en el fondo de la misma, donde es difundido el polvo, causando que el polvo entre al gas y por lo tanto se fluidifique. Un tubo para recoger el polvo se sitúa sobre la entrada de gas fluidizado permitiendo que el medio fluidizado sea llevado bajo un almacén sobre el tubo y a través de un número de aperturas controladas y luego a un área de carga donde es propulsado por el gas portador hasta la manguera de alimentación.



*Figura 44: Esquema de un alimentador de polvo de lecho fluido.
(Laser cladding. Ehsan Toyserkani, Amir Khajepour & Stephen Corbin)*

- **Vibratorios:** consisten en una bandeja con fondo plano. A medida que el polvo fluye desde la tolva de salida a la bandeja, un mecanismo externo vibra la bandeja, mandando el polvo abajo para controlar el ratio de alimentación de polvo que entra al proceso. Para controlar la precisión, los alimentadores de polvo vibratorios pueden consistir en una bandeja vibradora con un número de platos dispuestos con un ángulo específico. Teniendo estos platos, la mayoría del flujo de polvo puede ser controlado.



*Figura 45: Esquema de un alimentador de polvo vibratorio.
(Laser cladding. Ehsan Toyserkani, Amir Khajepour & Stephen Corbin)*

En algunos alimentadores de polvo, se usa una combinación de los anteriores métodos para llegar a una mejor estabilidad en la corriente de polvo.

Hasta ahora, diferentes tipos de alimentadores de polvo se han usado en procesos de láser cladding. Sin embargo, es difícil decir qué tipo de alimentador es el más adecuado para este proceso. Debido al amplio rango de aplicaciones del láser cladding, diferentes polvos, con diferentes tamaños y diferentes ratios de alimentación son requeridos para el proceso. Muchos equipos de investigación, que desarrollan aparatos de láser cladding, han diseñado y fabricado sus propios alimentadores, los cuales se adaptan a sus necesidades.

Como se mencionó, es imposible llevar todo el polvo con un flujo continuo usando una única máquina de alimentación. Como resultado, varios tipos de alimentadores de polvo se han desarrollado para proveer al láser cladding del flujo continuo y fluido con los ratios de flujo requeridos.

4.2.2.3.2. Boquillas.

En el láser cladding por aporte de polvo, las boquillas para el aporte de polvo pueden tener diferentes configuraciones como:

- Coaxial.
- Lateral.

El suministro coaxial de polvo puede ser integrado con el sistema óptico. Una de las ventajas de la boquilla coaxial es su independencia de la dirección del movimiento; sin embargo, trabajos experimentales han mostrado que la eficiencia de su polvo, el cual es el ratio entre el polvo depositado en el sustrato y el polvo aportado por el alimentador de polvo en un periodo específico, es significativamente menor que el de las boquillas laterales. En ambos tipos, el

polvo puede ser precalentado cuando pasa a través de la boquilla para aumentar la eficiencia.

Varias formas para boquillas se han inventado basándose en las dos boquillas mencionadas anteriormente.

Las interacciones de las partículas de polvo, el haz laser y el gas inerte con la mezcla fundida son parámetros importantes para llegar a un cordón de buena calidad. Las interacciones de las partículas de polvo con diferentes superficies en la zona de proceso pueden dar lugar a diferentes fenómenos como:

- El impacto de partículas sólidas con la superficie sólida causa un rebote.
- Partículas sólidas o líquidas con superficie líquida de la piscina fundida causando captación.
- Partículas líquidas con superficies sólidas causando captación.

El tipo de boquilla, el ángulo de la corriente de polvo con respecto a la línea de referencia, el perfil de polvo en la zona de proceso, y el diámetro de la corriente de polvo en el área de la piscina fundida influirá en la interacción de las partículas de polvo con las superficies. Una boquilla apropiada es la que provee el mínimo de partículas de sólido con las superficies sólidas. Minimizar el impacto entre las partículas sólidas y las superficies sólidas incrementa la eficiencia de captación de polvo.

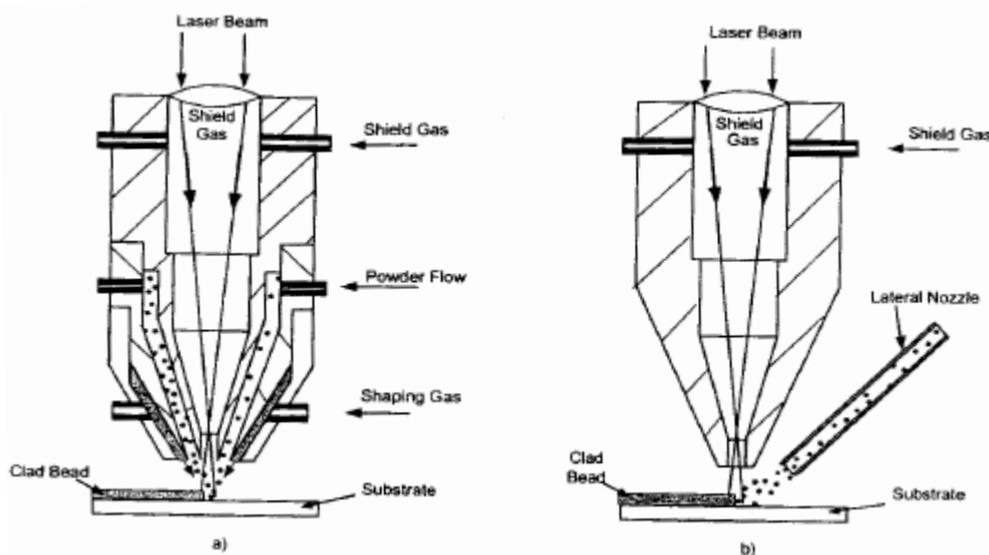


Figura 46: a) Boquilla coaxial. b) Boquilla lateral
(Laser cladding. Ehsan Toyserkani, Amir Khajepour & Stephen Corbin)

4.2.2.4. Mecanismos de posicionamiento.

El láser cladding puede usarse para una variedad de aplicaciones, tales como el prototipado rápido, recubrimientos y reparaciones. Para todas estas aplicaciones, se necesita un modelo sólido de la pieza deseada. Este modelo

debería ser luego partido por un programa de CAM (*Computer Aided Manufacturing*) basado en un algoritmo de estudio de la trayectoria para identificar los caminos requeridos para la fabricación o recubrimiento de la pieza deseada. Un mecanismo de posicionamiento debería proveer no sólo el suficiente espacio de trabajo y maniobrabilidad para los caminos requeridos sino proporcionar la velocidad apropiada, la cual es un parámetro de proceso de suma importancia.

El mecanismo de posicionamiento puede ser una tabla CNC (Control Numérico Computerizado) o un robot manipulador multi-DOF (*Degrees Of Freedom*). En ambos casos, las restricciones dinámicas deberían ser cuidadosamente consideradas para llegar a las velocidades y aceleraciones deseadas en diferentes puntos de la trayectoria. También, en el caso del robot, la singularidad de las uniones del robot es otra restricción importante para el desarrollo de la trayectoria deseada. La singularidad sucederá si una o más de las uniones no representan variables de control independientes, causando una limitación en el espacio de trabajo del robot. Como resultado, la fabricación de una forma compleja usando láser cladding, donde un robot es seleccionado como mecanismo de posicionamiento, depende fuertemente de los grados de libertad y la cinemática del robot seleccionado.

En general, el número de grados de libertad juega un papel importante en el mecanismo de posicionamiento usado en láser cladding. En la fabricación de formas complejas es necesario depositar el estrato de forma no plana. Dicho esto, el mayor grado de libertad proporciona la capacidad de movimiento no plano.

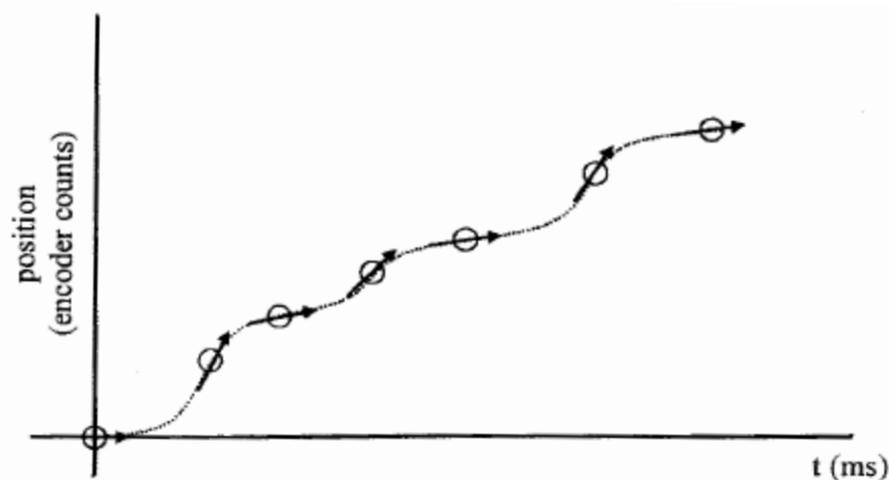
La velocidad de proceso del láser cladding varía desde 1 mm/s hasta los 20 mm/s basado en la potencia láser y el ratio de alimentación de polvo disponible. Como resultado, la dinámica de cualquier mecanismo de posicionamiento seleccionado para el proceso debería coincidir con el rango de velocidades deseado.

En la fabricación de piezas, las trayectorias de los caminos son extraídas a través de programas de CAD/CAM (*Computer Aided Design/Computer Aided Manufacturing*). Este programa proporciona una secuencia discreta de puntos representando los caminos deseados, los cuales son luego insertados en el controlador de movimiento. Como resultado, un mecanismo de posicionamiento debería ser controlado a través de un modo de control punto a punto (*Point-To-Point*, PTP), mientras la velocidad sea sintonizable en cualquier momento del movimiento. Este método de control puede tener problemas con el movimiento oscilatorio. Para superar el movimiento oscilatorio, se han desarrollado muchos algoritmos de movimiento diferentes. Por ejemplo, un perfil de velocidad trapezoidal es usado en un algoritmo altamente eficiente. La inclinación de tal curva en el desnivel inicial y final son la aceleración y deceleración máxima. El

nivel superior del trapecio es la velocidad máxima. Este tipo de perfil da una aceleración continua, pero puede haber sacudidas en el movimiento. El algoritmo, el cual está basado en la velocidad trapezoidal, se llama PVT (Posición, Velocidad y Tiempo). Este algoritmo está basado en una trayectoria a lo largo del tiempo polinómica de segundo grado.

En el proceso de láser cladding, la velocidad es una variable independiente del tiempo. Este problema surge del hecho de que la velocidad de proceso debería cambiarse durante el proceso de láser cladding para superar la influencia de perturbaciones en el proceso. Sin embargo, los cambios en la velocidad del proceso no deberían afectar a la trayectoria pre-especificada.

Este tipo de movimiento resulta en infinitas soluciones. Como resultado, se necesita emplear un método de aproximación. Una posible aproximación o restricción del movimiento del sistema es tener una aceleración constante entre puntos consecutivos. Usando interpolación a trozos, se puede dar una trayectoria factible en términos de series de polinomios de segundo grado como $p_1(t)$, $p_2(t)$, $p_3(t)$, etc.



*Figura 47: Una típica trayectoria de velocidad-posición.
(Laser cladding. Ehsan Toyserkani, Amir Khajepour & Stephen Corbin)*

Asumiendo que los términos están en un polinomio de segundo grado, la trayectoria puede ser representada como:

$$p(t) = at^2 + bt + c$$

Por lo tanto, la velocidad será:

$$v(t) = 2at + b$$

donde a , b y c son coeficientes constantes. Teniendo las posiciones y velocidades en el instante inicial (t_0) y en t_1 (lo cual representa dos puntos

sucesivos) proporciona cuatro ecuaciones, las cuales son suficientes para obtener las cuatro incógnitas a , b , c y t_1 .

Desarrollando iterativamente el análisis anterior para todos los puntos de posición-velocidad se obtendrá una trayectoria con una velocidad suave.

4.2.2.4.1. Sistema CAD/CAM para generación de trayectoria.

Como otros procesos de prototipado rápido, el láser cladding es una forma de fabricar un objeto tridimensional diseñado con software CAD (*“Computer Aided Design”*, Diseño Asistido por Computadora). La mayoría de los procesos de prototipado existentes son adaptados a tecnologías de corte, en las cuales un modelo CAD es representado por unos estratos planos y finos. En muchos métodos de fabricación por capas, como la estereolitografía, todos los puntos en cada estrato son depositados en proceso de crecimiento en un solo paso; sin embargo, en prototipado por láser cladding, cada trozo de estrato debería ser recortado en caminos, los cuales representan la trayectoria del actuador final.

Dentro de los formatos empleados en CAD para el desarrollo de objetos 3D, los más populares son IGES, SAT, DXF, STP y STL.

- **IGES (*“Initial Exchange Specification”*)**: es un standard de ANSI que define archivos de formato neutral para el intercambio de diseños o modelos CAD en diferentes programas de CAD. IGES no soporta modelos sólidos. Aunque los archivos IGES pueden ser relativamente grandes, se comprimen muy bien.
- **SAT (*“Standard ACIS Text”*)**: también llamado ACIS. Es soportado por muchos programas de modelado sólido. SAT puede almacenar información de modelado en archivos externos. Estos archivos tienen un formato abierto de tal forma que aplicaciones externas, incluso aquellas no basadas en ACIS, pueden tener acceso a modelos geométricos en ACIS, siendo ésta una de las principales ventajas de este formato. Los archivos SAT son archivos de texto ASCII que se pueden ver en un simple editor de texto. Un archivo SAT contiene retornos de carro, espacios en blanco y otros formatos que los hacen legibles al ojo humano. Así como con otros traductores sólidos, el traductor SAT no incluye el árbol de historial, que es usado para crear el modelo sólido.
- **DXF (*“Drawing Exchange Format”*)**: es propiedad de la compañía AutoCAD. DXF es probablemente uno de los formatos de vectores con soporte más amplio actualmente en el mundo. Los archivos DXF son relativamente fáciles de analizar dado que están etiquetados y basados en texto, y además legible para los humanos. El que los datos estén etiquetados significa que cada dato en el archivo está precedido por un número entero llamado código de grupo. El valor de un código de grupo indica qué tipo de dato sigue. Este valor también indica el significado de

un dato para un objeto (o registro) dado. Prácticamente toda la información especificada por el usuario en un archivo de diseño puede representarse en formato DXF.

- **STP (“STEP”)**: es un formato emergente. No sólo incluye puntos de dibujo, facetas y geometría, sino una gran cantidad de información de mecanizado, incluyendo el modelo, el material e información de herramientas. Aunque se espera que este formato sea más ampliamente usado en el futuro, no es tan usado como otros formatos como IGES. Además, la mayoría de paquetes de programas que emplean archivos STP no producen toda la información asociada que el STP necesita.
- **STL (“Stereolitografía”)**: es un archivo en ASCII o binario usado en manufactura. Es una lista de superficies triangulares que describen un modelo sólido generado por ordenador. Está compuesto de facetas de datos triangulares que representan formas en 2D y 3D. Esta es la entrada estándar para la mayoría de máquinas de prototipado rápido. Aunque los archivos STL representan formas en 3D, realmente no contienen la superficie o los datos del modelo sólido. Además los archivos STL pueden ser muy grandes si se requiere una tolerancia pequeña.

Entre los formatos mencionados, los formatos STL han sido ampliamente adaptados con fabricación por capas. Un archivo STL consiste en una lista de datos de faceta. Cada faceta está únicamente identificada por una unidad normal (una línea perpendicular al triángulo y con una longitud de 1.0) y por tres vértices (esquinas). La normal y cada vértice están especificados por tres coordenadas cada uno, por lo que hay un total de 12 números almacenados para cada faceta.

4.2.2.4.2. Tecnología de corte.

La tecnología de corte está diseñada para cubrir las necesidades de las tecnologías de fabricación por capas. Varios algoritmos de planificación de trayectoria han sido desarrollados para producir los caminos requeridos. En muchos de ellos, a pesar de la parte de la geometría o del proceso empleados para producir la pieza, el espesor de la capa permanece constante. Con esta estrategia, un modelo sólido dado es cortado horizontalmente en un conjunto de capas planas, y estas capas planas son luego montadas una por una de abajo hacia arriba. En este caso, planear la secuencia de montaje de un modelo dado no es más que listar las capas cortadas a lo largo de la dirección de montaje, que es sencillo y fácilmente automatizable. Sin embargo, varios problemas limitan la aplicación de esta tecnología. Primero, las piezas construidas por esta tecnología generalmente muestran pasos de escalera en los alrededores del contacto capa-capa, como se ve en la Figura 48. Esta falta de continuidad en la superficie de las piezas es indeseable especialmente para piezas hechas de materiales cerámicos, porque cada paso de escalera puede ser un punto de inicio de grieta. Además, las propiedades mecánicas de las piezas se verán

afectadas por las uniones entre los pasos de escalera. Se ha descubierto que reduciendo el número de capas mediante el aumento del intervalo de corte se pueden mejorar las propiedades mecánicas. Sin embargo, la superficie pulida de las piezas fabricadas se puede volver peor a medida que el intervalo entre capas se vuelve mayor. Como consecuencia, se tiene que alcanzar una solución de compromiso en cada caso.

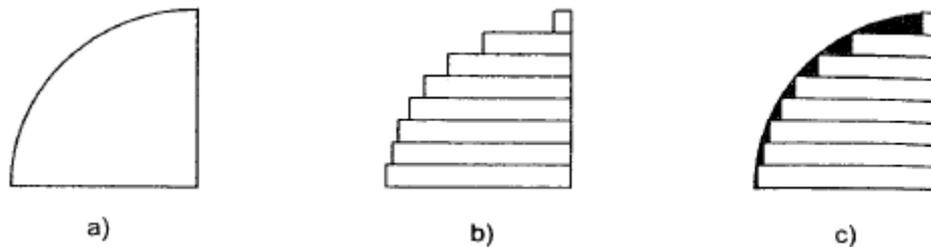


Figura 48: a) Modelo sólido deseado. b) Parte estratificada. c) Error de estratificación.

(Laser cladding. Ehsan Toyserkani, Amir Khajepour & Stephen Corbin)

Cortar las capas con un grosor fijo normalmente no se ajusta a la geometría de la pieza, además, el grosor de la capa puede cambiarse manualmente, lo cual aumenta el tiempo de producción y sacrifica la calidad de la pieza. Como resultado, los investigadores han desarrollado algoritmos que permiten adaptar el grosor del corte como una función de la geometría del modelo CAD y el proceso usado para fabricar la pieza. Este método se llama tecnología de corte adaptado. Incorporando la geometría (la curvatura y la pendiente) de la pieza con las características de configuración del proceso, el grosor óptimo del corte es seleccionado automáticamente. Uniendo estas características, el grosor óptimo de corte es seleccionado automáticamente sin intervención humana. En el uso del algoritmo, la textura de la superficie puede ser controlada, se reduce el tiempo de producción, se incrementa la calidad de la pieza y el proceso de corte se vuelve más eficiente.

En láser cladding, la generación del camino de deposición es dependiente de la naturaleza del proceso de deposición. La deposición de caminos en cada capa que tenga un recubrimiento homogéneamente y bien distribuido es de alguna forma independiente de la complejidad geométrica. Además, las propiedades del material depositado están influidas por la trayectoria del camino de deposición. A pesar de que es importante desarrollar un camino planificado para reducir el efecto del camino en las características mecánicas y metalúrgicas de las piezas. Además, uno de los factores que limita la calidad de las piezas en láser cladding es la acumulación de estrés térmico residual. Podría reducirse este efecto seleccionando un camino de deposición apropiado.

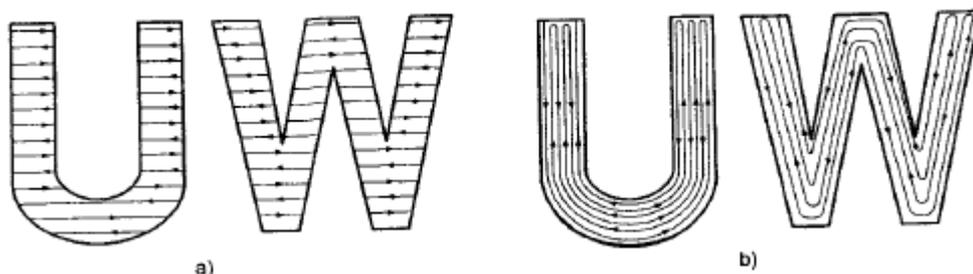
En general, varios factores afectarán al tipo de camino de deposición, los cuales son:

- **Estrés térmico:** el estrés térmico se acumula si hay un calentamiento desigual en la superficie. Por lo tanto, si el camino de deposición no es simétrico, aparecerá estrés térmico.
- **Número de pistas de recubrimiento:** si hay muchas pistas de deposición discontinuas, el obturador láser debería cambiar ON y OFF entre diferentes pistas. Es deseable reducir el número de activaciones del obturador en el proceso.
- **Robustez:** los caminos de deposición deberían ser lo bastante robustos para para ser generados sin importar la complejidad de la geometría.
- **Deposición de material no planar:** volver a depositar los mismos puntos en el camino debería evitarse ya que esto resultaría en deposición de material extra causando el recalentamiento asociado. Por lo tanto, un recubrimiento no planar puede superar este inconveniente, especialmente para la fabricación de formas curvas.
- **Sin brechas en el camino:** el tener brechas resultará en piezas de poca calidad. Como resultado, el camino de deposición debería ser tan continuo como sea posible.

Los ítems anteriores hacen de la generación del camino de deposición un problema más constreñido comparado con la fabricación por corte habitual y por lo tanto requiere un enfoque diferente. Los caminos de deposición son generados por la sección cruzada 2D obtenida por la proyección del objeto en el plano XY. Estas secciones cruzadas tienen que estar dispuestas a una cierta distancia antes de generar los caminos de deposición.

Los caminos de deposición se clasifican en dos tipos:

- **Caminos en zigzag:** las pistas del camino se corresponden con movimientos adelante y atrás en una dirección fija sin la limitación de la sección cruzada en 2D.
- **Caminos en espiral:** el camino comprende una serie de contornos que son paralelos al límite de la sección cruzada en 2D.



*Figura 49: Diferentes trayectorias patrón para la fabricación de un logo (UW): a) camino en zigzag, b) camino en espiral.
(Laser cladding. Ehsan Toyserkani, Amir Khajepour & Stephen Corbin)*

Es posible llegar a varios patrones de caminos de deposición desde estas dos clases. Algunos grupos de investigación han investigado la influencia de estas dos clases de caminos en la microestructura del producto final. Por ejemplo, se observó que el nivel de poros/vacantes puede ser contenido con diseños apropiados del camino de deposición de la herramienta. Mostraron que el nivel de poros/vacantes puede incrementarse especialmente en el caso de herramientas con caminos en zigzag-xy. Eso es debido a las superficies irregulares causadas por la pista del recubrimiento.

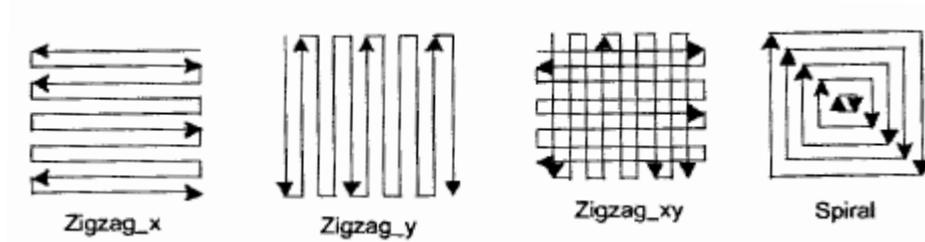


Figura 50: Diferentes patrones de caminos para herramientas empleados en la fabricación de un componente cúbico.

(Laser cladding. Ehsan Toyserkani, Amir Khajepour & Stephen Corbin)

4.2.3. Operación.

Básicamente hay dos diferentes técnicas de láser cladding, que son las siguientes:

1. Procesos en dos pasos (láser cladding predepositado).
2. Procesos de un solo paso.

En el proceso en dos pasos, la primera etapa consiste en un estrato de material de recubrimiento depositado previamente a la irradiación láser. Es luego fundido con el material sustrato por el haz láser en la segunda etapa (Figura 51 a)).

En los procesos de un solo paso, un material aditivo es alimentado en la mezcla fundida. El material aditivo puede ser suministrado de las formas siguientes:

- Inyección de polvo.
- Aporte por hilo.

➤ Pegado.

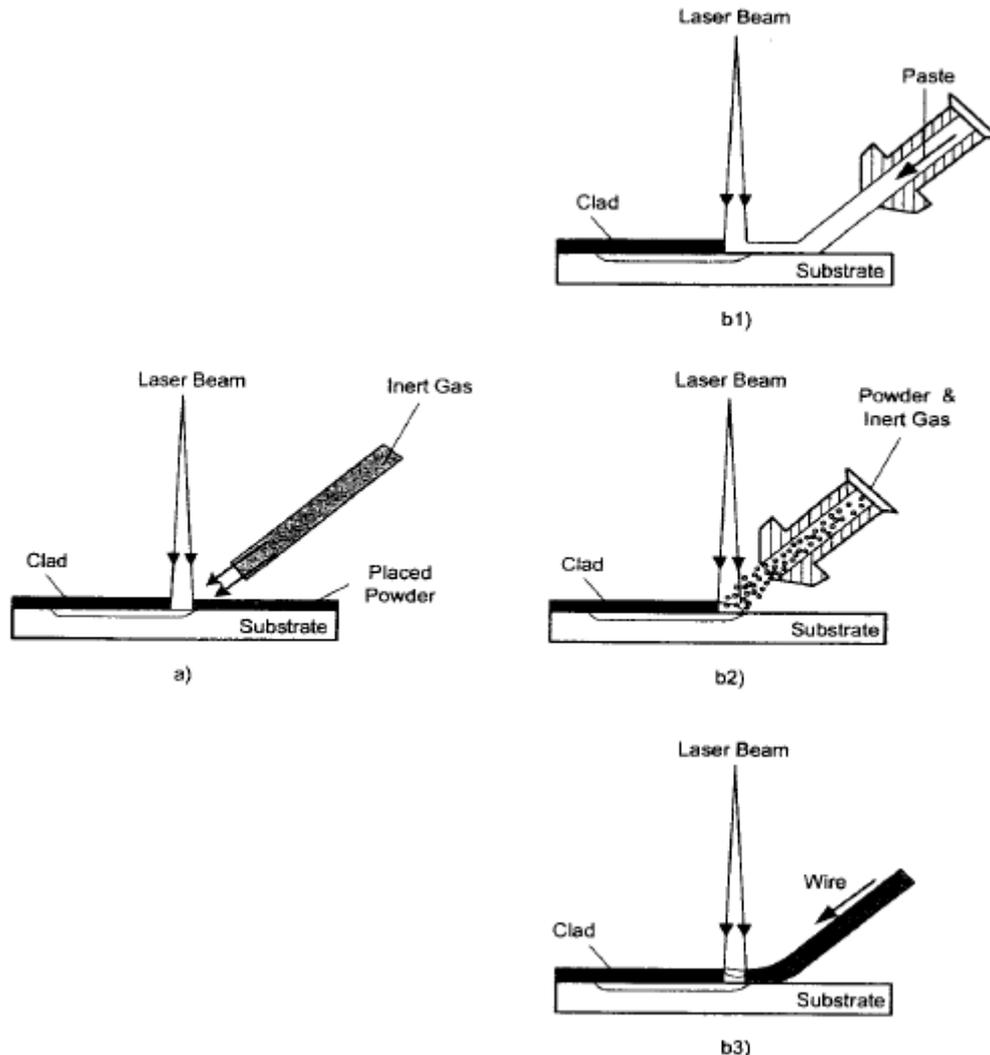


Figura 51: Diferentes métodos de láser cladding: a) láser cladding en dos pasos, b) láser cladding en un paso, incluyendo b1) láser cladding por pegado, b2) láser cladding por aporte de polvo, b3) láser cladding por aporte de hilo. (Láser cladding. Ehsan Toyserkani, Amir Khajepour & Stephen Corbin)

El láser cladding por aporte de polvo es un método más robusto que el de aporte por hilo y el pegado, porque no hay contacto directo con la mezcla fundida, y el haz láser puede pasar a través de la corriente de partículas de polvo en lugar de ser obstruido por el hilo o el adhesivo.

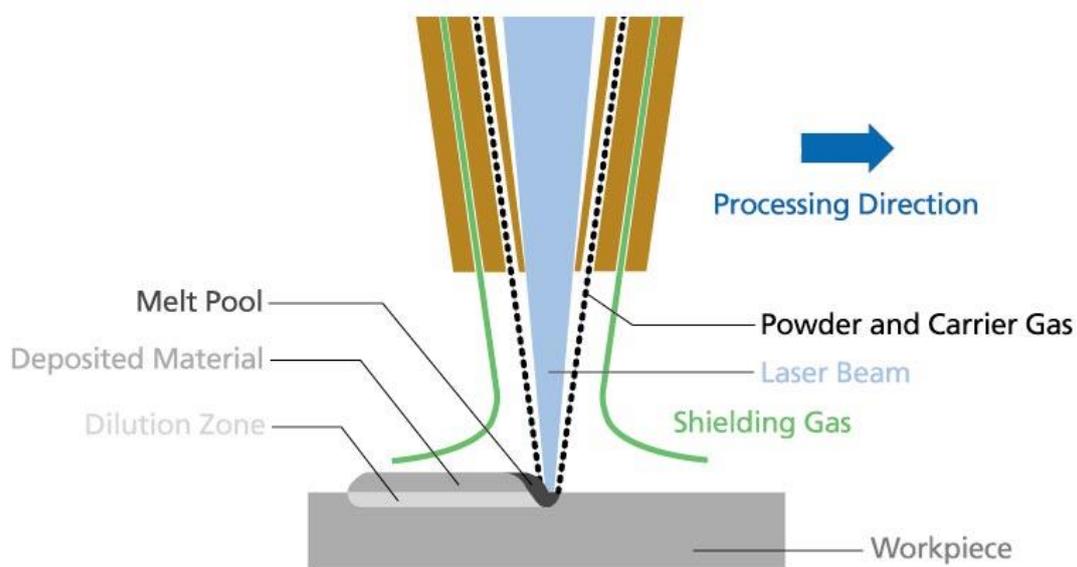
4.2.3.1. Láser cladding en dos pasos (láser cladding predepositado).

El láser cladding predepositado es un sencillo método usado para recubrimientos y prototipado. Varios factores están involucrados en el proceso. Las partículas de polvo predepositadas sobre el sustrato deben tener no sólo suficiente cohesión con el sustrato, sino que también suficiente cohesión entre ellas. Es

necesario prevenir que las partículas de polvo sobre el sustrato se remuevan debido al flujo de gas durante la fusión en el segundo paso del proceso. Para superar este problema, el polvo es mezclado normalmente con un aglutinante químico para asegurar la cohesión con el sustrato durante el proceso. El efecto secundario del aglutinante químico es la porosidad en el recubrimiento debido a su evaporación durante el proceso.

En el segundo paso del proceso ocurren los siguientes fenómenos:

1. Creación de una mezcla fundida en la superficie superior del polvo predepositado debido a la radiación del haz láser.
2. Expansión de la piscina fundida a la interfaz con el sustrato debido a la conducción de calor.
3. Penetración de calor al sustrato causando una unión fundida.



*Figura 52: Esquema del proceso de aporte de polvo.
(Laser cladding. Ehsan Toyserkani, Amir Khajepour & Stephen Corbin)*

El control del calor es un factor muy importante en este método para prevenir la alta dilución. La dilución se considera el porcentaje de mezcla del sustrato en la región recubierta. Este problema es uno de los más importantes defectos del láser cladding en dos pasos que normalmente limita el proceso a cladding de una sola trayectoria.

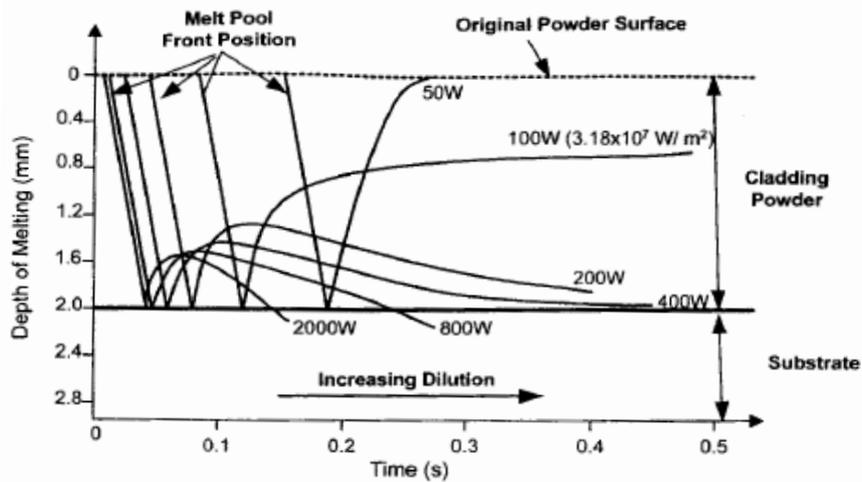


Figura 53: Desplazamiento del frente fundido con respecto a la interacción con diferentes potencias láser a lo largo del tiempo, cuando el radio del haz es de 1 mm.

(Laser cladding. Ehsan Toyserkani, Amir Khajepour & Stephen Corbin)

4.2.3.2. Láser cladding en un solo paso.

Como se mencionó anteriormente el láser cladding en un solo paso puede clasificarse en tres métodos: aporte de polvo, aporte de hilo y pegado. La característica común de los tres métodos es la alimentación de material depositado en presencia de láser.

4.2.3.2.1. Láser cladding por aporte de polvo.

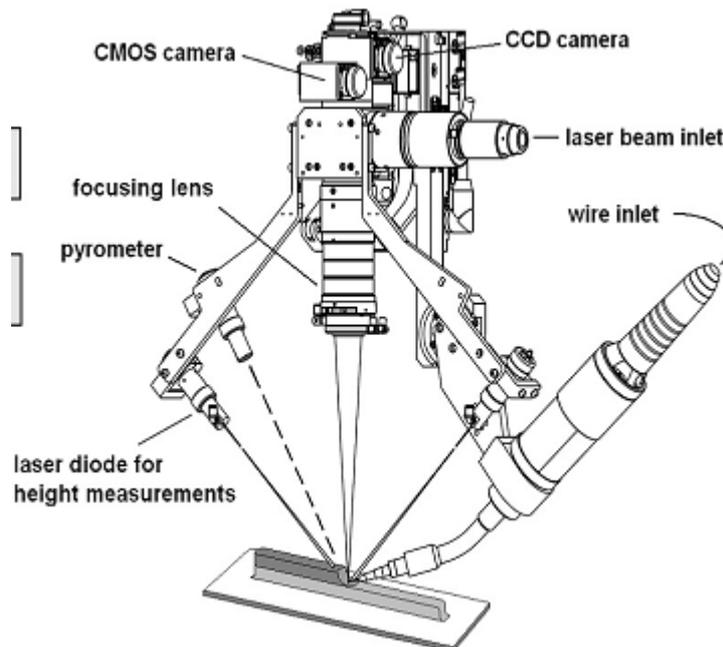
Las partículas de polvo son aportadas a la zona caliente para producir un estrato de recubrimiento. En este proceso, se procede de manera simultánea a la fusión del sustrato y al aporte del recubrimiento en forma de polvo, que es transportado por un gas inerte y proyectado sobre la superficie fundida por donde pasa el haz láser, siendo a su vez fundido por el mismo.

Esta técnica es más robusta que el láser cladding en dos pasos y permite geometrías más complejas; sin embargo, requiere controlar parámetros adicionales tales como la forma y dirección de proyección del haz de polvo que puede ser coaxial respecto al haz láser u oblicua.

4.2.3.2.2. Láser cladding por aporte de hilo.

En este proceso la idea básica es usar un hilo en lugar de polvo. El hilo es normalmente aportado a través de un bidón cerámico que contiene el hilo del material deseado. Debido a la naturaleza de los mecanismos de aporte, es esencial usar un hilo que haya sido enderezado y conservado sin deformación plástica para asegurar un transporte estable sin vibraciones. Comparado al láser cladding por aporte de polvo, puede presentar algunas ventajas especiales. Una de sus ventajas más importantes es su adaptación a la posición del

recubrimiento. Los hilos metálicos son más baratos que los polvos metálicos y además aportar hilo desperdicia menos material que aportar polvo. En contraste, la baja calidad superficial, la débil unión, la porosidad, grietas y la disminución de la transferencia de calor son algunos de los problemas del recubrimiento por hilo. El líquido fundido al final del hilo no fluye de forma pareja y continua sobre la pieza de trabajo, lo que se denomina fenómeno de disminución de transferencia. Seleccionando la posición y dirección adecuadas del aporte de hilo, la disminución de transferencia puede ser solucionada. En este caso, el hilo puede ser sumergido en la mezcla fundida y fundirse por el calor del metal fundido. Sin embargo, un proceso exitoso depende en gran medida de los parámetros del proceso, y en la presencia de alteraciones la calidad del recubrimiento desciende dramáticamente.



*Figura 54: Láser cladding por aporte de hilo.
(Laser cladding. Ehsan Toyserkani, Amir Khajepour & Stephen Corbin)*

4.2.3.2.3. Láser cladding por pegado.

En el láser cladding por pegado, una corriente de material adhesivo ligado es depositada en un punto del sustrato que está normalmente un poco adelante del haz láser. El adhesivo consiste de polvo con un aglutinante adecuado. Sin embargo, el aglutinante debe secarse en poco tiempo mientras el material se mantiene compacto; de otra forma las partículas de polvo son arrastradas por el gas.

La forma del adhesivo en el sustrato es controlado por el ratio de alimentación del adhesivo y la velocidad del sustrato. Para tener un recubrimiento de buena calidad, es esencial optimizar estos parámetros. Un suministro pobre de adhesivo o una velocidad de proceso demasiado alta causa una gran dilución y poca altura de la trayectoria si la energía del láser se mantiene constante. Un exceso de adhesivo en el sustrato incrementa la formación de poros ya que la evaporación del aglutinante es inhibida, e incrementa la pérdida de material adhesivo.

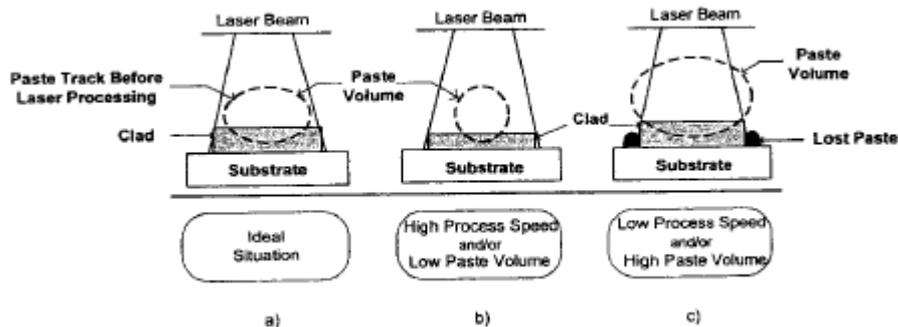


Figura 55: Efecto de la velocidad del proceso y el ratio de aporte del adhesivo en la calidad del recubrimiento.

(Laser cladding. Ehsan Toyserkani, Amir Khajepour & Stephen Corbin)

La alta porosidad, la extrema sensibilidad del proceso a las perturbaciones y las dificultades en los mecanismos de aporte del adhesivo son los principales impedimentos del láser cladding por pegado.

4.2.4. Variantes.

Añadir polvo a la zona fundida puede crear tres diferentes resultados dependiendo del tipo y cantidad de material añadido. Así, se tendrían tres resultados: láser cladding, acristalamiento por láser y aleación por láser.

En la aleación por láser, una pequeña cantidad de polvo es aportado a la zona fundida. Como mucho, se puede obtener una zona de mezcla homogénea a lo largo de la región. El láser cladding recuerda a la aleación por láser excepto en que la dilución por el sustrato se mantiene a un mínimo y se requiere más adición de material a la superficie. En el acristalamiento por láser, un recubrimiento de cristales metálicos es depositado para proporcionar una superficie de contorno efectiva al clima y a la corrosión. La principal ventaja del acristalamiento por láser es que altera las microestructuras sin alterar la composición.

Usando láser cladding, se pueden conseguir las siguientes ventajas comparado con otros procesamientos superficiales de materiales.

1. Reducida dilución, que es el porcentaje de mezcla del sustrato en la región del cordón (comparada con la aleación por láser).
2. Mejor resistencia al clima.

3. Reducida distorsión térmica.
4. Reducida porosidad, particularmente en el láser cladding por aporte de polvo.
5. Mejor control del proceso.
6. Reducido tiempo y coste de mecanizado post-cladding.

4.2.5. Ventajas e inconvenientes.

El láser cladding ofrece muchas ventajas sobre procesos de recubrimiento convencionales como lo son la soldadura por arco o la proyección de plasma. La técnica de láser cladding puede producir un mejor recubrimiento, minimizando la dilución y la distorsión de la superficie.

Además presenta una serie de ventajas como técnica de prototipado: una estructura homogénea, mejores propiedades mecánicas y producción de geometrías complejas en un solo paso. Las piezas fabricadas usando esta técnica tienen forma casi limpia pero generalmente requerirán un mecanizado final. También tienen buena estructura granular, teniendo propiedades similares y, en ocasiones, mejores que las de los materiales intrínsecos. Tanto el láser cladding por aporte de polvo como el pre-depositado ofrecen estas características; sin embargo, el láser cladding por aporte de polvo tiene menos limitaciones materiales que el pre-depositado con lo que no se necesita de operaciones secundarias de laminado de polvo y puede ser usado para reparar piezas además de fabricarlas.

El láser cladding puede ser aplicado de muchas formas a piezas, herramientas y fabricación para superar las limitaciones de las tecnologías metálicas de fabricación existentes. Esto resulta en beneficios como los siguientes:

1. **Reducción del tiempo de fabricación:** el proceso de láser cladding puede reducir los tiempos fabricando herramientas y prototipos partiendo directamente del modelo sólido en CAD.
2. **Mejora del control térmico:** debido a la naturaleza del haz láser se controla mucho mejor la zona sometida a calor. Un haz láser de alta potencia puede aplicarse en un área reducida dando como resultado que el calentamiento y enfriamiento rápidos que ocurren en el proceso tengan reducido impacto en la base del material. Además de que las propiedades originales del material se ven afectadas sólo hasta cierto punto. Además, esta zona térmica puede ser monitorizada y optimizada durante el proceso, lo que puede mejorar significativamente la calidad de las piezas producidas. El láser cladding también permite controlar la energía aportada sobre la superficie de la herramienta controlando la velocidad de solidificación, que es el parámetro principal en la formación de la microestructura y de las propiedades mecánicas.

3. **Reparación de piezas:** las tecnologías actuales para la reparación de herramientas emplean procesos destructivos como los procedimientos de soldadura a alta temperatura. El láser cladding puede ser empleado para la reparación de herramientas, especialmente en superficies de contacto críticas. El láser cladding incrementa el tiempo de vida de la herramienta y en muchos casos puede salvar herramientas de alto valor que de otro modo habrían tenido que ser sustituidas.
4. **Producción de piezas graduadas funcionales:** en la fabricación convencional empleando metales, es difícil producir una pieza de diferentes capas de materiales. El láser cladding permite producir piezas graduadas funcionales mediante la inyección de diferentes materiales durante la fabricación de las piezas. También es posible producir aleaciones mediante el aporte de diferentes polvos a través de varios inyectores alrededor de la zona de proceso.
5. **Producción de estructuras inteligentes:** en los métodos convencionales de fabricación con metales, incrustar objetos en las herramientas es imposible debido a la naturaleza de la fabricación. El láser cladding, gracias a su naturaleza aditiva, ofrece la posibilidad de crear “estructuras inteligentes” mediante la incrustación de sensores e imanes durante la fabricación. Encapsular estos objetos reduce los riesgos de daño o fallo por condiciones ambientales o de temperatura.

A pesar de sus ventajas, el láser cladding no es ampliamente utilizado en recubrimientos metálicos ni en prototipado. Mientras que ofrece un gran número de ventajas sobre procesos convencionales, también presenta una serie de inconvenientes. Debido a perturbaciones durante el proceso, la calidad del recubrimiento puede variar significativamente. Estas variaciones en la calidad pueden ser observadas entre ciclos de proceso llevados a cabo usando las mismas condiciones de operación. Esta pobre reproductibilidad proviene de la alta sensibilidad del láser cladding a pequeños cambios en los parámetros de operación tales como la potencia del láser, la velocidad del haz o la velocidad de aporte del polvo, así como perturbaciones en el proceso tales como variaciones en la absorptividad. Encontrar un conjunto óptimo de parámetros experimentales y usarlos en un proceso de láser cladding *open-loop* podría no resultar en un recubrimiento de buena calidad debido a las perturbaciones periódicas y aleatorias del sistema. El desarrollo de un sistema de control inteligente *closed-loop* es esencial para superar los efectos de las perturbaciones en el proceso.

Los altos costes de inversión, la baja eficiencia de las fuentes láser y la falta de control sobre el proceso de cladding son las desventajas de esta tecnología en procesos de recubrimiento y prototipado. Sin embargo, con las mejoras continuadas en diodos láser de alta potencia, láseres de fibra y sofisticados

controladores basados en el conocimiento, el proceso de láser cladding muestra un gran potencial industrial para ser usado en aplicaciones de prototipado y recubrimientos metálicos.

4.2.6. Aplicaciones y oportunidades de mercado.

Como se mencionó anteriormente el láser cladding tiene diversas aplicaciones. En los siguientes apartados se comentarán las principales aplicaciones que se le han dado por la industria y los equipos de investigación.

4.2.6.1. *Recubrimientos.*

Consiste en la deposición de una fina capa de material sobre la superficie de otro material seleccionado. Esto cambia las propiedades superficiales del estrato a las del material depositado. El sustrato se convierte en un material compuesto exhibiendo propiedades generalmente no alcanzables a través del uso de sólo el material sustrato. El recubrimiento proporciona una duradera capa resistente a la corrosión y el material del núcleo proporciona la capacidad de sostener la carga. Una gran variedad de metales como el cromo, el titanio, el níquel, el cobre o el cadmio pueden ser usados en recubrimientos metálicos.

Hay muchas técnicas de recubrimiento disponibles. Sin embargo, elegir la mejor depende de multitud de parámetros como el tamaño, la metalurgia del sustrato, la adaptabilidad del material a depositar a la técnica empleada, el nivel de adhesión requerido y la disponibilidad y precio del equipo.

Aunque el láser cladding tiene el potencial para ser empleado en diferentes áreas de la industria de recubrimientos metálicos, sus aplicaciones están limitadas debido al coste elevado y la lentitud del proceso. Con las mejoras continuadas en diodos láser de alta potencia, láseres de fibra y sofisticados controladores basados en el conocimiento el láser cladding superaría esas desventajas. Otra señal del potencial de esta técnica es el número de artículos publicados sobre el tema, que ha aumentado en los últimos años.

La mayoría de aplicaciones de los recubrimientos metálicos por láser cladding están en las industrias aeroespacial, médica y de automoción. Las aleaciones de titanio, cobalto y las superaleaciones de níquel son algunas de las aleaciones que son depositadas en sustratos de acero inoxidable, acero endurecido, aleaciones de aluminio...

Recientemente, recubrimientos biocerámicos fueron llevados a cabo sobre aleaciones de titanio mediante láser cladding; las partes recubiertas son usadas posteriormente en implantes ortopédicos con un estrato de fosfato cálcico con el objetivo de ayudar al crecimiento del hueso cuando el implante sea insertado en el cuerpo. El láser cladding junto a otras técnicas de tratamiento superficial por

láser se examinaron para la producción de capas de metal vítreo, que poseen mayor resistencia a la corrosión y el clima.

La aplicación comercial más destacable de los recubrimientos por láser cladding se da en las turbinas de gas de la aviación. El láser cladding ha sido recientemente usado en este campo para depositar materiales de gran resistencia y aguante a altas temperaturas en los cuerpos de las turbinas de las aeronaves. Con las recientes mejoras tecnológicas en los láseres de nueva generación se espera que la tecnología de láser cladding incremente su rol en esta industria.

Además, el láser cladding tiene otras aplicaciones en recubrimientos para piezas industriales produciendo superficies resistentes a la abrasión, la erosión, el desgaste adhesivo, la corrosión húmeda y la oxidación y corrosión a altas temperaturas. Algunos de los productos que han recibido recubrimientos metálicos mediante láser cladding son: ejes usados en herramientas de perforación, asientos de válvulas en motores, componentes de bombas hidráulicas, moldes, herramientas de recubrimiento duro...

4.2.6.2. Reparación de piezas y remodelación.

Una aplicación muy importante del láser cladding es la reparación y remodelación de componentes de gran valor tales como herramientas, palas de turbinas y componentes militares. El láser cladding puede ser usado para rescatar componentes de alto valor que han sido mecanizadas de nuevo debido a errores en el diseño o el proceso de mecanizado. Estos errores ingenieriles o de mecanizado pueden poner en peligro fácilmente todo el diseño y fabricación de herramientas o componentes de alto valor.

Los métodos convencionales usan la soldadura para recuperar estos componentes dañados; sin embargo, estos métodos normalmente son destructivos debido a la amplia distribución de la temperatura sobre el área a reparar. Esta destrucción térmica causa una pobre calidad mecánica, roturas, porosidad y un corto tiempo de vida del componente en cuestión. El láser cladding puede proveer de una reparación estructural permanente y de una remodelación de muchas aleaciones que generalmente se consideran no soldables por métodos convencionales. El láser cladding tiene la ventaja de que gracias a la pequeña zona a la que aplica calor se consiguen una rápida solidificación, mayor limpieza, menor dilución y mayor control.

Otra área en la que el láser cladding juega un papel importante es en la reparación y remodelación de palas de turbinas. Las palas de las turbinas están sometidas a estreses mecánicos y térmicos muy elevados en un ambiente agresivo. Las palas sufren una gran variedad de daños durante la operación de la turbina tales como deformación por fluencia lenta, fatiga del ciclo de vida,

corrosión a altas temperaturas, impactos de partículas externas en su superficie, etc. Además de eso, actualmente, en términos de necesidades de mantenimiento, dificultades de fabricación y precios, las palas son el componente más crítico en las turbinas de gas. Por lo tanto, las compañías de fabricación y mantenimiento de palas de turbina buscan tecnologías de reparación que además de reparar mejor las palas dañadas, mantengan las características mecánicas y metalúrgicas de los componentes reparados.

La propiedad del láser cladding que lo hace tan idóneo para reparación de componentes de motores a reacción es el reducido calor que emite. Para la reparación de estos componentes se requiere el depositar metales sobre superaleaciones, las cuales son muy vulnerables a distorsiones físicas y pérdidas de resistencia cuando son sometidas a variaciones excesivas de temperatura. Las técnicas de reparación convencionales como gas inerte de tungsteno, gas inerte metálico, soldadura por haz de electrones o plasma, causan normalmente grandes incrementos de temperatura en el cuerpo del componente al aplicar una gran cantidad de calor. El incremento de temperatura por encima de ciertos límites causa que la aleación base sea debilitada, lo que junto a la distorsión del componente puede dañar irremediablemente la pieza. En contraste, el láser cladding utiliza un haz láser de apenas 0,5 mm de diámetro. Con lo cual, el calor incidente es al menos un orden de magnitud menor que el que incidiría mediante soldadura convencional, con lo que se reduce el estrés residual y la distorsión además de ser menor la zona sometida a calor.

Un potencial mercado para el láser cladding sería en los motores de turbina. Estos están equipados con monocristales y componentes solidificados direccionalmente para conseguir óptimas eficiencias térmicas al tener las turbinas mayores temperaturas a la entrada. En algunos casos, el láser cladding está reconocido como la única tecnología de reparación en este campo debido a que las piezas orientadas aerodinámicamente son muy susceptibles de recristalización cuando están sujetas a un intenso calor, como sucedería con técnicas convencionales.

4.2.6.3. *Prototipado y estampación rápida.*

Una nueva aplicación muy importante del láser cladding es el prototipado rápido (*"Rapid Prototyping"*, RP) y la estampación rápida (*"Rapid Tooling"*, RT) para la fabricación rápida de componentes y herramientas complejos. La fabricación de herramientas tales como herramientas cortantes o moldes, que tradicionalmente han sido fabricados por habilidosos fabricantes de moldes y herramientas usando máquinas CNC y de descarga eléctrica, que siempre tuvieron problemas de costes y lentitud para los fabricantes. Si las herramientas son fabricadas tarde, las oportunidades de mercado se pierden, lo que supone la muerte del nuevo producto. Como resultado, la estampación rápida ha recibido atención en

los últimos años debido a que los fabricantes buscan nuevas tecnologías capaces de producir herramientas y componentes de alta integridad, buena calidad superficial y bajos costes de fabricación con un tiempo de fabricación reducido.

Las industrias de RT y RP mueven billones de dólares al año. Las empresas del sector buscan una máquina de prototipado metálico que pueda trabajar sin necesidad de personal altamente cualificado, pero que aun así sea lo bastante robusto como para dar productos de alta calidad.

Según estudios realizados el láser cladding podría reducir los tiempos muertos en la producción en torno a un 40 % además de reducir los pasos necesarios para la fabricación de muchos componentes. Un ejemplo de esto es la producción de herramientas médicas, el uso del láser cladding puede reducir de 62 a 7 el número de pasos necesarios para la fabricación.

La deposición directa de metal (*“Direct metal deposition”*, DMD) fue desarrollada para la fabricación de moldes así como la reparación de piezas usando el láser cladding. La amplia aplicación del DMD en los campos aeroespacial y médico es debido a su gran potencial para ahorrar costes.

4.2.7. Perspectivas futuras para el láser cladding.

Debido a las características tan prometedoras del láser cladding muchas industrias mantienen sus ojos puestos en él.

Los grupos de investigación y compañías involucradas en el desarrollo de esta tecnología canalizan sus esfuerzos en varias direcciones para resolver las actuales limitaciones de esta tecnología. El principal foco de investigación debería ser el desarrollo de máquinas autónomas para el proceso, que puedan no solo depositar una amplia variedad de aleaciones sino que puedan hacer formas complejas sin la necesidad de especialistas. El desarrollo de esta maquinaria requeriría la estrecha colaboración de especialistas de diversas disciplinas. El desarrollo de un controlador basado en el conocimiento para dicha máquina requiere de especialistas con conocimientos de control, automatización y metalurgia.

También sería necesario el investigar cómo incrementar la velocidad del proceso, ya que el proceso actual es lento comparado con técnicas competitivas tales como la pulverización térmica y de plasma. Las aplicaciones del láser cladding en la industria aeronáutica y los efectos del láser cladding en el sustrato también requieren de mayor investigación. La investigación del láser cladding y sus efectos en sus aplicaciones requiere de una comprensión del proceso y la relación entre la energía láser, la velocidad del proceso, la velocidad de aporte

del polvo, y las propiedades mecánicas y metalúrgicas. Además, se deberían dedicar esfuerzos al modelado del proceso.

En el mercado de reparación de palas de turbina, los clientes están buscando una máquina capaz de reparar la pala de la turbina in-situ, sin tener que quitar las palas del rotor. Para hacer, esto, es necesario desarrollar un sofisticado mecanismo de posicionamiento que permita la suficiente maniobrabilidad alrededor del rotor. El poder emplear el cladding en una superficie inclinada es también esencial para la reparación in-situ de las palas de una turbina.

En los últimos años, la micro y la nanotecnología han recibido mucha atención. Los científicos dicen que cualquier tecnología puede tener aplicación en micro y nanotecnología si puede ser miniaturizada de forma adecuada. Dicho esto, el láser cladding tiene la ventaja de favorecer estas innovadoras tecnologías ya que puede emplearse para la fabricación de la microestructura.

Recientemente se ha probado el láser cladding en la fabricación de piezas de brazos robóticos para aplicaciones en el espacio. Estas pruebas resultaron en la fabricación de componentes para brazos robóticos con excelentes propiedades mecánicas, lo que es una muestra significativa del potencial del láser cladding para la industria aeroespacial. Otra posible aplicación del láser cladding es que permitiría a los astronautas fabricar piezas de repuesto en el espacio. El láser cladding jugará en el futuro un importante papel en la industria aeroespacial.

Respecto a la industria manufacturera, se hace necesario un mayor número de profesionales altamente cualificados y con conocimientos multidisciplinares (láser, óptica, automatización, control, robótica...) para que el láser cladding así como otras técnicas vayan ganando cada vez más peso en la industria.

5. Método de elementos finitos: ANSYS.

El método de los elementos finitos (MEF) es un método numérico general para la aproximación de soluciones de ecuaciones diferenciales parciales muy utilizado en diversos problemas de ingeniería y física.

El MEF está pensado para ser usado en computadoras y permite resolver ecuaciones diferenciales asociadas a un problema físico sobre geometrías complicadas.

Ha adquirido una gran importancia en la solución de problemas ingenieriles, físicos, etc., ya que permite resolver casos que hasta hace poco tiempo eran prácticamente imposibles de resolver por métodos matemáticos tradicionales.

Esta circunstancia obligaba a realizar prototipos, ensayarlos e ir realizando mejoras de forma iterativa, lo que traía consigo un elevado coste tanto económico como en tiempo de desarrollo.

El MEF permite realizar un modelo matemático de cálculo del sistema real, más fácil y económico de modificar que un prototipo. Sin embargo no deja de ser un método aproximado de cálculo debido a las hipótesis básicas del método. Los prototipos, por lo tanto, siguen siendo necesarios, pero en menor número, ya que el primero puede acercarse bastante más al diseño óptimo.

El método de los elementos finitos como formulación matemática es relativamente nuevo; aunque su estructura básica es conocida desde hace bastante tiempo, en los últimos años ha sufrido un gran desarrollo debido a los avances informáticos. Han sido precisamente estos avances informáticos los que han puesto a disposición de los usuarios gran cantidad de programas que permiten realizar cálculos con elementos finitos. No obstante, el manejo correcto de este tipo de programas exige un profundo conocimiento no solo del material con el que se trabaja, sino también de los principios del MEF. Sólo en este caso se estará en condiciones de garantizar que los resultados obtenidos en los análisis se ajustan a la realidad.

5.1. Origen.

Aunque el nombre del MEF se ha establecido recientemente, el concepto se ha usado desde hace varios siglos. El empleo de métodos de discretizado espacial y temporal y la aproximación numérica para encontrar soluciones a problemas ingenieriles o físicos es conocido desde antiguo. El concepto de “elementos finitos” parte de esa idea.

Para encontrar vestigios de este tipo de cálculos podríamos remontarnos a la época de la construcción las pirámides egipcias. Los egipcios empleaban métodos de discretizado para determinar el volumen de las pirámides.

Arquímedes (287-212 a.C.) empleaba el mismo método para calcular el volumen de todo tipo de sólidos o la superficie de áreas.

El desarrollo de los elementos finitos tal y como se conocen hoy en día ha estado ligado al cálculo estructural fundamentalmente en el campo aeroespacial. En los años 40, Courant propone la utilización de funciones polinómicas para la formulación de problemas elásticos en subregiones triangulares, como un método especial del método variacional de Rayleigh-Ritz para aproximar soluciones.

Fueron Turner, Clough, Martin y Topp quienes presentaron el MEF en la forma aceptada hoy en día. En su trabajo introdujeron la aplicación de elementos finitos simples (barras y placas triangulares con cargas en su plano) al análisis de estructuras aeronáuticas, utilizando los conceptos de discretizado y funciones de forma.

El trabajo de revisión de Oden presenta algunas de las contribuciones matemáticas importantes al MEF. Los libros de Przemieniecki y de Zienkiewicz y Holister presentan el MEF en su aplicación al análisis estructural. El libro de Zienkiewicz y Cheung o Zienkiewicz y Taylor presenta una interpretación amplia del MEF y su aplicación a cualquier problema de campos. En él se demuestra que las ecuaciones de los EF pueden obtenerse utilizando un método de aproximación de pesos residuales, tal como el método de Galerkin o el de mínimos cuadrados. Esta visión del problema difundió un gran interés entre los matemáticos para la solución de ecuaciones diferenciales lineales y no lineales mediante el MEF, que ha producido una gran cantidad de publicaciones hasta tal punto que hoy en día el MEF está considerado como una de las herramientas más potentes y probadas para la solución de problemas de ingeniería y ciencia aplicada.

Actualmente el método se encuentra en una fase de gran expansión: es ampliamente utilizado en la industria y continúan apareciendo cientos de trabajos de investigación en este campo. Los ordenadores han aportado el medio eficaz de resolver la multitud de ecuaciones que se plantean en el MEF, cuyo desarrollo práctico ha ido caminando parejo de las innovaciones obtenidas en el campo de la arquitectura de los ordenadores. Entre éstas, además de permitir la descentralización de los programas de EF, ha contribuido a favorecer su uso a través de sofisticados paquetes gráficos que facilitan el modelado y la síntesis de resultados. Hoy en día ya se concibe la conexión inteligente entre las técnicas de análisis estructural, las técnicas de diseño (CAD), y las técnicas de fabricación.

5.2. Conceptos generales del método.

La idea general del método de los elementos finitos es la división de un continuo en un conjunto de pequeños elementos interconectados por una serie de puntos llamados nodos. Las ecuaciones que rigen el comportamiento del continuo regirán también el del elemento. De esta forma se consigue pasar de un sistema continuo (infinitos grados de libertad), que es regido por una ecuación diferencial o un sistema de ecuaciones diferenciales, a un sistema con un número de grados de libertad finito cuyo comportamiento se modela por un sistema de ecuaciones, lineales o no. En cualquier sistema a analizar se puede distinguir entre:

- **Dominio:** espacio geométrico donde se va a analizar el sistema.
- **Condiciones de contorno:** variables conocidas y que condicionan el cambio del sistema: cargas, desplazamientos, temperaturas, voltaje, focos de calor...
- **Incógnitas:** variables del sistema que deseamos conocer después de que las condiciones de contorno han actuado sobre el sistema: desplazamientos, tensiones, temperaturas...

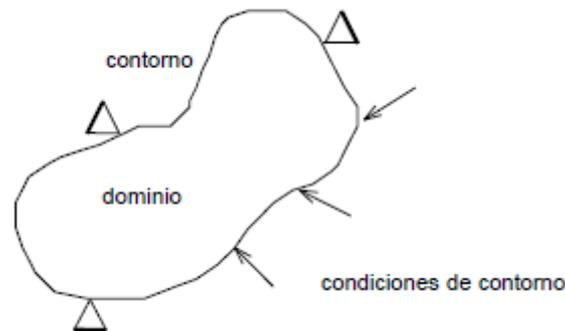


Figura 56: Sistema en el Método de elementos finitos.

El método de los elementos finitos supone, para solucionar el problema, el dominio discretizado en subdominios denominados elementos. El dominio se divide mediante puntos (en el caso lineal), mediante líneas (en el caso bidimensional) o superficies (en el tridimensional) imaginarias, de forma que el dominio total en estudio se aproxime mediante el conjunto de porciones (elementos) en que se subdivide. Los elementos se definen por un número discreto de puntos, llamados nodos, que conectan entre si los elementos. Sobre estos nodos se materializan las incógnitas fundamentales del problema. A estas incógnitas se les denomina grados de libertad de cada nodo del modelo. Los grados de libertad de un nodo son las variables que nos determinan el estado y/o posición del nodo.

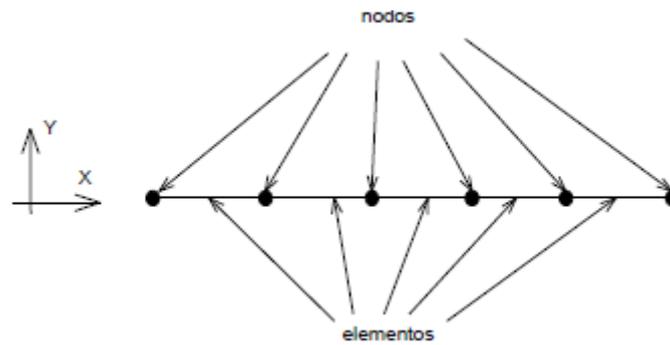


Figura 57: Elementos y nodos.

El sistema, debido a las condiciones de contorno (empotramiento, fuerza puntual y temperatura...) evoluciona hasta un estado final. En este estado final, conocidos los valores de los grados de libertad de los nodos del sistema podemos determinar cualquier otra incógnita deseada: tensiones, deformaciones... También sería posible obtener la evolución temporal de cualquiera de los grados de libertad. Planteando la ecuación diferencial que rige el comportamiento del continuo para el elemento, se llega a fórmulas que relacionan el comportamiento en el interior del mismo con el valor que tomen los grados de libertad nodales. Este paso se realiza por medio de unas funciones llamadas de interpolación, ya que éstas interpolan el valor de la variable nodal dentro del elemento. El problema se formula en forma matricial debido a la facilidad de manipulación de las matrices mediante ordenador. Conocidas las matrices que definen el comportamiento del elemento se ensamblan y se forma un conjunto de ecuaciones algebraicas, lineales o no, que resolviéndolas nos proporcionan los valores de los grados de libertad en los nodos del sistema.

5.3. Aplicaciones.

Comúnmente se usa el MEF en determinar los esfuerzos y desplazamientos en sistemas mecánicos. Es además usado de manera rutinaria en el análisis de muchos otros tipos de problemas, entre ellos transferencia de calor, dinámica de fluidos, y electromagnetismo. Con el MEF se pueden manejar sistemas complejos cuyas soluciones analíticas son difícilmente calculables.

Una variedad de especializaciones bajo el ámbito de la ingeniería mecánica tal como lo es la aeronáutica, biomecánica, y las industrias automotrices, todas comúnmente usan el método de elementos finitos integrado en el diseño y desarrollo de sus productos. Varios paquetes modernos de MEF incluyen componentes específicos como el térmico, electromagnético, fluido y ambientes de trabajo estructural. En una simulación estructural el análisis de elementos finitos ayuda a producir visualizaciones de rigidez y fuerza y además ayuda a minimizar peso, materiales y costos. El análisis de elementos finitos permite una detallada visualización de en donde las estructuras se doblan o tuercen, e indica la distribución del esfuerzo y los desplazamientos.

El método de elementos finitos es una industria creciente en el análisis de diseño de productos y desarrollos en ingeniería. El uso del MEF como una herramienta de ingeniería de manera habitual está creciendo rápidamente. Los avances en el poder de procesamiento de las computadoras, del MEF y del software de modelado han permitido la continua integración del MEF en los campos de ingeniería en diseño de productos y desarrollo.

Ha habido muchas cosas que han restringido el desempeño y finalmente la aceptación y utilización del MEF en conjunción con el CAD en las etapas de diseño del producto y su desarrollo. Las separaciones en compatibilidad entre los formatos de archivos de programas de CAD y MEF limitaban el grado en que las compañías podían diseñar fácilmente y probar sus productos usando la combinación de CAD y MEF respectivamente. Típicamente, los ingenieros usan software CAD especializado en el modelado en el diseño del producto, y después se exporta ese diseño a un paquete de MEF para el análisis.

La tendencia actual en el software de FEA y la industria en ingeniería ha sido la creciente demanda por la integración entre el modelado sólido y el análisis de elementos finitos. Los diseñadores están ahora introduciendo simulaciones en computadora capaces de usar archivos preexistentes de CAD sin la necesidad de modificar y recrear los modelos para acoplarse a los ambientes de FEA.

Hay una creciente demanda por modelado dinámico en MEF en la industria de vehículos pesados. Muchas compañías de vehículos pesados se están alejando del tradicional análisis estático y están haciendo uso de software de simulación dinámica. La simulación dinámica incluye la aplicación del MEF en un sentido más realista para tener en cuenta los efectos complicados de analizar varios componentes y ensambles con características reales.

Ingenieros en varias compañías de automoción moldean actualmente sus vehículos usando software dinámico especializado del MEF. La simulación dinámica del MEF permite que una variedad de maniobras sea probada con precisión. Como un resultado de esto, se pueden determinar las características óptimas de desempeño del diseño del vehículo sin la necesidad de tomar riesgos físicos. Como un resultado del MEF dinámico, la necesidad de costosas pruebas destructivas se ha reducido en gran medida.

5.4. ANSYS.

ANSYS es un exhaustivo programa informático de elementos finitos de propósito general que contiene más de 100.000 líneas de código. ANSYS es capaz de realizar análisis estáticos, dinámicos, de transferencia de calor, flujo de fluidos, y electromagnéticos. ANSYS ha sido un programa líder en el MEF por más de 30 años. Hoy, ANSYS se usa en muchos campos de la ingeniería, incluyendo la aeroespacial, automoción, electrónica y nuclear.



Figura 58: Logo de ANSYS.

ANSYS está dividido en tres herramientas principales llamados módulos: pre-procesador (creación de geometría y mallado), procesador y post-procesador. Tanto el pre-procesador como el post-procesador están provistos de una interfaz gráfica. Este procesador de elemento finito para la solución de problemas mecánicos incluye: análisis de estructuras dinámicas y estáticas (ambas para problemas lineales y no lineales), análisis de transferencia de calor y fluidodinámica, y también problemas de acústica y de electromagnetismo. Normalmente el uso de estas herramientas se utiliza simultáneamente logrando mezclar problemas de estructuras junto a problemas de transferencia de calor como un todo.

El proceso seguido típicamente para la realización de una simulación con ANSYS consta de los siguientes pasos:

1. Pre-proceso

- Establecimiento del modelo, se construye la geometría del problema, creando líneas, áreas o volúmenes. Sobre este modelo se establecerá la malla de elementos. Esta parte del pre-proceso es opcional, dado que la ubicación de los elementos de la malla puede provenir de otras aplicaciones de diseño.
- Se definen los materiales a ser usados sobre la base de sus constantes. Todo elemento debe tener asignado un material particular.

- Generación de la malla, realizando una aproximación discreta del problema sobre la base de puntos o nodos. Estos nodos se conectan para formar elementos finitos que juntos forman el volumen del material. La malla puede generarse a mano o usando las herramientas de generación automática o controlada de mallas.

2. Proceso

- Aplicación de cargas, Se aplican condiciones de borde en los nodos y elementos, se puede manejar valores de fuerza, tracción, desplazamiento, momento o rotación.
- Obtención de la solución, que se obtiene una vez que todos los valores del problema son ya conocidos.

3. Post-proceso

- Visualización de resultados, por ejemplo como dibujo de la geometría deformada del problema.
- Listado de resultados, igualmente como datos en una tabla.

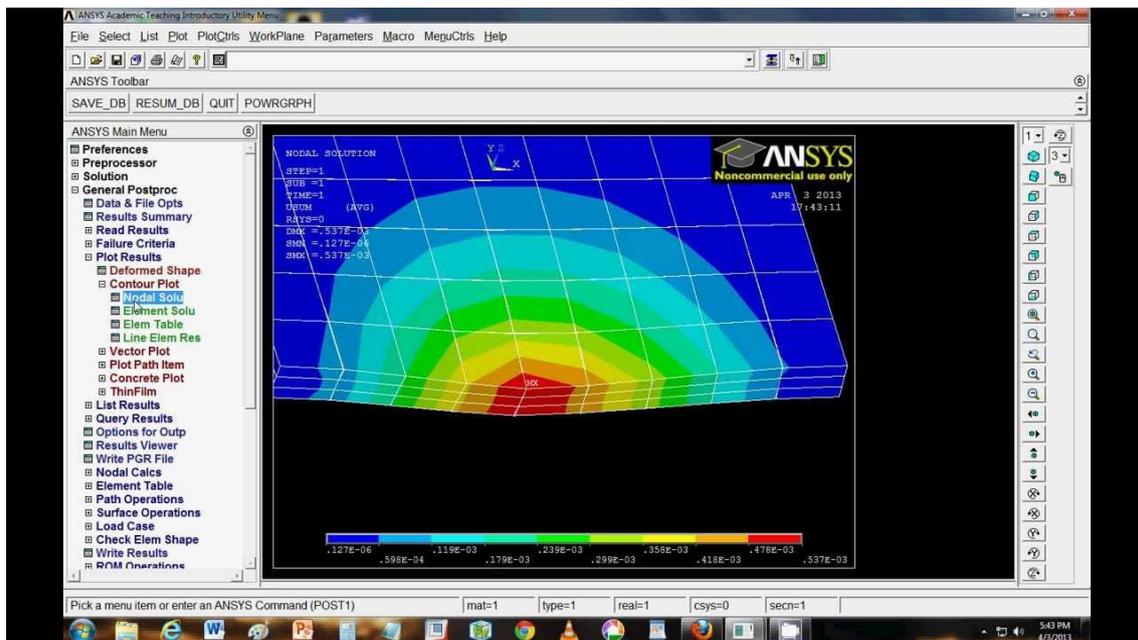


Figura 59: Ejemplo de la pantalla de ANSYS Mechanical APDL.

6. Simulación.

6.1. Introducción.

El ahorro en costes asociado así como su versatilidad tanto en tareas de fabricación, reparación o diseño hacen de procesos como el láser cladding técnicas de gran potencial para la industria.

Durante el proceso de láser cladding el metal se va depositando en capas o cordones superpuestos o contiguos según una geometría determinada para fabricar una pieza o bien reforzar o reparar una zona concreta de la pieza. El simular el proceso correctamente permite comprender y optimizar los parámetros que rigen el proceso, para poder optimizarlo posteriormente.

El modelado y simulación de procesos cada vez se emplean más en la industria con el objetivo de reducir costes en experimentación.

Es por ello que el hacer simulaciones fiables es tan importante para poder impulsar estos procesos de fabricación, reduciendo el tiempo dedicado a experimentación sin afectar negativamente a los resultados y disminuir así los costes de producción.

Debido a sus buenas propiedades las aleaciones de titanio son ampliamente utilizadas en sectores tales como el aeroespacial, naval, biomédico, en aplicaciones que exigen gran fiabilidad y seguridad en el comportamiento de los materiales implicados.

Las aleaciones de titanio se emplean para sustituir otras aleaciones cuando se pretende trabajar a altas temperaturas. El sector aeroespacial es el que más uso hace de estos materiales principalmente para la fabricación de piezas de turborreactores. La producción de Ti-6Al-4V es a su vez el uso principal del titanio extraído.

Para modelizar el proceso de láser cladding se han desarrollado una serie de rutinas y archivos de entrada en ANSYS.

Las rutinas y archivos de entrada se desarrollaron en lenguaje APDL (*Advanced Programming Design Language*), que es el propio de ANSYS.

Los archivos de entrada contienen los valores de los parámetros que definen el análisis y es desde donde se ejecutan las rutinas que llevan a cabo el cálculo de funciones específicas.

En cada paso de tiempo de la simulación, se recoge una imagen del modelo que representa el mapa de contornos de la solución. Estas imágenes se emplean

luego en vídeos en los que se puede ver la evolución del proceso a lo largo del tiempo.

6.2. Datos de partida.

A continuación se indican las propiedades del titanio puro comercial y del Ti-6Al-4V que se emplearon en la simulación.

6.2.1. Propiedades de los materiales.

Para buscar las propiedades de los materiales se recurrió a una exhaustiva búsqueda bibliográfica de la que se obtuvieron los valores de densidad, calor específico, conductividad y entalpía para el titanio puro comercial y para el Ti-6Al-4V.

Para obtener unos resultados óptimos de la simulación, sería ideal poseer datos para un amplio rango de temperaturas con escalones muy pequeños para cubrir todas las temperaturas a las que se verá sometido el modelo.

Para la presente simulación se recurrió como fuente bibliográfica de las propiedades al libro *Recommended values of thermophysical properties for selected commercial alloys* de Kenneth C. Mills.

T (K)	ρ (kg/m ³)	C_p (J/(g · K))	ΔH (J/g)	k (W/(m · K))
298	4540	0,522	0	20,5
373	4529	0,549	40	20
473	4514	0,580	97	19,2
573	4499	0,601	156	19
673	4484	0,622	217	18,8
773	4469	0,643	280	18,8
873	4454	0,661	346	18,4
973	4439	0,685	413	18,2
1073	4424	0,703	483	18,4
1155	4412	0,718	540	20,8
1161,5	4412	0,612	627	20,8
1168	4412	0,614	632	20,8
1173	4409	0,614	638	21
1273	4394	0,626	700	22,3
1373	4379	0,641	763	23,6
1473	4364	0,662	828	24,9
1573	4349	0,689	895	26,2
1673	4334	0,708	965	27,5
1773	4319	0,732	1037	28,8
1873	4304	0,760	1112	30,1
1941	4294	0,783	1189	31
1952	4217	0,874	1345	31
1963	4140	0,965	1484	31
1973	4133	0,965	1515	31
2073	4110	0,965	1611	31
2173	4084,25	0,965	1634,5	31

*Tabla 21: Propiedades termofísicas recomendadas para Ti puro comercial.
(Recommended values of thermophysical properties for selected comercial alloys. Kenneth C. Mills)*

T (K)	ρ (kg/m ³)	C_p (J/(g · K))	ΔH (J/g)	k (W/(m · K))
298	4420	0,546	0	7
373	4406	0,562	42	7,45
473	4395	0,584	99	8,75
573	4381	0,606	158	10,15
673	4366	0,629	220	11,35
773	4350	0,651	284	12,6
873	4336	0,673	350	14,2
973	4324	0,694	419	15,5
1073	4309	0,714	489	17,8
1155	4299,7	0,7264	533,64	19,288
1161,5	4298,725	0,7277	538,32	19,444
1168	4294,75	0,733	557,4	20,08
1173	4294	0,734	561	20,2
1273	4280,5	0,697	655	20,6
1373	4267	0,660	749	21
1473	4252	0,678	816	22,9
1573	4240	0,696	885	23,7
1673	4225	0,714	956	24,6
1773	4205	0,732	1028	25,8
1873	4198	0,750	1102	27
1941	4189	0,759	1184	28,4
1952	4054,5	0,795	1325	30,9
1963	3920	0,831	1466	33,4
1973	3886	0,831	1508	34,6
2073	3818	0,831	1591	-
2173	3750	0,831	1674	-

*Tabla 22: Propiedades termofísicas recomendadas para Ti-6Al-4V.
(Recommended values of thermophysical properties for selected comercial alloys. Kenneth C. Mills)*

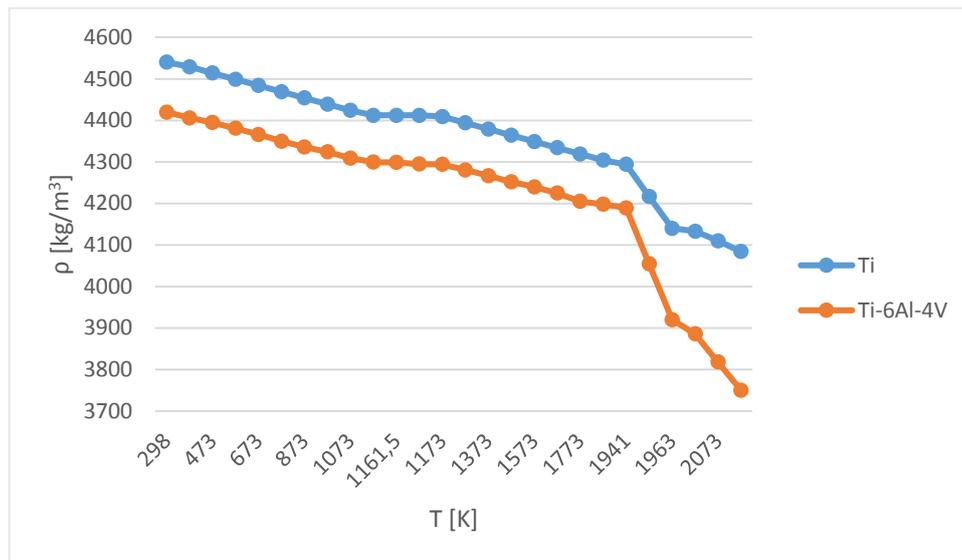


Figura 60: Comparativa de la evolución de la densidad del Ti y del Ti-6Al-4V en función de la temperatura.

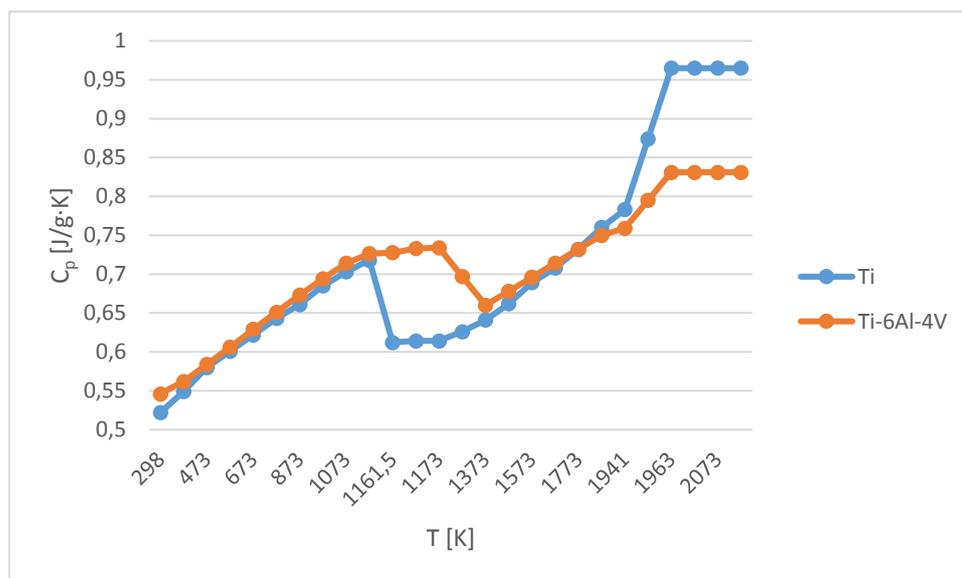


Figura 61: Comparativa de la evolución de la capacidad calorífica del Ti y del Ti-6Al-4V en función de la temperatura.

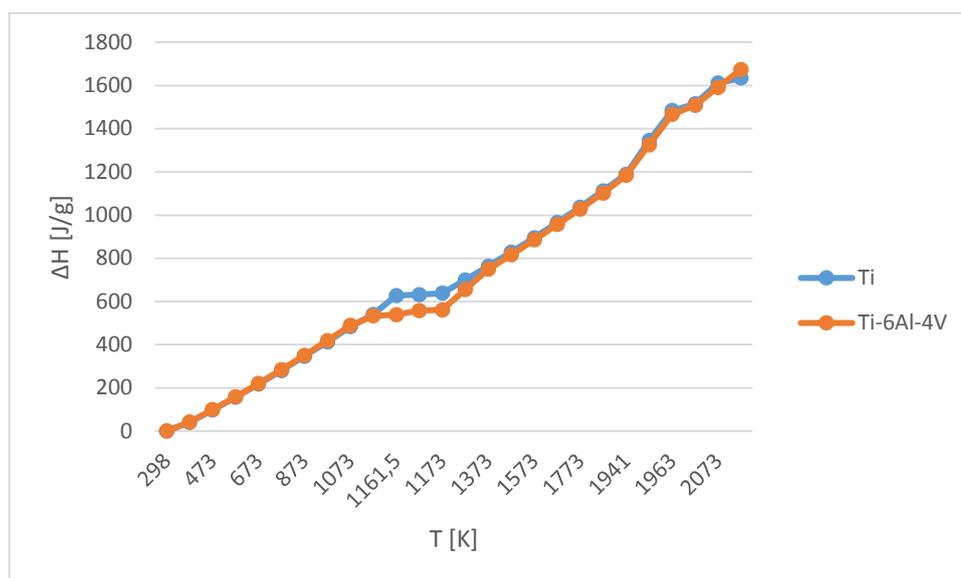


Figura 62: Comparativa de la evolución de la entalpía del Ti y del Ti-6Al-4V en función de la temperatura.

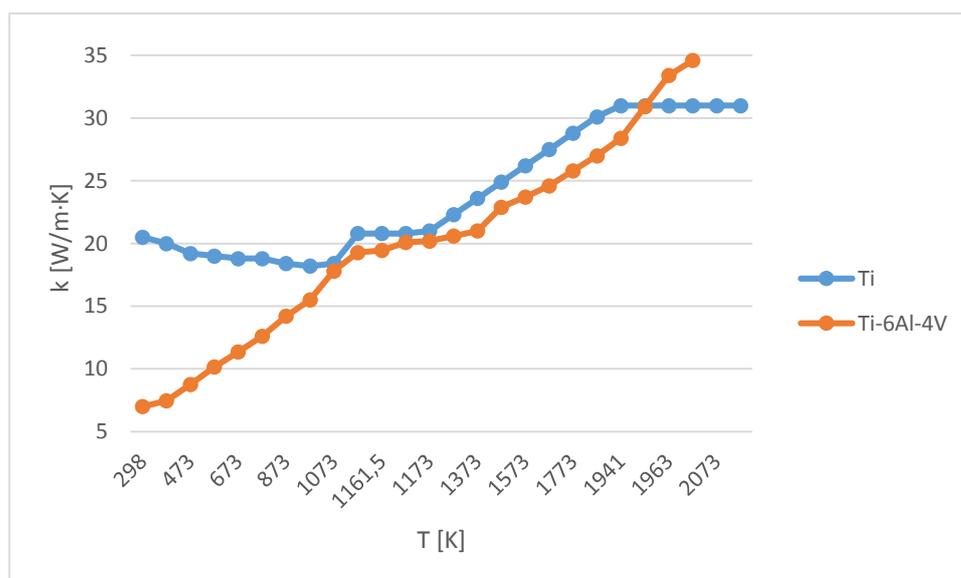


Figura 63: Comparativa de la evolución de la conductividad térmica del Ti y del Ti-6Al-4V en función de la temperatura.

Como se observa en las gráficas, las propiedades tienen un comportamiento aproximadamente lineal, pero presentando puntos de inflexión donde hay cambios bruscos en las propiedades debido a que se alcanzan temperaturas de transformación a las que hay cambios en la microestructura de los materiales.

6.2.2. Geometría y parámetros de operación.

Las dimensiones de la placa de sustrato serán de 40x10x3 mm y la longitud de los cordones, de 30 mm en todos los casos.

Se trabajó con un perfil de haz tipo Top Hat, con un diámetro de 2 mm con una potencia de 275 W y una velocidad del láser de 12 mm/s.

Este montaje se emplea para las geometrías de cordón individual a las que se someterá a un proceso de láser cladding por aporte de polvo.

Para los montajes en los que se emplea el aporte por hilo se considerará que la potencia del haz láser se emplea íntegramente en calentar el sustrato, no habiendo por ello potencia láser aplicada sobre el estrato.

Se simularán procesos por aporte de polvo y por aporte de hilo, ambos en un solo paso.

Ambos procesos se emplearán sobre varias combinaciones de materiales:

- Clad de Ti-6Al-4V sobre placa de titanio.
- Clad de titanio sobre placa de titanio.
- Clad de Ti-6Al-4V sobre placa de Ti-6Al-4V.

La combinación de clad de titanio sobre placa de Ti-6Al-4V no se simula debido a que no tiene interés el aportar un clad de un material de peores propiedades sobre otro con mejores propiedades.

6.3. Modelización.

6.3.1. Láser.

La radiación láser se representa en la simulación mediante una carga térmica aplicada sobre los nudos de los elementos, que conforme pasa el tiempo reciben el haz láser en su avance a lo largo de la trayectoria del cordón.

La rutina empleada para la simulación de haz láser tiene tres modos: TEM 00, TEM 01 y Top Hat.

Para el presente trabajo como se comentó anteriormente se empleará el modo Top Hat.

Para el caso del aporte de polvo, la intensidad láser será en parte absorbida por el sustrato dependiendo del coeficiente de absorción que tenga el mismo. En función de la energía absorbida por el sustrato, este se calentará más o menos. El resto de energía láser se emplea en elevar la temperatura del polvo que se va a aportar, por encima de su temperatura de fusión. El hecho de que parte de la intensidad láser se absorba por el sustrato refleja el proceso de aporte de polvo, donde gran parte de las partículas de polvo aportadas (aproximadamente un 50 %) no acaban finalmente en el clad sino que acaban desperdigadas. Así, una parte de esa potencia láser que no se aporta a las partículas de polvo se “pierde” al aportarse esta energía al sustrato.

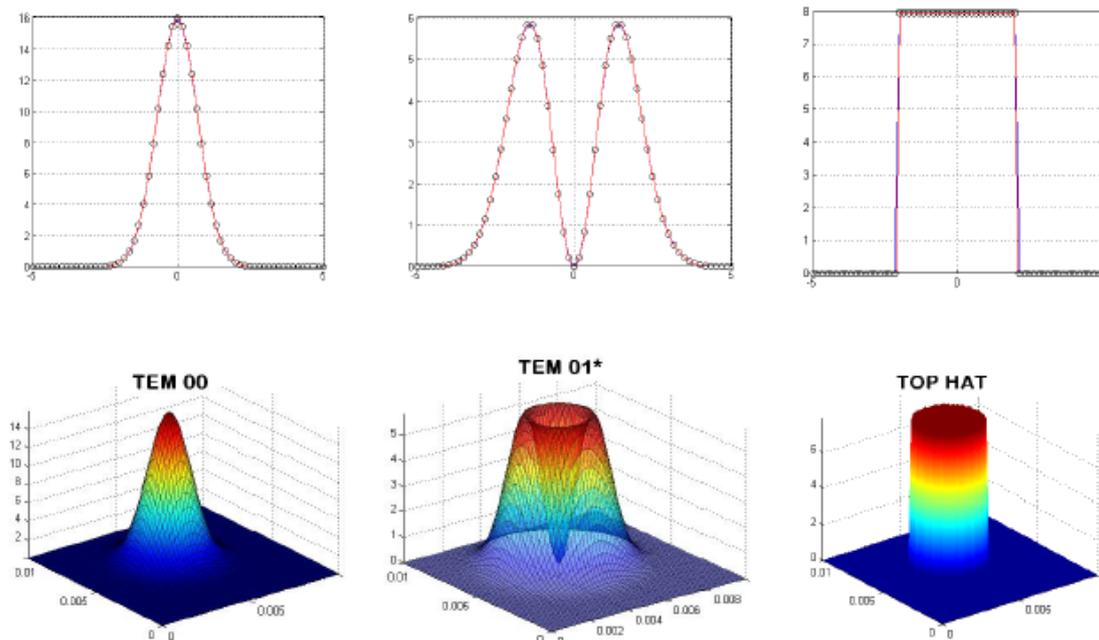


Figura 64: Modos láser disponibles en la macro LASER3D.

Para el caso del aporte por hilo, la intensidad del haz láser se considera que se emplea íntegramente en calentar el polvo por encima de su temperatura de fusión, por lo que no habrá aporte de la potencia del haz láser al sustrato, estando sometido el sustrato a un proceso de transferencia de calor con el estrato y el ambiente.

6.3.2. Análisis térmico.

Para la simulación se empleará el modo transitorio de ANSYS para poder ver la evolución de la temperatura en el material conforme pasa el tiempo.

Una vez se ha modelizado la geometría básica del problema, el modelizado del proceso de deposición de material requiere de la división del material depositado en rodajas.

Al inicio de la simulación, se define una temperatura para todos los nodos del modelo igual a la temperatura de precalentamiento alcanzada en ensayos, que es de 549 °C (822 K).

A continuación se desactivan todos los elementos del cordón aplicando la herramienta de Element Birth & Death para que estos elementos desaparezcan virtualmente de la simulación.

A lo largo del análisis, los elementos constituyentes de cada rodaja se van activando a una temperatura superior a la temperatura de fusión del material. La energía necesaria para que las rodajas alcancen el punto de fusión se aplica

como una condición de contorno de flujo de calor que simula un perfil láser tipo Top Hat centrado en cada rodaja conforme se van activando las mismas.

Como se comentó previamente, en el aporte de polvo la potencia láser que no se emplea en fundir la rodaja se aplica a la placa de material base. El proceso de enfriamiento se simula dándoles a las superficies libres de la placa base y el cordón una capacidad convectiva con coeficiente $40 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$.

Para el caso de aporte de hilo el sustrato no estará sometido directamente a la radiación láser dado que el diámetro del haz es menor que el ancho de la sección del hilo y el hilo se considera opaco. Habrá transferencia de calor del hilo al sustrato durante el proceso. El proceso de enfriamiento se simulará de nuevo dándoles a las superficies libres de la placa y el cordón una capacidad convectiva con coeficiente $40 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$.

6.4. Descripción de los modelos.

Se han desarrollado diversos modelos para simular los procesos de láser cladding: para aporte de polvo se dispone de tres modelos, uno para cada combinación de materiales (Ti-6Al-4V sobre Ti, Ti sobre Ti y Ti-6Al-4V sobre Ti-6Al-4V) y para aporte de hilo se dispone de tres modelos para cada una de las tres combinaciones de materiales.

Los modelos consisten en una placa prismática que representa el sustrato sobre el que se dispone cordón con forma elipsoidal.

Con el objetivo de reducir el tiempo de computación y la complejidad del modelo, se tienen en cuenta las condiciones de simetría.

El cordón se encuentra dividido en rodajas para hacer posible la simulación secuencial de deposición de material. Los extremos inicial y final de ese modelo se han modelado a partir de porciones esféricas deformadas y las rodajas son el resultado de cortes con superficies cónicas. Esta geometría complica sustancialmente el modelo pero permite simular más fielmente las formas que se obtienen experimentalmente, permitiendo un estudio más completo y fiable de los resultados.

El mallado del modelo de aporte de polvo se ha realizado con elementos hexaédricos casi en su totalidad, recurriéndose a mallados tetraédricos en los extremos de los cordones, donde dividir la geometría en hexaedros sería muy complicado. Con el fin de reducir el número de elementos del modelo y hacer más eficiente la computación del proceso, el mallado de la placa sustrato se ha refinado en la zona circundante al cordón, por ser esta una zona crítica en el proceso al tener mayores gradientes de temperatura y composición.

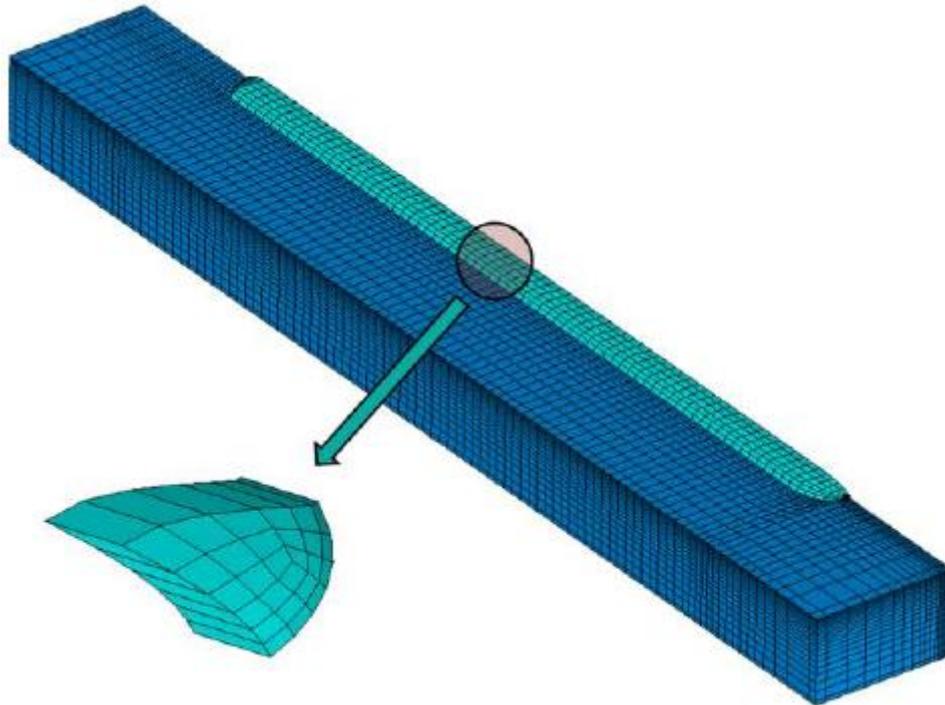


Figura 65: Modelo para el cordón.

6.4.1. Modelo de cordón único.

Para el modelo de aporte de polvo se empleó una rutina desarrollada en lenguaje APDL y distribuida en distintas macros.

Para el aporte de hilo se modificaron las macros para adaptarlas a las características que presenta el aporte de hilo.

La macro C_Mesh genera el modelo completo para la deposición de un cordón con simetría planar. El cordón se modela como una sección cilíndrica y los extremos inicial y final son secciones de dos elipsoides diferentes. Las capas en que se divide el cordón pueden ser cortes rectos o secciones elipsoidales del cilindro que representa al cordón.

Los datos de entrada de esta macro son:

- Las dimensiones del cordón: largo, ancho y alto.
- Posición inicial xyz del cordón.
- Curvatura y grosor de las capas.
- Número de elementos en cada capa.
- Dimensiones de la placa.

- Número de divisiones de cada dimensión de la placa y ratio entre la primera y última división. Este dato permite crear una malla con refinamiento adaptado en las zonas próximas al cordón, que serán objeto de mayores gradientes térmicos durante la simulación.

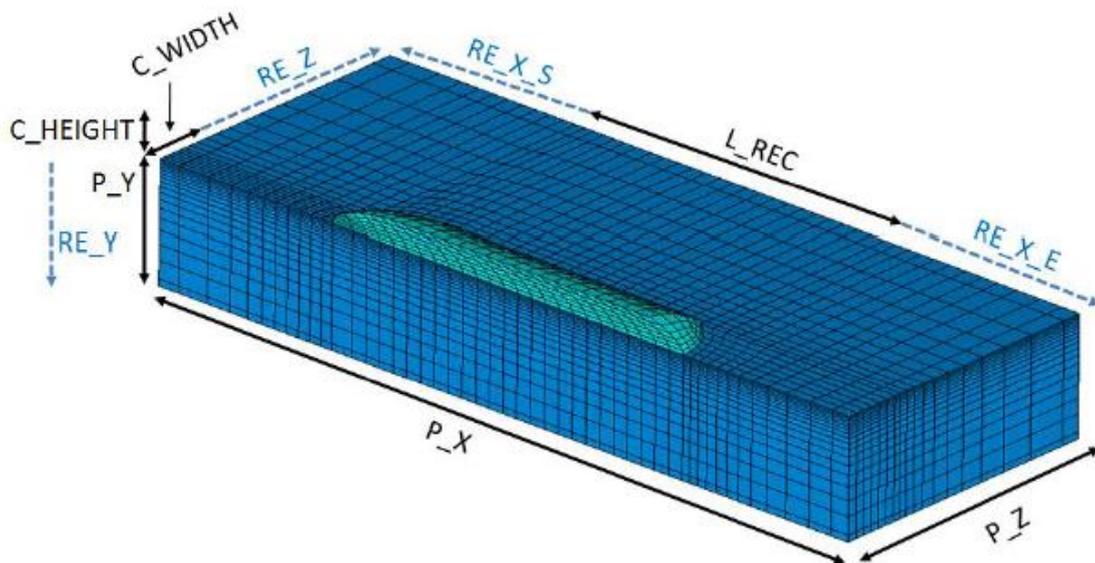


Figura 66: Mallado para las simulaciones. Parámetros para su generación.

La macro crea a partir de estos datos una nube de nodos que constituyen el dominio del modelo. A continuación, se procede a mallar el modelo por medio de mallas hexaédricas. Seguidamente se definirán las propiedades de los materiales del cordón y de la placa.

Para esta simulación se empleó un cordón de 30 mm de longitud depositado sobre una placa de 40x10x3 mm. El modelo consta de 20721 elementos y 24010 nodos.

6.5. Funcionamiento.

Se simula la deposición del material sobre el sustrato, en esta fase entran en juego las cargas térmicas como la energía láser, la transmisión de calor en la pieza y el enfriamiento posterior con el aire.

6.5.1. Deposición de material.

Para simular la deposición de material fundido, el cordón se ha dividido en capas. El número de capas depende del número de pasos de tiempo en que se quiera dividir la simulación.

La macro C_Heat controla la fase de calentamiento del proceso. El análisis comienza con todos los elementos del cordón desactivados. La simulación de material se simula activando cada capa del cordón a una temperatura superior a

la temperatura de fusión del material de aporte. La distribución de temperaturas del modelo se calcula empleando la conservación de la energía. En el aporte de polvo la energía láser que incide en el material se emplea en calentar la capa correspondiente, el calentamiento de la placa y las pérdidas.

El haz láser se aplica con un perfil Top Hat sobre la superficie de la placa, a excepción de las áreas bajo las capas depositadas previamente.

En el aporte de hilo la energía láser se emplea en calentar el clad, que posteriormente calentará la placa al irse enfriando el material aportado.

En cada paso se aplican condiciones de convección a las superficies libres de la placa con nodos a una temperatura superior a la ambiente después de los cálculos del paso anterior. También se aplica convección a las superficies de las capas depositadas en pasos anteriores.

La fase de enfriamiento se controla con la macro C_Cool3D, que aplica un intercambio de calor por convección con el aire circundante a todas las superficies externas del modelo cuyos nodos se hayan calentado por encima de la temperatura ambiente anteriormente. Los pasos de tiempo de la fase de enfriamiento se incrementan siguiendo una progresión geométrica para simular la caída exponencial de la temperatura en el enfriamiento.

Ambas macros tienen subrutinas que permiten la captura de imágenes en cada paso de la simulación para poder monitorizar los resultados y poder crear vídeos del proceso.

6.5.2. Transformación de fase.

Es posible estimar las transformaciones de fase a partir de los resultados obtenidos del análisis térmico.

El diagrama de fases para el Ti-6Al-4V se muestra en la Figura 63. Las fases a considerar son fase α , fase β , martensita y material fundido. La microestructura del Ti-6Al-4V a temperatura ambiente es bimodal, compuesta principalmente de granos de fase α con una pequeña cantidad de fase β retenida.

En la simulación, la microestructura inicial es bimodal, compuesta principalmente por granos de fase α con pequeñas cantidades de fase β retenida. Durante el calentamiento, al sobrepasar la temperatura de transición β , los distintos tipos de fase α presentes hasta el momento se desestabilizan e inician su transformación en fase β , de acuerdo con el diagrama de fases del Ti-6Al-4V.

El material fundido depositado consiste únicamente en fase β . Durante el enfriamiento, por debajo de la temperatura de transición β , la fase β empieza a descomponerse en fase α Widmanstätten y fase α en borde de grano. Para simplificar, se han agrupado estas dos variantes en una sola, que se identificará como fase α .

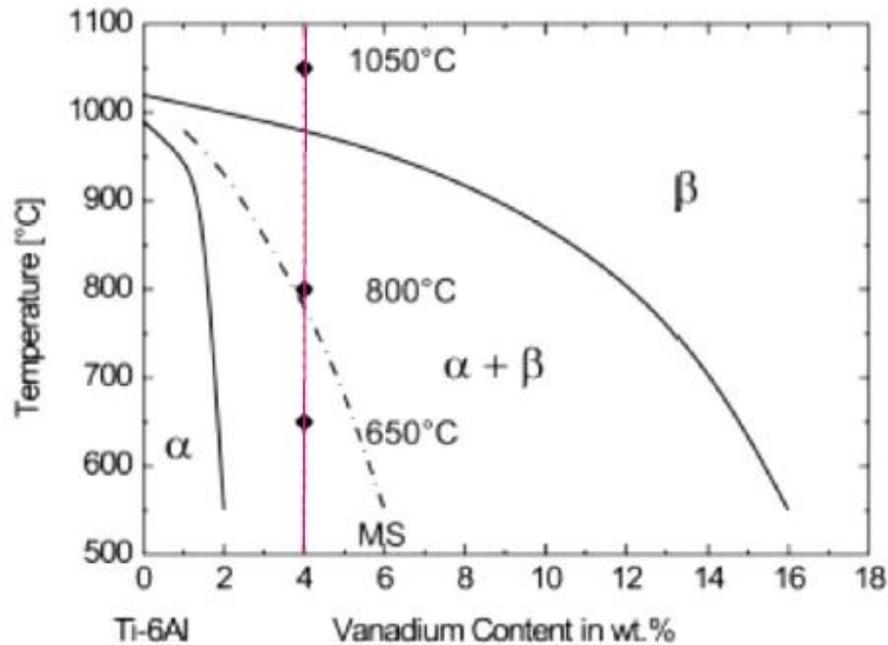


Figura 63: Diagrama de fases para aleaciones Ti-6Al-4V con diferentes contenidos de vanadio. Se representa la evolución del Ti-6Al-4V en función de la temperatura.

(Phase transformation, examples from titanium and zirconium alloys. Mukhopadhyay Banerjee)

En cualquier caso, si la temperatura del material baja de la temperatura de transformación martensítica y la velocidad de enfriamiento es lo suficientemente alta, la fase β inicial se transformará completamente en α -martensita. Esta martensita puede sufrir un proceso de revenido, descomponiéndose en fase α o bien en una combinación de fase α y fase β .

Las transformaciones de fase que suceden durante el enfriamiento rápido de una aleación de titanio son de dos tipos principalmente: difusivas y no difusivas o martensíticas.

Tanto la transformación de fase β en fase α como el temple o transformación de la martensita en fase α se producen por mecanismos difusivos.

Por otro lado, la transformación de fase β en martensita se puede considerar instantánea cuando la velocidad de enfriamiento supera los 683 K/s.

La temperatura de inicio de la transformación martensítica se encuentra en torno a los 913 ± 30 K y la temperatura de transformación β en torno a los 1243 ± 50 K. Para este trabajo se han tomado unas temperaturas de transformación de 940 K y 1273 K para la martensita y la fase β respectivamente.

La cantidad de fase β que no llegue a transformarse en α -martensita dará lugar a otras microestructuras α siguiendo transformaciones por mecanismos difusivos.

El titanio puro comercial presenta también una temperatura de transición β y puede sufrir transformación martensítica, por lo que se han asumido las mismas transformaciones que para la aleación Ti-6Al-4V a la hora de analizar los resultados.

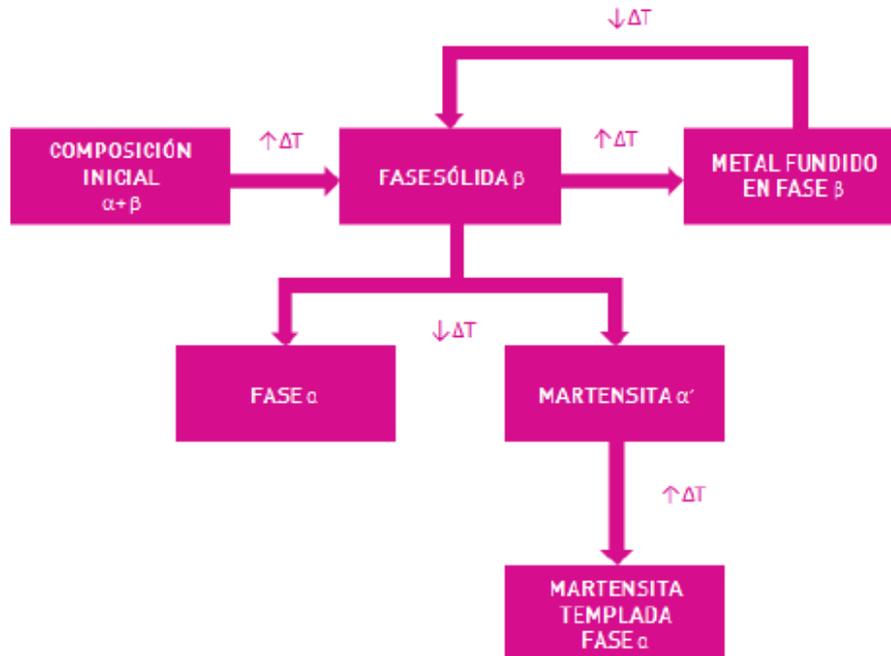


Figura 64: Esquema de las transformaciones de fase consideradas.

6.5.3. Problemas de convergencia.

6.5.3.1. Propiedades de los materiales.

Al alcanzarse la temperatura de fusión se produce un cambio brusco en las propiedades del material. En concreto se produce una caída de la densidad y un pico en el calor específico (como se puede apreciar en las Figuras 8 y 9). Estos cambios bruscos pueden ocasionar problemas de convergencia en el cálculo del modelo.

Las aleaciones, a menos que sean eutécticas, no tienen un único punto de fusión sino que la fusión se produce en un rango de temperaturas. Esto palia los problemas que pudiera dar la simulación al haber una transición menos brusca en las propiedades del material. Así, aunque el rango de temperaturas sea muy pequeño es aconsejable extender dicho rango para facilitar la convergencia del modelo.

6.5.3.2. Convección.

En ocasiones, los elementos que presentan temperaturas iguales a la ambiental en la simulación del enfriamiento por convección ocasionan dificultades durante el cálculo de una solución, resultando enfriadas por debajo de la temperatura ambiente.

Para evitar este problema, se aplican directamente las cargas y las condiciones de contorno en los nodos. Así se pueden seleccionar los elementos por encima de la temperatura ambiente y aplicar convección a esos nodos, dejando los elementos a temperatura ambiente de lado. Asimismo, se puede aplicar convección a los elementos de la superficie superior de la placa sobre la que se está depositando el cordón.

6.6. Resultados.

6.6.1. Aporte de polvo.

En la Figura 65 se muestra la distribución de temperaturas en el último paso de la simulación para el caso de clad de Ti-6Al-4V y placa de titanio.

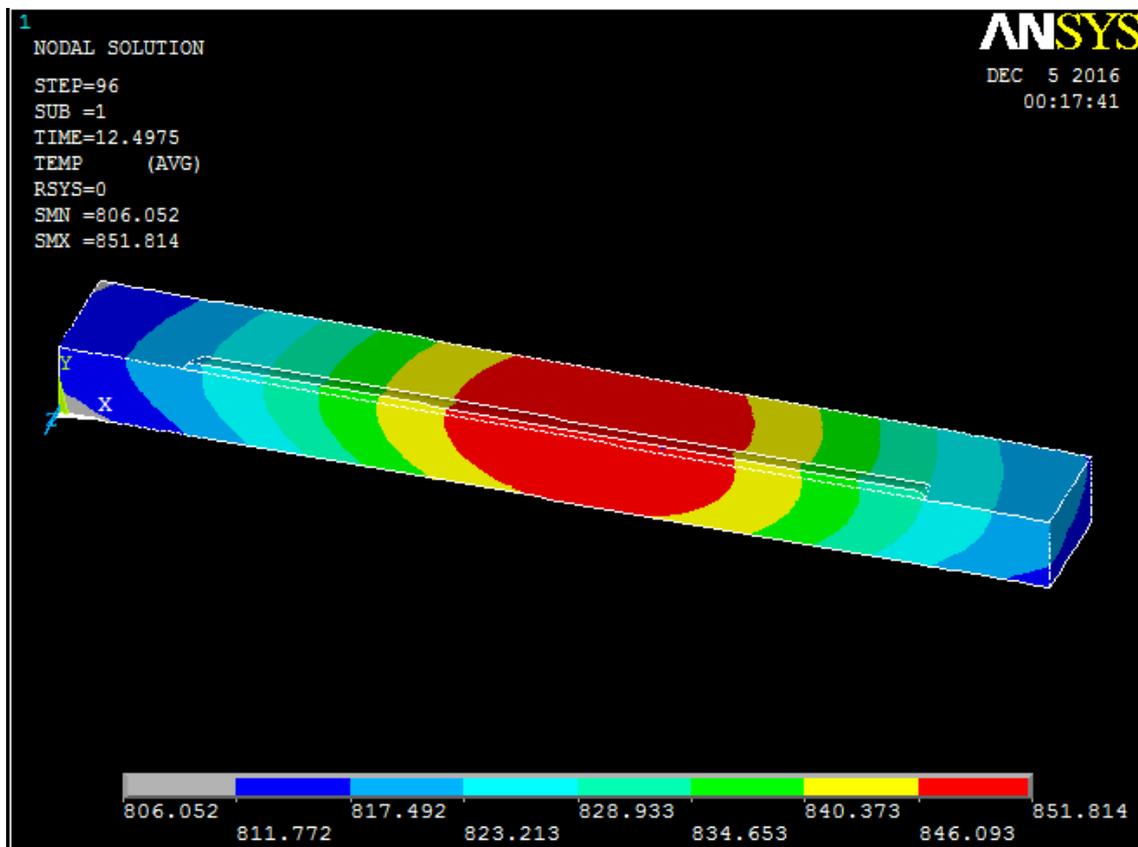


Figura 65: Distribución de temperaturas para una geometría de Ti-6Al-4V sobre Ti al final de la simulación.

Los resultados en cada punto del clad y la placa que presenta debajo son extensibles al resto de la pieza. En el estudio de resultados se estudió la evolución de temperaturas en la mitad de la placa a distintas alturas, teniendo 7 muestras. Una de ellas del clad, otra en la zona de contacto entre el clad y la placa y el resto tomadas a diferentes alturas de la placa. Estas muestras serán los nodos:

- 15398: con coordenadas (0.020446, 0.0032134,-0.90692·10⁻⁰⁹).

- 15370: con coordenadas (0.020547, 0.003, 0).
- 19868: con coordenadas (0.020547, 0.0025336, 0).
- 19889: con coordenadas (0.020547, 0.0018848, 0).
- 19896: con coordenadas (0.020547, 0.0015786, 0).
- 19917: con coordenadas (0.020547, 0.00025, 0).
- 19924: con coordenadas (0.020547, 0, 0).

En el proceso de láser cladding interesa que se produzca la penetración de la isoterma de fusión en el material base, es decir, que el material en la parte superior de la placa esté fundido para que pueda penetrar el material de aporte para que una vez se produzca el enfriamiento queden unidos pieza y clad.

Para el estudio y comparación de resultados entre diferentes modelos se toma la sección mencionada anteriormente con los nodos especificados antes y se emplea una escala de temperaturas igual para todas las muestras y con una misma escala de colores.

Como se mencionó anteriormente el punto de fusión del titanio es de aproximadamente 1670 °C (1943 K) mientras que el del Ti-6Al-4V es de aproximadamente 1650 °C (1923 K).

Para la simulación de aporte de polvo se analizarán los casos de Ti-6Al-4V sobre Ti, de Ti sobre Ti y de Ti-6Al-4V sobre Ti-6Al-4V.

6.6.1.1. *Ti-6Al-4V sobre Ti.*

Para el caso de Ti-6Al-4V se obtiene una distribución de temperaturas en la geometría como la mostrada en la Figura 64. Ésta muestra el paso 40 de la simulación en el instante de tiempo de 1,332 s. Se emplea una escala de temperaturas ajustada de acuerdo a lo que deseamos ver con las temperaturas de fusión del Ti y del Ti-6Al-4V (1943 K y 1923 K respectivamente) incluidas.

Como se observa en dicha figura hay una ligera penetración de la isoterma de fusión en la placa, con lo que eso quiere decir que se fundirá parte de la placa de Ti permitiendo que el Ti-6Al-4V penetre dentro y que luego en el proceso de enfriamiento ambos, placa y clad, queden unidos.

Si bien la penetración no es mucha, cabe resaltar que en un proceso real se emplearían cordones superpuestos con lo cual, al aplicar varios cordones, dicho problema sería subsanado.

Se han graficado con Excel las curvas con la evolución de la temperatura para los nodos anteriormente mencionados. El objetivo es tener una mayor comprensión de lo que pasa durante la simulación y tener una base para ver qué transformaciones de fase tienen lugar y si se alcanza una velocidad de enfriamiento suficiente para que se dé la transformación martensítica.

Esto se analizará mediante el empleo de una estimación por mínimos cuadrados en el tramo de enfriamiento más rápido que será crítico en nuestro proceso.

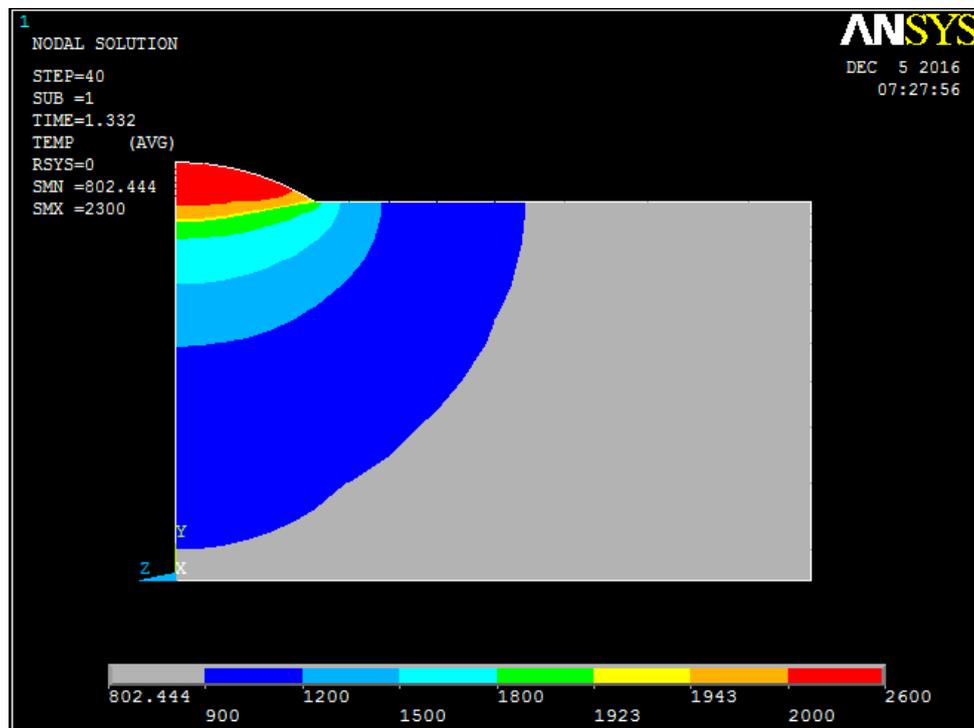


Figura 66: Corte aplicado sobre la geometría de aporte de polvo Ti-6Al-4V sobre Ti en el proceso de calentamiento.

El método de mínimos cuadrados se aplicó en el nodo 15370 por ser el que se encuentra en el punto más representativo al estar en la zona intermedia entre el clad y la propia placa.

Empleando la estimación lineal en la zona de enfriamiento más rápido de este nodo (entre 1,2987 s y 1,6983 s) se obtiene una velocidad de enfriamiento de -2503,927 K/s, velocidad muy superior a la que determinaba la transformación martensítica (683 K/s).

Por lo tanto lo que tenemos es que la base inicialmente está en estado α con pequeñas cantidades de β . En el momento en que se aporta el material fundido se forma fase β , que posteriormente se enfriará a gran velocidad teniendo lugar la transformación martensítica dando lugar a α -martensita. La fase β que se enfríe a menor velocidad dará lugar a fase α con pequeñas cantidades de fase β retenida.

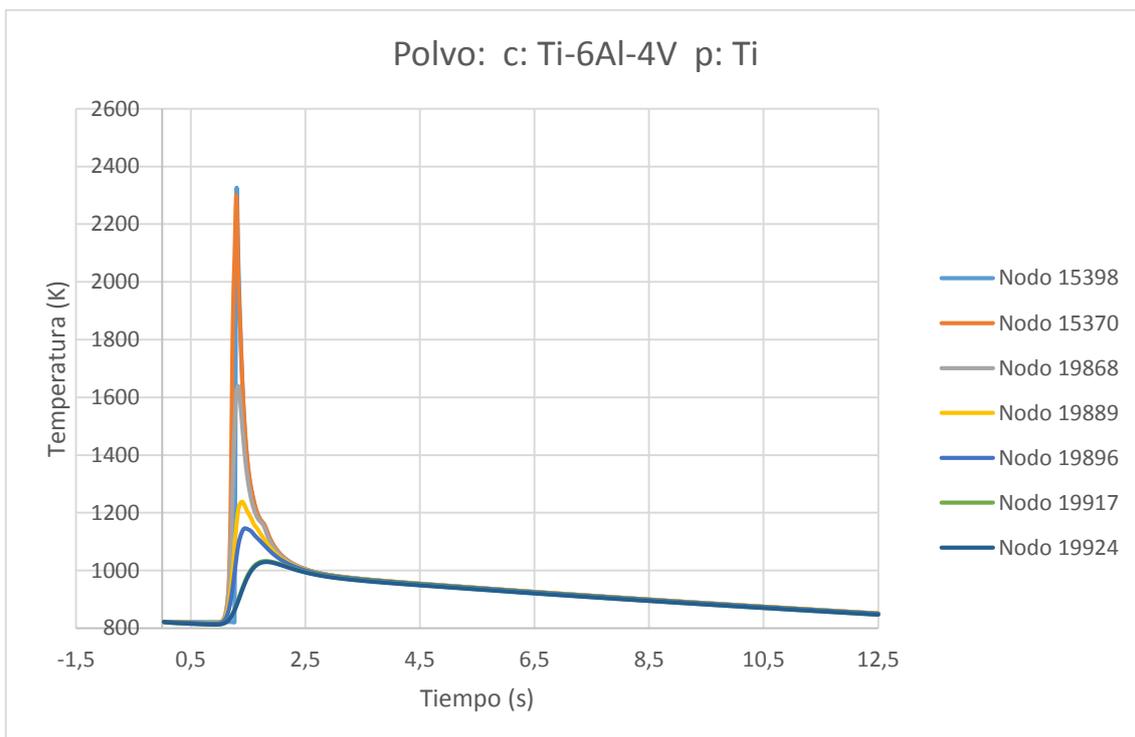


Figura 67: Evolución de las temperaturas para el aporte de polvo de Ti-6Al-4V sobre placa de Ti.

6.6.1.2. *Ti sobre Ti.*

Para el caso de un clad de Ti sobre una placa de Ti se obtiene una distribución de temperaturas en la sección de la pieza como la mostrada en la Figura 68.

Como se observa hay penetración de la isoterma de fusión pues se alcanza a fundir la parte superior de la placa pudiendo penetrar el estrato fundido. Sin embargo es una penetración algo menor que para el caso anterior, algo comprensible puesto que el Ti tiene una temperatura de fusión 20 °C mayor que el Ti-6Al-4V.

Respecto a la evolución de la temperatura con el tiempo, se puede observar en la Figura 69.

Respecto a las fases, se da lo mismo que en el caso anterior. Se empieza con α con algo de fase β retenida. Una vez aportado el estrato fundido, tendrá lugar la transformación martensítica (nuevamente se vuelve a superar la velocidad de enfriamiento de 683 K/s habiendo una velocidad de 2533,32013 K/s entre 1,2987 s y 1,6983 s). Esta martensita dará lugar luego a α -martensita. La fase β que se enfría a menor velocidad dará lugar a fase α con pequeñas cantidades de fase β retenida.

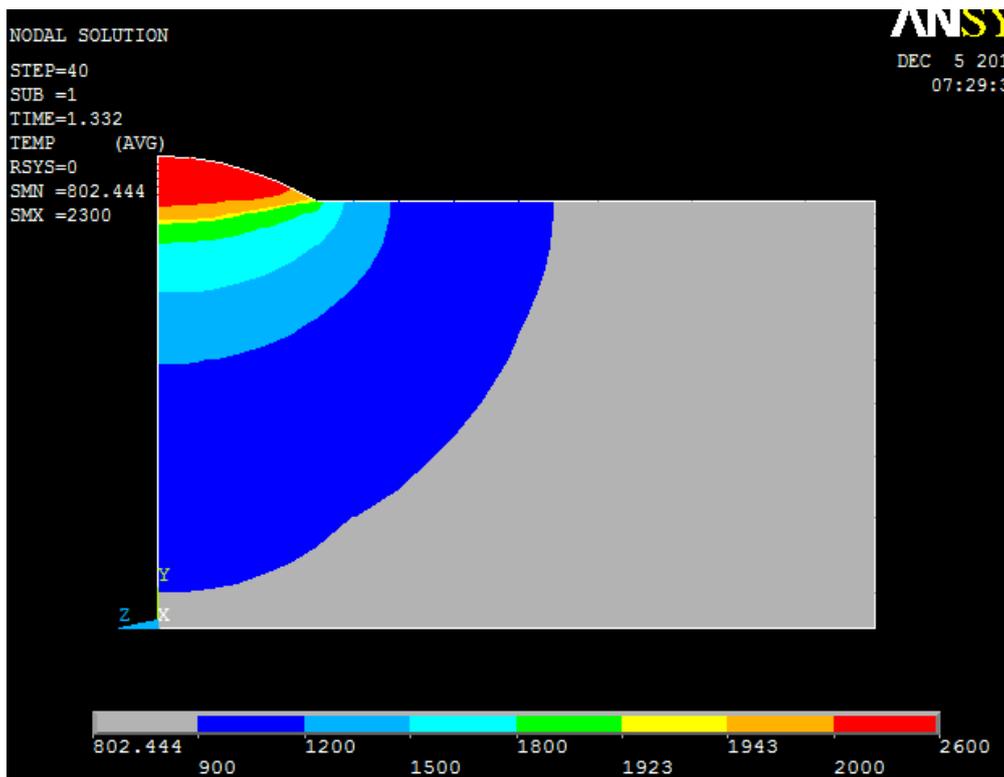


Figura 68: Corte aplicado sobre la geometría de aporte de polvo Ti-6Al-4V sobre Ti en el proceso de calentamiento.

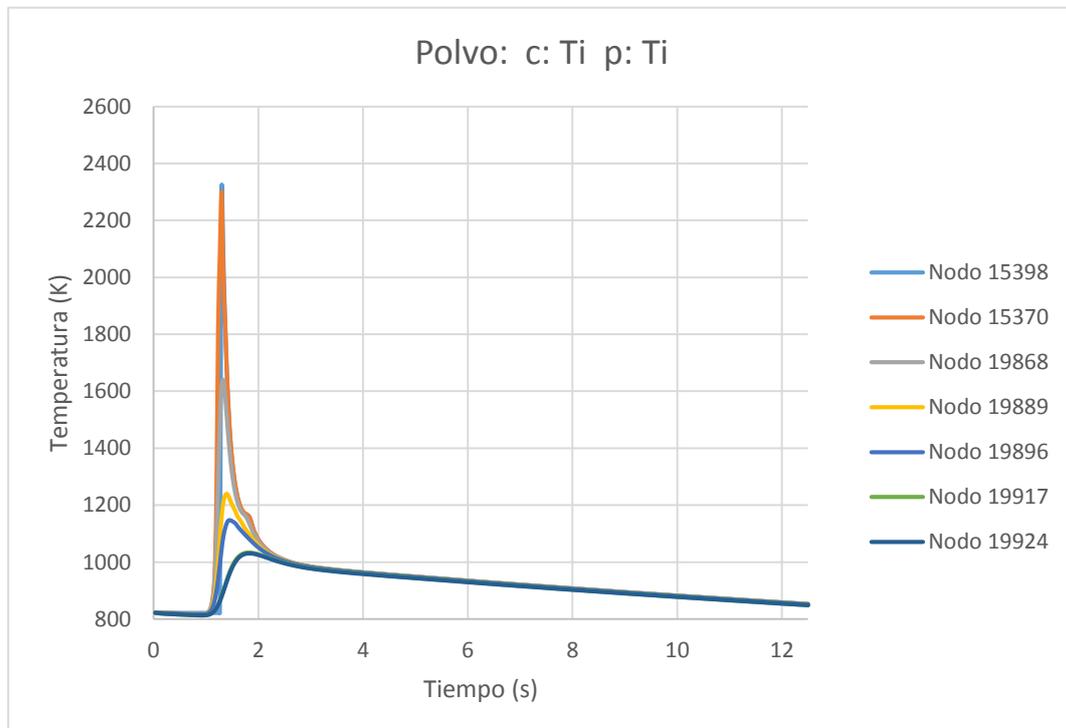


Figura 69: Evolución de las temperaturas para el aporte de polvo de Ti sobre placa de Ti.

6.6.1.3. *Ti-6Al-4V sobre Ti-6Al-4V.*

Para este caso la penetración es mayor que en los casos anteriores como se observa en la Figura 70.

Esto es comprensible debido a la menor temperatura de fusión del Ti-6Al-4V. Como se aprecia en dicha Figura, el color amarillo sería material por encima de la temperatura de fusión del Ti-6Al-4V con lo que se da una penetración completa del material del estrato en el sustrato.

Respecto a las curvas de enfriamiento (ver Figura 71), se darían las transformaciones comentadas para los dos casos anteriores. Se vuelve a pasar la velocidad de enfriamiento de 683 K/s. En esta ocasión es de 2499,0529 K/s entre los instantes 1,2987 s y 1,6983 s.

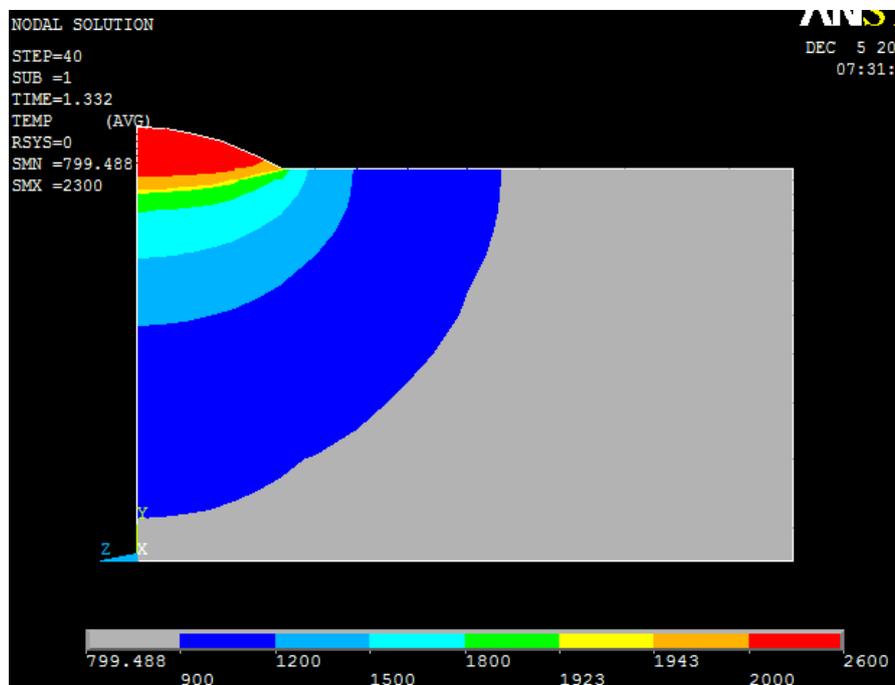


Figura 70: Corte aplicado sobre la geometría de aporte de polvo Ti-6Al-4V sobre Ti-6Al-4V en el proceso de calentamiento.

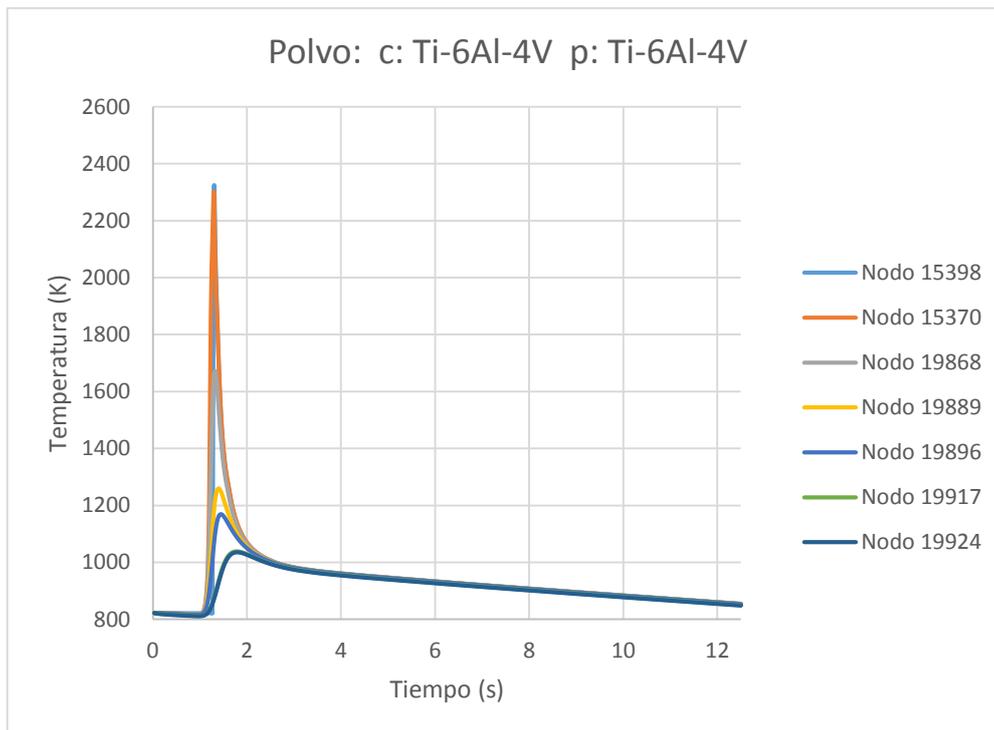


Figura 71: Evolución de las temperaturas para el aporte de polvo de Ti-6Al-4V sobre placa de Ti-6Al-4V.

6.6.2. Aporte de hilo.

Para el análisis de resultados se tendrán en cuenta las consideraciones hechas anteriormente con el aporte de polvo. Es decir, se mirarán los cortes seccionales en el instante de aporte del material fundido para ver si hay penetración en el sustrato, se mirarán las curvas que describen la evolución de la temperatura con el tiempo.

Esto se hará remitiéndose a la sección de la misma posición que en el aporte de polvo y para los mismos nodos representativos.

En lo que respecta a las fases, cabe señalar que se darán las mismas situaciones que para el aporte de polvo, siendo las distribuciones de fases muy parecidas y las transformaciones ocurridas las mismas.

Además se debe señalar que para cada combinación de materiales se realizaron tres simulaciones, considerando que la potencia láser se empleaba exclusivamente en el calentamiento del estrato aportado. Por lo tanto, este estrato se consideró aportado en un primer momento a la misma temperatura que en el aporte de polvo y en las dos simulaciones siguientes se aumentó en 100 °C la temperatura a la que el estrato es aportado para ver los resultados.

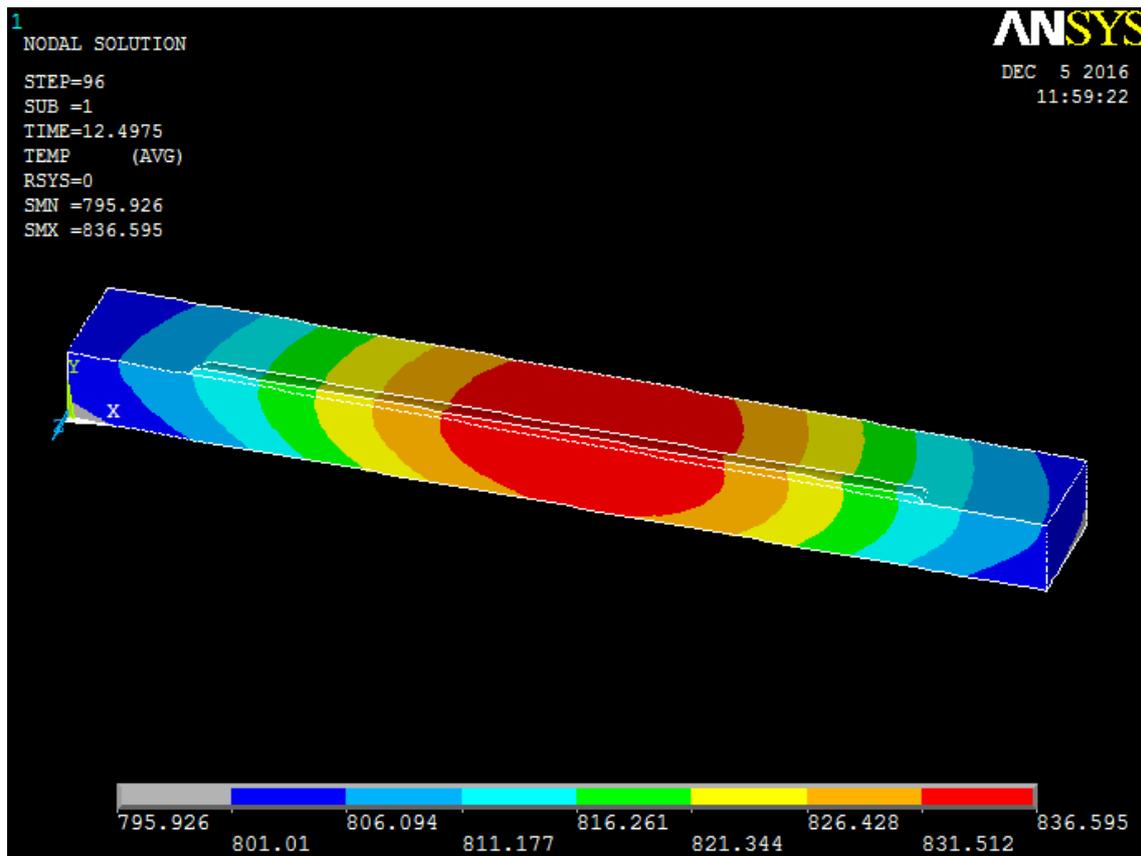


Figura 72: Distribución de temperaturas para una geometría de Ti-6Al-4V sobre Ti al final de la simulación.

6.6.2.1. Ti-6Al-4V sobre Ti.

Para el estudio del aporte de hilo se comenzó inicialmente aportando el material a una temperatura de 2300 K. Se consideró que no había aporte de energía del haz láser a la placa de la pieza. Como se observa en la figura 73 para este caso no se da la penetración del material fundido en la pieza. Esto es debido a que la energía láser que en el aporte de polvo no se empleaba en calentar las partículas de polvo, iba en parte al sustrato calentándolo. Este aporte de calor no se da para el aporte de hilo con lo que para la misma temperatura de aporte no se obtiene la penetración que sí se obtenía para el caso del polvo.

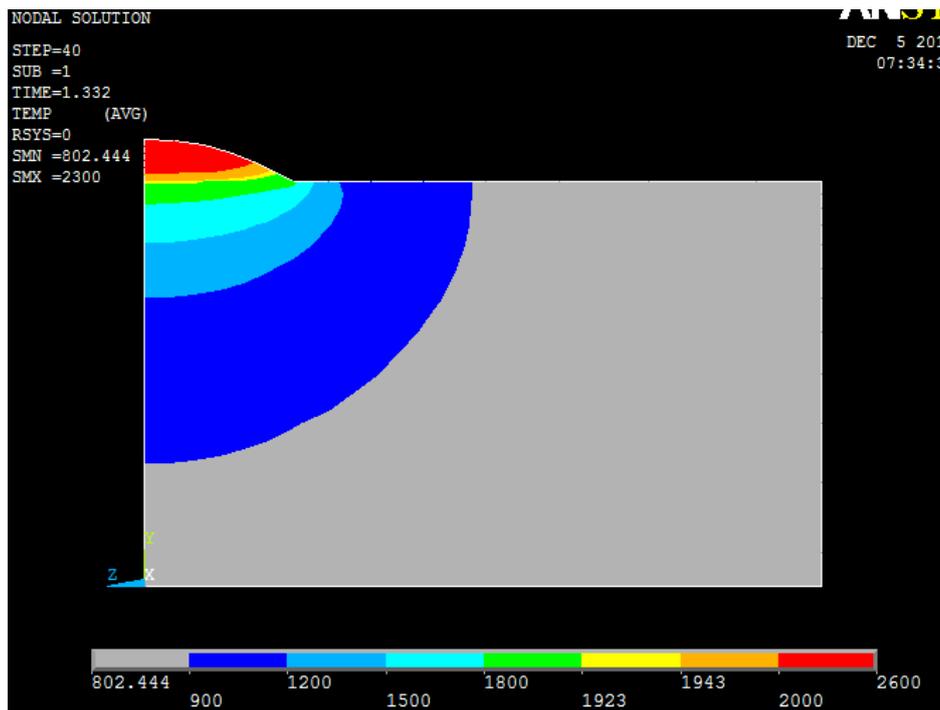


Figura 73: Corte aplicado sobre la geometría de aporte de hilo de Ti-6Al-4V a 2300 K sobre Ti en el proceso de calentamiento.

Seguidamente estudiamos qué pasa si en vez de calentar el material a 2300 K y aportarlo se calienta y aporta a 2400 K.

La distribución de temperaturas obtenida en la sección se puede ver en la Figura 74.

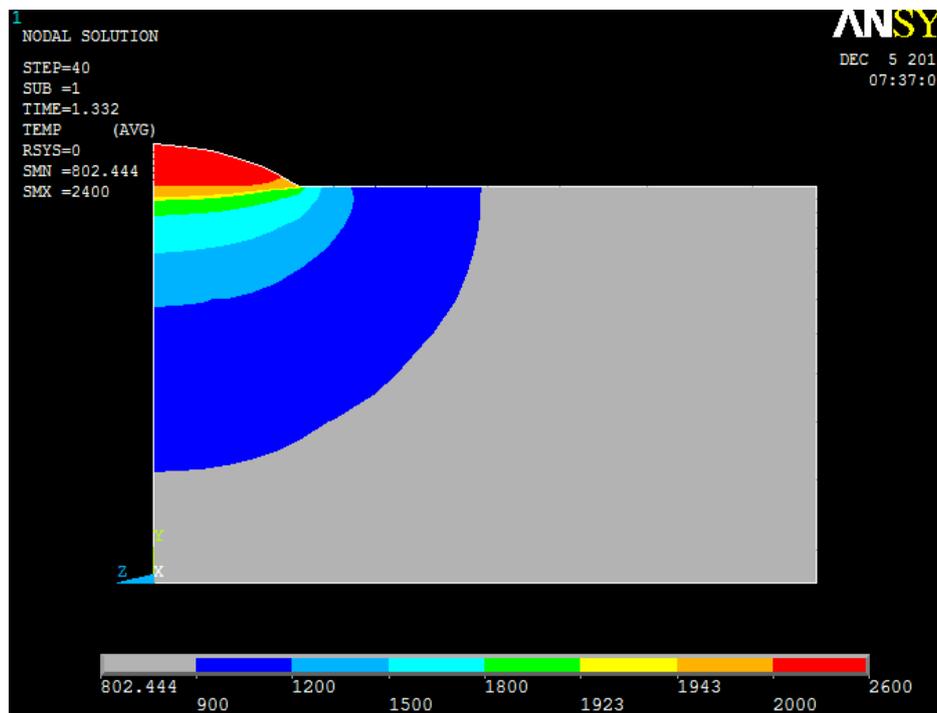


Figura 74: Corte aplicado sobre la geometría de aporte de hilo de Ti-6Al-4V a 2400 K sobre Ti en el proceso de calentamiento

Para este caso sí que se consigue una penetración aunque menor que la obtenida en el aporte de polvo para la misma combinación de materiales (Figura 66). Se observa también que a diferencia de en el aporte de polvo, en el aporte de hilo hay menor influencia en las capas bajas del sustrato. Longitudinalmente el efecto es muy similar pero en el caso de la distribución a lo alto de la pieza, es más influyente el aporte de polvo. Esto está relacionado con esa energía que aporta el láser a la placa en el aporte de polvo.

Para el caso de aporte de material fundido a 2500 K se consigue una penetración mayor que en el aporte de polvo tal y como se ve comparando las Figuras 75 y 66.

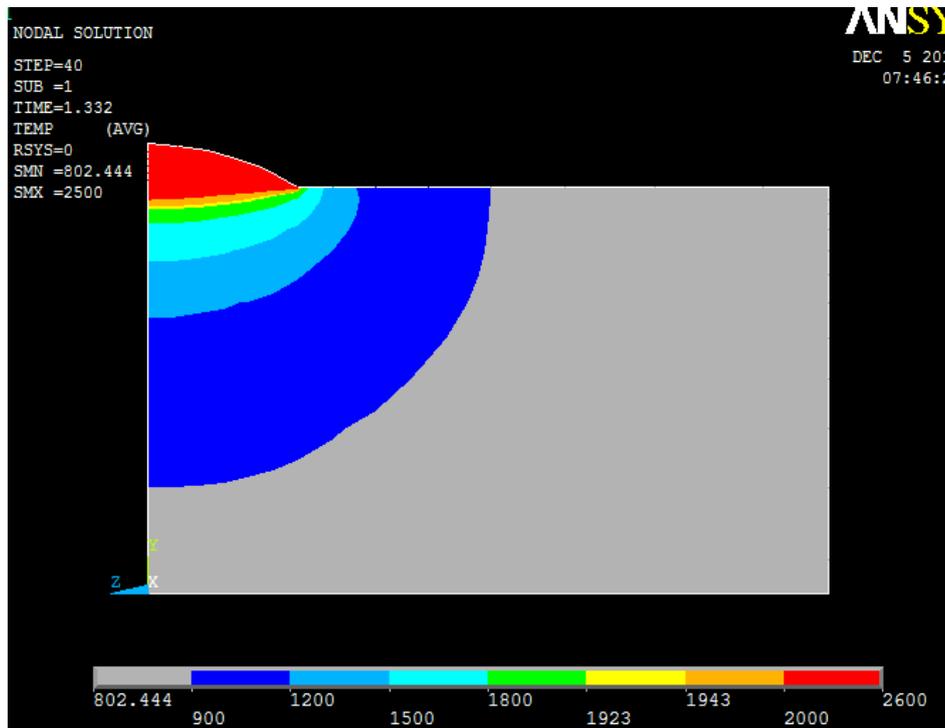


Figura 75: Corte aplicado sobre la geometría de aporte de hilo de Ti-6Al-4V a 2500 K sobre Ti en el proceso de calentamiento

Respecto a las curvas de temperatura con el tiempo, con el aporte por hilo se logran velocidades de calentamiento menores que en el aporte de polvo; sin embargo, esto se compensa al ser las velocidades de enfriamiento también menores durante la mayor parte del tiempo. Cabe resaltar además que para los tres casos comentados de aporte de hilo se consigue superar la velocidad crítica para la transformación martensítica, con lo que la distribución de fases será parecida a la que se tenía con el aporte de polvo.

En la siguiente figura se ve la evolución de las temperaturas con el tiempo para el caso de aporte a 2500 K. Como se ve para los nodos de las zonas de arriba de la pieza (nodos 15398 y 15370) se obtienen calentamientos superiores a los del aporte de polvo (ver Figura 67) mientras que para los nodos de más abajo

se obtienen picos de temperatura menores que con el aporte de polvo aunque también enfriamientos más lentos, como se comentó anteriormente.

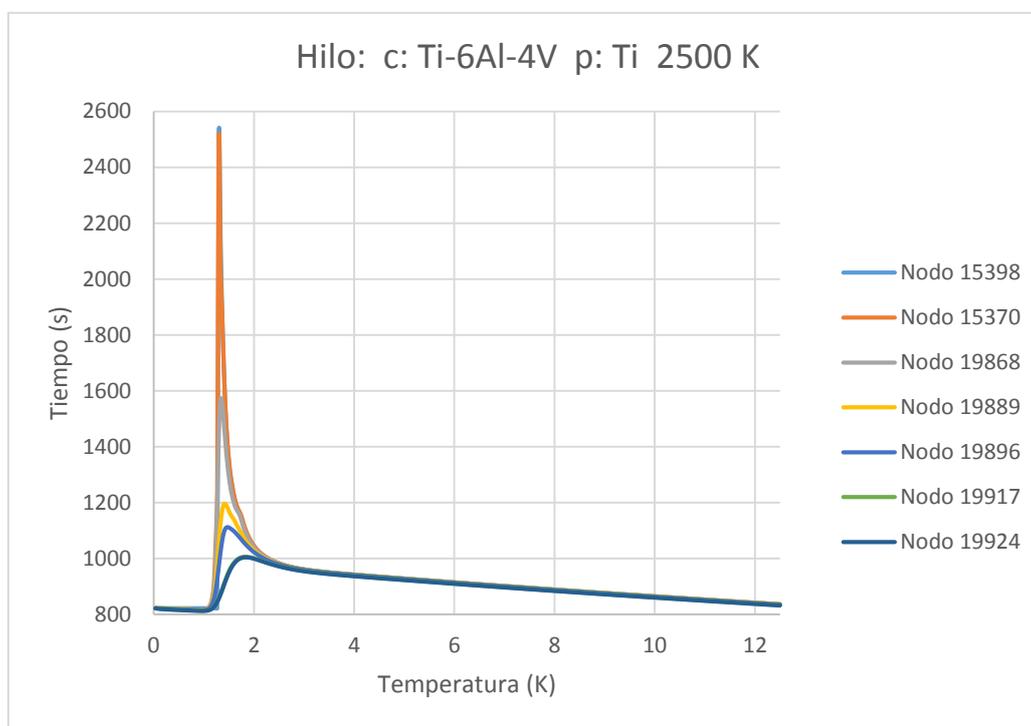


Figura 76: Evolución de las temperaturas para el aporte de hilo a 2500 K de Ti-6Al-4V sobre placa de Ti.

6.6.2.2. Ti sobre Ti.

Igual que en el caso anterior, para el estudio del aporte de hilo se simuló el proceso para tres temperaturas de aporte del estrato.

Para la primera simulación se consideró una temperatura de aporte del estrato igual a la que tenía en el proceso de aporte de polvo (2300 K). Para esta simulación no se consigue penetración del estrato en el sustrato tal y como se observa en la Figura 77.

Si se aporta el material sustrato a una temperatura de 2400 K se obtiene una distribución de temperaturas en la sección de la pieza como la observada en la Figura 78. Se consigue una ligera penetración del estrato en el sustrato hasta una profundidad muy similar a la obtenida mediante aporte de polvo. Esto se puede observar comparando las Figuras 78 y 68.

Por último, aportando el material a una temperatura de 2500 K se obtiene una distribución de temperaturas como la observada en la Figura 79. Se obtiene una

penetración muy buena pues el estrato penetra completamente en el sustrato. Se obtiene una penetración mayor que la conseguida mediante aporte de polvo.

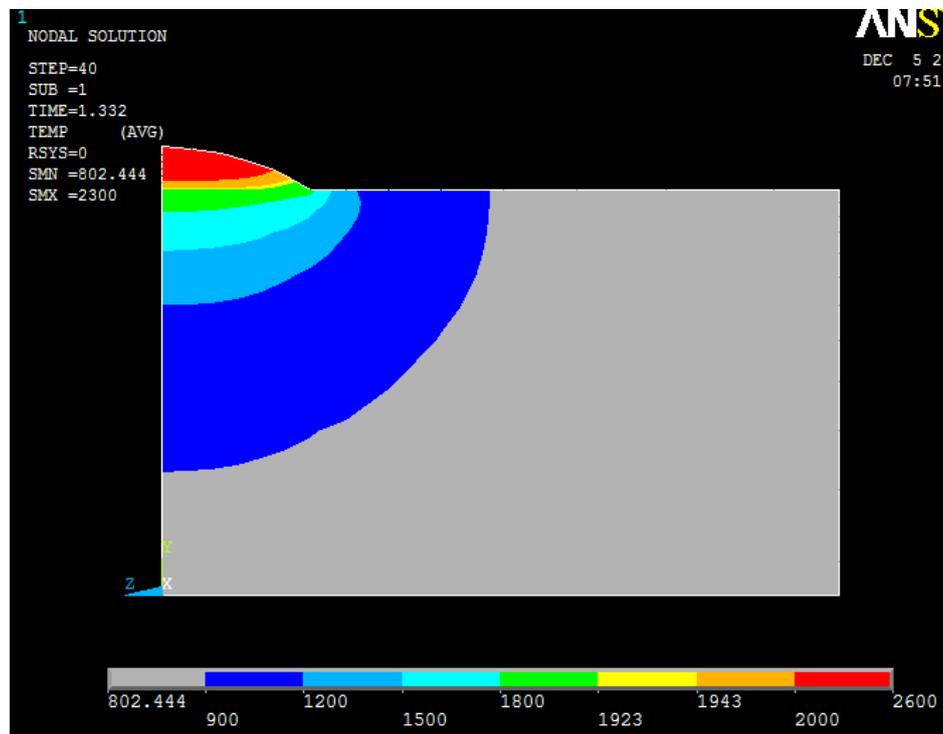


Figura 77: Corte aplicado sobre la geometría de aporte de hilo de Ti a 2300 K sobre Ti en el proceso de calentamiento.

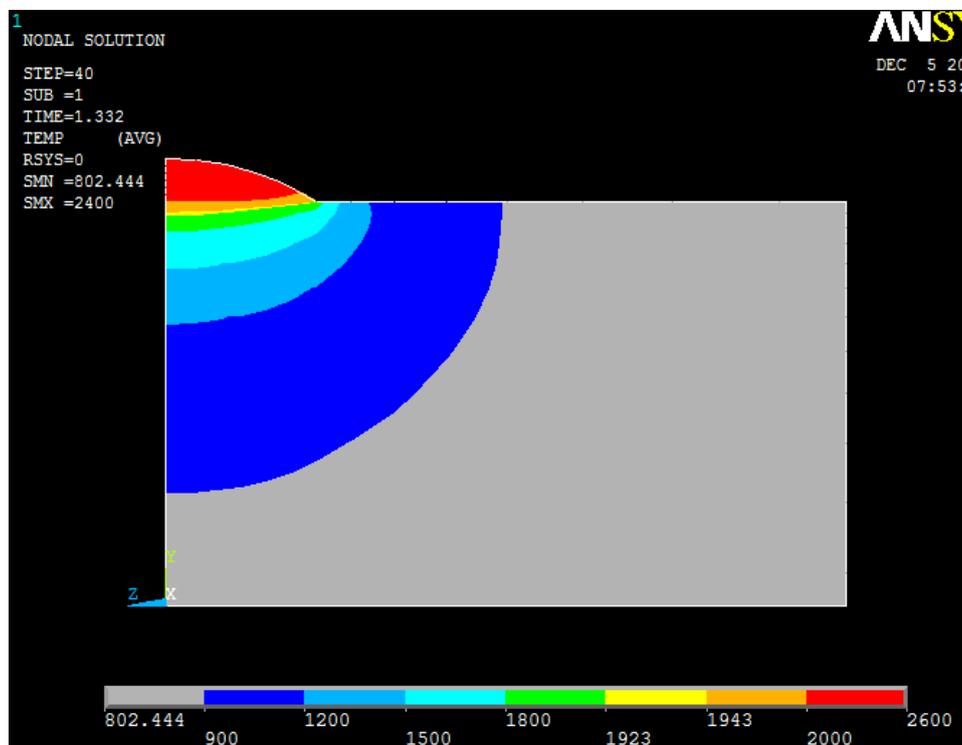


Figura 78: Corte aplicado sobre la geometría de aporte de hilo de Ti a 2400 K sobre Ti en el proceso de calentamiento.

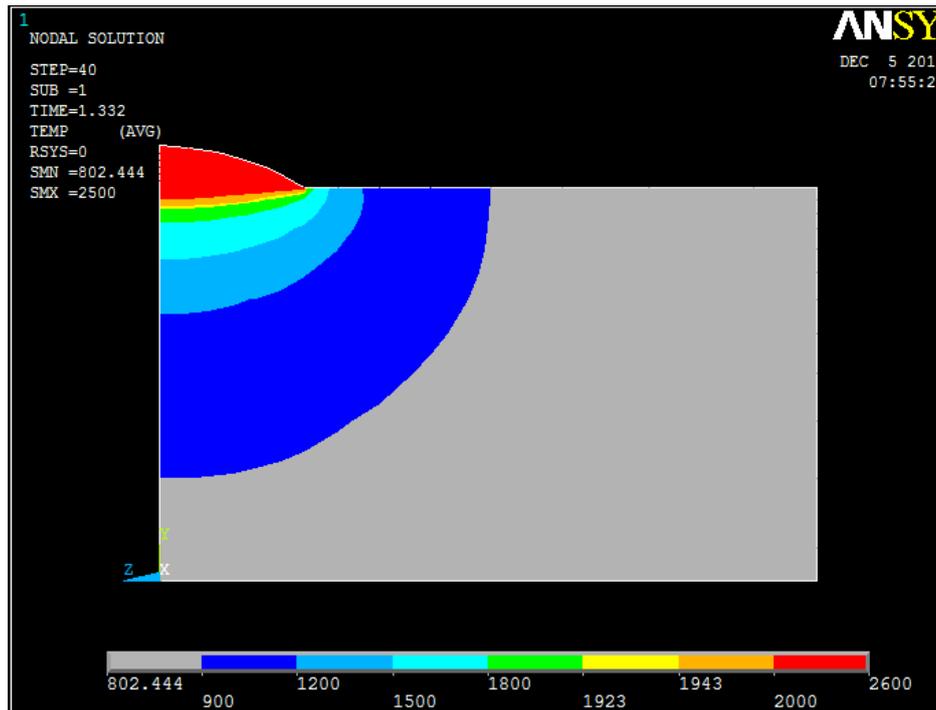


Figura 79: Corte aplicado sobre la geometría de aporte de hilo de Ti a 2500 K sobre Ti en el proceso de calentamiento.

Cabe señalar tras ver la distribución de temperaturas en las secciones que la influencia del aporte por hilo es menor en las capas bajas de la pieza en contraste con el aporte de polvo. Esto es debido como se comentó con anterioridad a la influencia del haz sobre la placa en el aporte de polvo.

Respecto a las curvas de temperatura con el tiempo, con el aporte por hilo de nuevo se logran velocidades de calentamiento menores que en el aporte de polvo; sin embargo, esto se compensa al ser las velocidades de enfriamiento también menores durante la mayor parte del tiempo. Cabe resaltar además que para los tres casos comentados de aporte de hilo se consigue superar la velocidad crítica para la transformación martensítica, con lo que la distribución de fases será parecida a la que se tenía con el aporte de polvo.

En la siguiente figura se ve la evolución de las temperaturas con el tiempo para el caso de aporte a 2500 K. Como se ve para los nodos de las zonas de arriba de la pieza (nodos 15398 y 15370) se obtienen calentamientos superiores a los del aporte de polvo (ver Figura 69) mientras que para los nodos de más abajo se obtienen picos de temperatura menores que con el aporte de polvo aunque también enfriamientos más lentos.

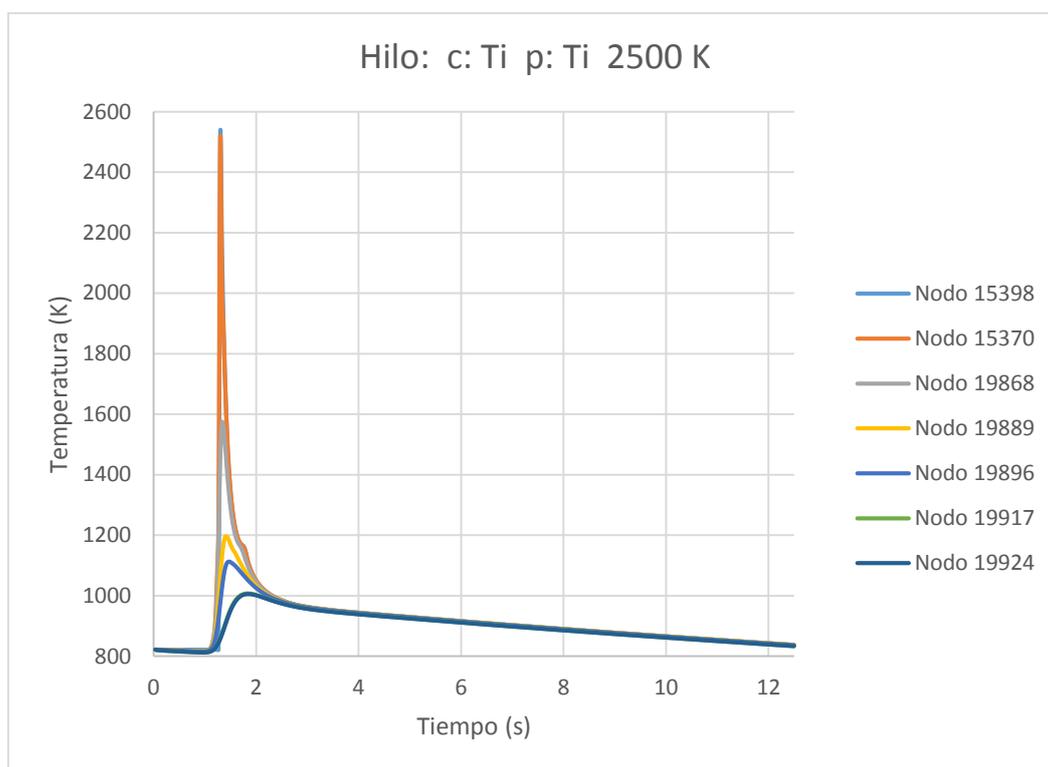


Figura 80: Evolución de las temperaturas para el aporte de hilo a 2500 K de Ti sobre placa de Ti.

6.6.2.3. Ti-6Al-4V sobre Ti-6Al-4V

Igual que en para los casos anteriores, para el estudio del aporte de hilo se simuló el proceso para tres temperaturas de aporte del estrato.

Para la primera simulación se consideró una temperatura de aporte del estrato igual a la que tenía en el proceso de aporte de polvo (2300 K). Para esta simulación se consigue una penetración mínima del estrato en el sustrato tal y como se observa en la Figura 81. En este caso se consigue una penetración mientras que para los casos de Ti-6Al-4V sobre Ti y Ti sobre Ti no se conseguía ya que las placas eran de titanio el cual presenta una temperatura de fusión mayor que el Ti-6Al-4V. De todas formas la penetración es mínima, si se desea una penetración que dé lugar a un clad de interés habrá que aportar el estrato a una temperatura mayor.

Si se aporta el material sustrato a una temperatura de 2400 K se obtiene una distribución de temperaturas en la sección de la pieza como la observada en la Figura 82. Se consigue una buena penetración del estrato en el sustrato aunque no tan buena como la obtenida mediante aporte de polvo. Esto se puede observar comparando las Figuras 82 y 70.

Por último, aportando el material a una temperatura de 2500 K se obtiene una distribución de temperaturas como la observada en la Figura 83. Se obtiene una

penetración muy buena pues el estrato penetra completamente en el sustrato. Se obtiene una penetración mayor que la conseguida mediante aporte de polvo.

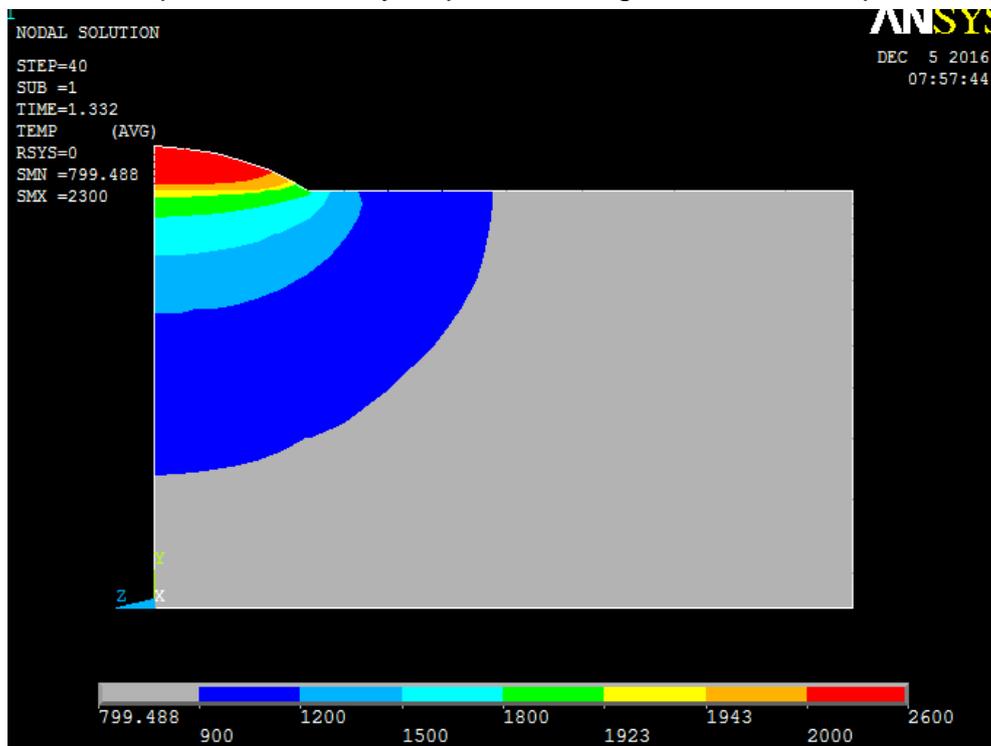


Figura 81: Corte aplicado sobre la geometría de aporte de hilo de Ti-6Al-4V a 2300 K sobre Ti-6Al-4V en el proceso de calentamiento.

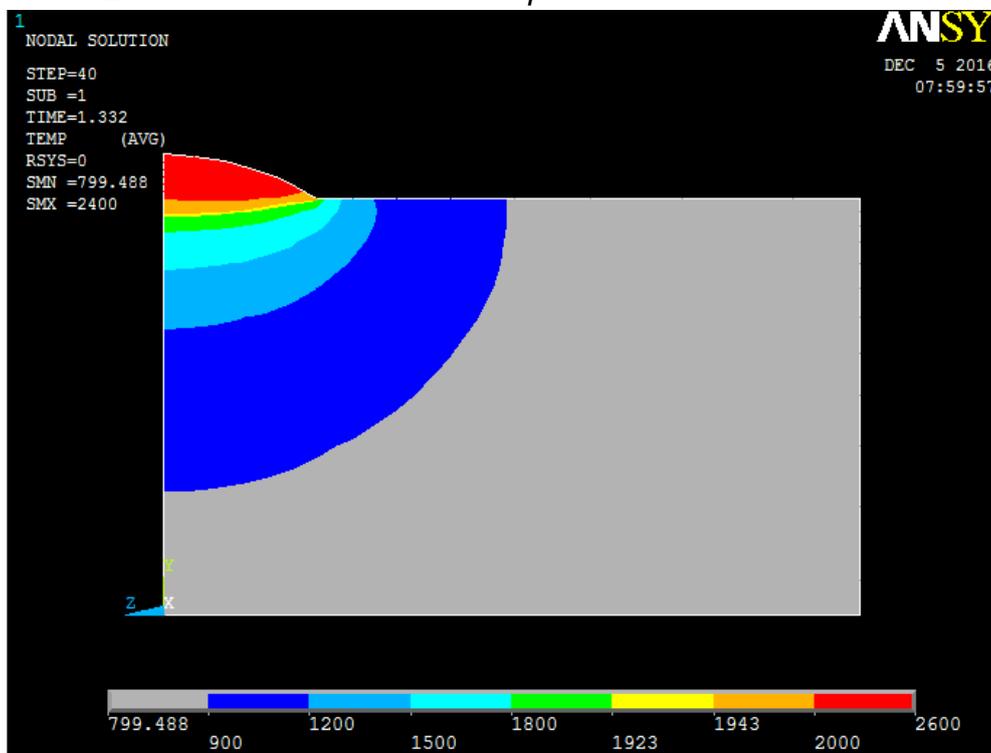


Figura 82: Corte aplicado sobre la geometría de aporte de hilo de Ti-6Al-4V a 2400 K sobre Ti-6Al-4V en el proceso de calentamiento.

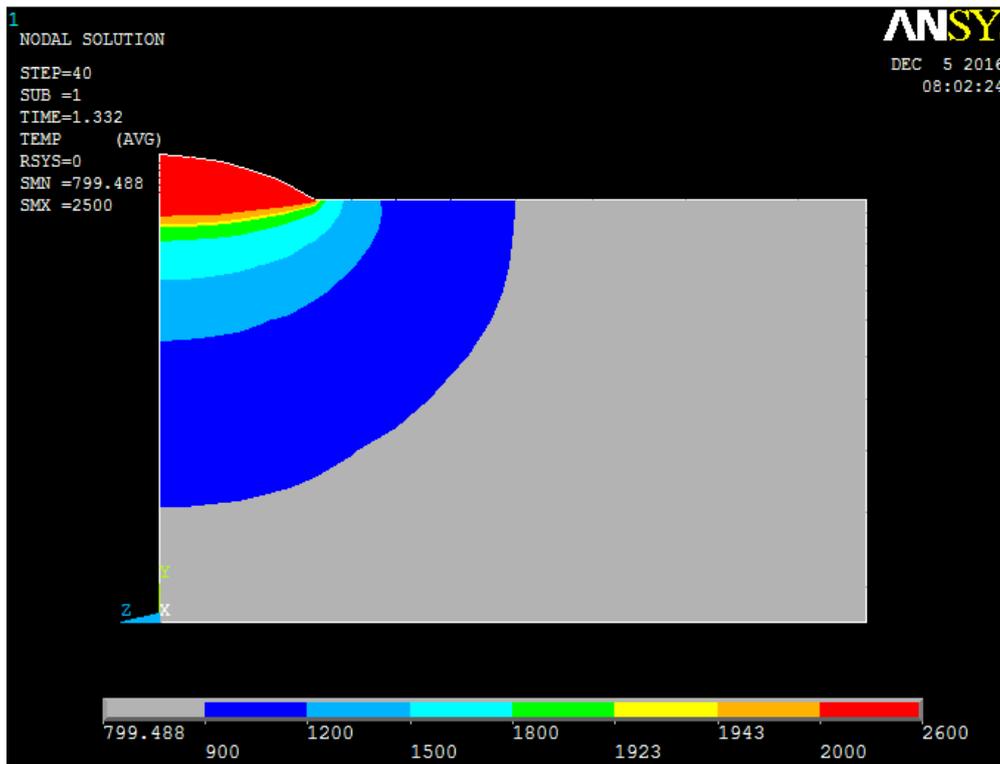


Figura 83: Corte aplicado sobre la geometría de aporte de hilo de Ti-6Al-4V a 2500 K sobre Ti-6Al-4V en el proceso de calentamiento.

Cabe señalar tras ver la distribución de temperaturas en las secciones que la influencia del aporte por hilo es menor en las capas bajas de la pieza en contraste con el aporte de polvo. Esto es debido como se comentó con anterioridad a la influencia del haz sobre la placa en el aporte de polvo.

Respecto a las curvas de temperatura con el tiempo, con el aporte por hilo de nuevo se logran velocidades de calentamiento menores que en el aporte de polvo; sin embargo, esto se compensa al ser las velocidades de enfriamiento también menores durante la mayor parte del tiempo. Cabe resaltar además que para los tres casos comentados de aporte de hilo se consigue superar la velocidad crítica para la transformación martensítica, con lo que la distribución de fases será parecida a la que se tenía con el aporte de polvo.

En la siguiente figura se ve la evolución de las temperaturas con el tiempo para el caso de aporte a 2500 K. Como se ve para los nodos de las zonas de arriba de la pieza (nodos 15398 y 15370) se obtienen calentamientos superiores a los del aporte de polvo (ver Figura 71) mientras que para los nodos de más abajo se obtienen picos de temperatura menores que con el aporte de polvo aunque también enfriamientos más lentos.

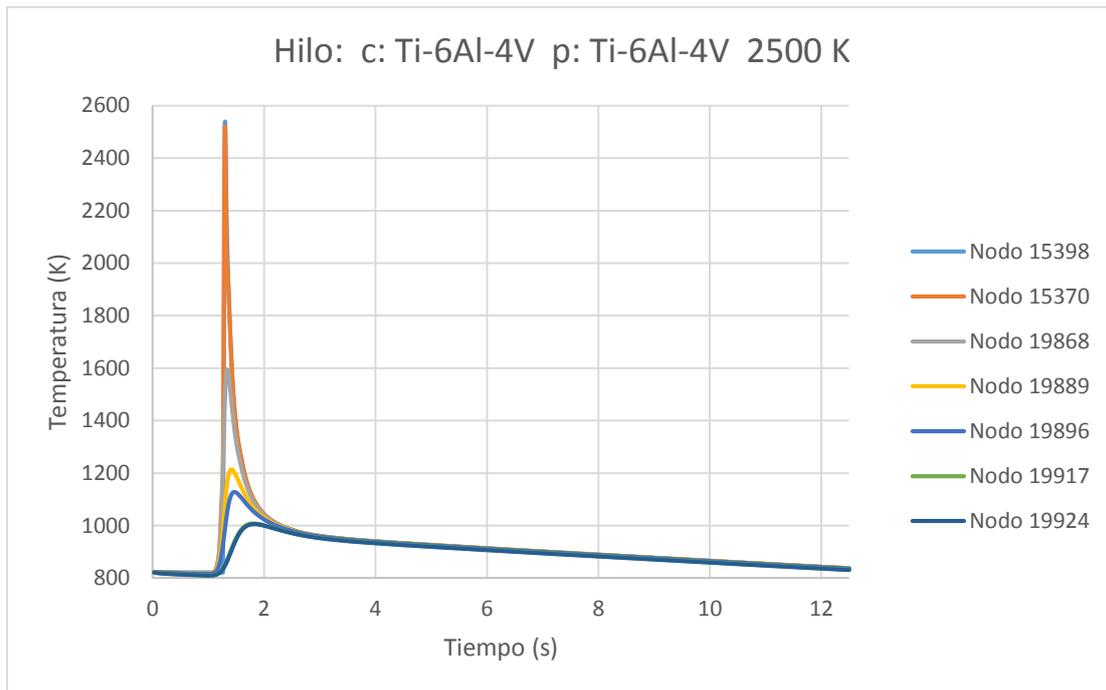


Figura 84: Evolución de las temperaturas para el aporte de hilo a 2500 K de Ti-6Al-4V sobre placa de Ti-6Al-4V.

7. Conclusiones.

El titanio y sus aleaciones constituyen una importante materia prima para la fabricación de multitud de componentes de gran importancia en diversos sectores. Es por ello que la versatilidad de la energía láser resulta interesante para el desarrollo de nuevas técnicas de fabricación, reparación, etc. que permitan obtener productos de alta calidad.

Como se vio las propiedades del Ti y del Ti-6Al-4V resultan muy útiles en ciertas aplicaciones. Es por ello que el estudio del láser cladding como herramienta tanto de fabricación como de reparación resulta importante.

A lo largo del documento se presentaron las propiedades de ambos materiales, se estudiaron las diversas variantes que presenta el láser cladding y la multitud de aplicaciones que presenta esta técnica analizando tanto sus ventajas como sus inconvenientes.

Se presentaron las bases de la simulación empleada para representar los procesos de láser cladding y se obtuvieron una serie de resultados relacionados con la evolución térmica del material que pueden ser empleadas como ayuda en procesos de fabricación, permitiendo un ahorro de recursos tanto en la forma de material como de energía.

Respecto a la comparación de ambas técnicas estudiadas el láser cladding por aporte de polvo presenta una ventaja que no presenta el aporte de hilo y es que al tener lugar un aporte de energía en forma de haz láser sobre la placa de material se consigue reducir la temperatura a la que habrá que aplicar el sustrato, pero no sólo eso sino que la placa presentará durante el proceso de cladding menores gradientes térmicos que en el aporte de hilo lo que puede evitar problemas como la aparición de defectos en la pieza tales como grietas. Es decir, se consigue una mejor transferencia de calor al calentar la pieza base.

Por otro lado el láser cladding por aporte de hilo presenta una serie de ventajas sobre el aporte de polvo.

Para empezar está la materia prima. El producir hilo metálico se consigue mediante un proceso de estirado que resulta mucho más barato que el proceso de atomización que se emplea para la producción del polvo metálico. Sin embargo, cabe señalar que tratándose de una tecnología relativamente novedosa no existen todavía en el mercado una gran variedad de materiales.

Además de los costes de la materia prima está el hecho de que esta se desperdicia en el aporte de polvo pues del orden del 50 % del polvo sale dispersado y no acaba aportado sobre el sustrato. Sin embargo en el aporte de hilo el desperdicio de material es mínimo en comparación obteniéndose un aprovechamiento prácticamente completo del material.

Otra ventaja del aporte de hilo sería la necesidad de una menor cantidad de energía de aporte para el proceso, pues elevar la temperatura sólo del material de aporte implica un menor aporte energético que calentar la placa. Si bien esto como se comentó antes beneficia la transferencia de calor en el aporte de polvo sobre el aporte de hilo, mediante una elección óptima de la dirección y posición de aporte del hilo se podría solucionar este problema de transferencia sumándose al ahorro de costes en material el ahorro en costes de energía aparte de que se podrían usar láseres de menor potencia.

Es por esto que se considera que el láser cladding y dentro de él, el aporte por hilo, es una técnica de características muy interesantes para procesos de fabricación, reparación, etc. lo que aunado a materiales como el Ti y el Ti-6Al-4V puede producir piezas y equipos de gran calidad.

Bibliografía.

William F. Smith, Javad Hashemi. *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales*. McGrawhill.

Donald R. Askeland, Pradeep P. Fulay. *Fundamentos de ingeniería y ciencia de materiales*. Cengage Learning.

Miguel Dorronsolo Mendiguren. *La tecnología láser. Fundamentos, aplicaciones y tendencias*. McGrawhill.

Pilar Ariza Moreno. *Método de los elementos finitos: introducción a ANSYS*. Sevilla: Universidad. Secretariado de Publicaciones.

Francisco Javier Gil Mur. *Aleaciones ligeras*. Edicions UPC.

Ehsan Toyserkani, Amir Khajepour & Stephen Corbin. *Laser cladding*. CRC Press.

John F. Ready. *Industrial applications of lasers*. San Diego: Academic Press.

Saeed Moaveni. *Finite element analysis: theory and application with ANSYS*. Pearson Education.

Kenneth C. Mills. *Recommended values of thermophysical properties for selected commercial alloys*. Woodhead Publishing Limited.

Wei Sha & Savko Malinov. *Titanium alloys: modelling of microstructure, properties and applications*. Woodhead Publishing in Materials.

Vydehi Arun Joshi. *Titanium alloys. An Atlas of Structures and Fracture Features*. Taylor & Francis Group.

G. Lütjering & J. C. Williams. *Engineering materials and processes. Titanium*. Springer.

Rodney Boyer, Gerhard Welsch & E. W. Collings. *Materials Properties Handbook. Titanium Alloys*. ASM International.