



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial

Desarrollo de aleaciones de titanio mediante técnicas  
pulvimetalúrgicas, para aplicaciones aeronáuticas a  
elevada temperatura

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

AUTOR/A: Chaali, Imad-Eddine

Tutor/a: Amigó Borrás, Vicente

Cotutor/a externo: SAVIAK, MARIIA

CURSO ACADÉMICO: 2022/2023

**(PORTADA ETSII)**

## RESUMEN

En la industria aeronáutica se han desarrollado muchas aleaciones de titanio para diferentes propósitos, siendo la más utilizada y la que sirve de referencia la Ti-6Al-4V. Sin embargo, en los últimos años la tendencia ha sido la de trabajar con aleaciones de titanio beta, principalmente de las familias Ti-Mo y Ti-V., debido al mejor desempeño de estas a elevadas temperaturas, principalmente en su mayor resistencia frente a la oxidación. Sin embargo, la aplicación de técnicas pulvimetalúrgicas sigue siendo un reto hoy en día para la obtención y desarrollo de estas aleaciones al proporcionar diferentes ventajas, junto a distintas limitaciones. Por ello, se plantea en este trabajo explorar las posibilidades de la técnica con dos aleaciones de titanio beta, de gran uso en este sector, como la Ti-11.5Mo-6Zr-4.5Sn y la Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al. Se utilizará la técnica convencional de compactación-sinterización de la mezcla elemental de polvos. Junto a estas, se obtendrán, también, muestras de la aleación Ti6Al-4V, de referencia. De las aleaciones obtenidas se caracterizará su microestructura y se ensayarán a flexión, tracción y micropunzonado para determinar sus propiedades mecánicas a temperatura ambiente, así como su resistencia frente a la oxidación a elevadas temperaturas (700 - 800°C). Con ello, para este TFG se ha realizado un trabajo bibliográfico junto a una experimentación en laboratorio que abarca diferentes técnicas (difracción de rayos X, microscopía óptica y electrónica de barrido, ensayos mecánicos) que proporcionan un saber hacer necesario para el planteamiento de trabajos profesionales futuros.

**Palabras clave:** Titanio, Titanio alfa, Titanio beta; microestructura; oxidación; ensayos mecánicos; propiedades mecánicas; Ti-11.5Mo-6Zr-4.5Sn; Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al; Ti-6Al-4V, Ti-11, Ti-64, Ti-15333.

**ODS:** (9) Industria, Innovación e Infraestructura; (7) Energía Asequible y No Contaminante; (13) Acción por el Clima; (8) Trabajo Decente y Crecimiento Económico; (12) Producción y Consumo Responsables; (17) Alianzas para lograr los Objetivos

## RESUM

En la indústria aeronàutica s'han desenvolupat moltes al·leacions de titani per a diferents propòsits, sent la més utilitzada i la que serveix de referència la Ti-6Al-4V. No obstant això, en els últims anys la tendència ha estat la de treballar amb al·leacions de titani beta, principalment de les famílies Ti-Mo i Ti-V., a causa del millor rendiment d'aquestes a altes temperatures, principalment en la seva major resistència front a l'oxidació. No obstant això, l'aplicació de tècniques pulvimetal·lúrgiques continua sent un repte avui dia per a l'obtenció i desenvolupament d'aquestes al·leacions al proporcionar diferents avantatges, al costat de diverses limitacions. Per això, es planteja en aquest treball explorar les possibilitats de la tècnica amb dues al·leacions de titani beta, de gran ús en aquest sector, com la Ti-11.5Mo-6Zr-4.5Sn i la Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al. S'utilitzarà la tècnica convencional de compactació-sinterització de la barreja elemental de pols. Al costat d'aquestes, s'obtingran, també, mostres de l'al·leació Ti6Al-4V, de referència. De les al·leacions obtingudes es caracteritzarà la seva microestructura i es provaran a flexió, tracció i micropunçonat per a determinar les seves propietats mecàniques a temperatura ambient, així com la seva resistència front a l'oxidació a altes temperatures (700 i 800 °C). Amb això, per a aquest TFG s'ha realitzat un treball bibliogràfic al costat d'una experimentació en laboratori que abasta diferents tècniques (difracció de raigs X, microscòpia òptica i electrònica de rastreig, assajos mecànics) que proporcionen un saber fer necessari per al plantejament de treballs professionals futurs.

**Paraules clau:** Titani, Titani alfa, Titani beta; microestructura; oxidació; assajos mecànics; propietats mecàniques; Ti-11.5Mo-6Zr-4.5Sn; Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al; Ti-6Al-4V, Ti-11, Ti-64, Ti-15333.

**ODS:** (9) Indústria, Innovació i Infraestructura; (7) Energia Assequible i Neta; (13) Acció pel Clima; (8) Treball Digne i Creixement Econòmic; (12) Producció i Consum Responsables; (17) Aliances per a aconseguir els Objectius

## ABSTRACT

In the aerospace industry, many titanium alloys have been developed for various purposes, with Ti-6Al-4V being the most commonly used and serving as a reference. However, in recent years the trend has been to work with beta titanium alloys, mainly from the Ti-Mo and Ti-V families, due to their better performance at high temperatures, especially in terms of their enhanced resistance to oxidation. Nonetheless, the application of powder metallurgy techniques remains a challenge today for the production and development of these alloys, offering various advantages alongside certain limitations. Therefore, this study aims to explore the possibilities of the technique with two beta titanium alloys widely used in this sector, such as Ti-11.5Mo-6Zr-4.5Sn and Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al. The conventional technique of elemental powder compaction-sintering will be used. In addition, samples of the reference alloy Ti6Al-4V will also be obtained. The obtained alloys will be characterized for their microstructure and will undergo bending, tensile, and micro-punch tests to determine their mechanical properties at room temperature, as well as their resistance to oxidation at elevated temperatures (700 and 800 °C). In this regard, for this TFG (Final Degree Project), a bibliographic review combined with laboratory experimentation encompassing various techniques (X-ray diffraction, optical and scanning electron microscopy, mechanical tests) was carried out, providing the necessary expertise for the design of future professional works.

**Keywords:** Titanium, Alpha Titanium, Beta Titanium; microstructure; oxidation; mechanical tests; mechanical properties; Ti-11.5Mo-6Zr-4.5Sn; Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al; Ti-6Al-4V, Ti-11, Ti-64, Ti-15333.

**ODS:** (9) Industry, Innovation, and Infrastructure; (7) Affordable and Clean Energy; (13) Climate Action; (8) Decent Work and Economic Growth; (12) Responsible Consumption and Production; (17) Partnerships to achieve goals

# Índice de documentos

Documento 1: Memoria

Documento2: Presupuesto

## Índice documento 1: Memoria

1. Antecedentes .....	9
2. Motivación .....	11
3. Objetivos .....	12
4. Metodología .....	13
4.1 Fabricación de materiales. ....	13
4.1.1 Composición de los materiales .....	13
4.1.2 Mezcla de polvos.....	13
4.1.3 Compactación de los polvos.....	14
4.1.4 Sinterización de los compactos .....	15
4.1.5 Cálculo de la densidad y la porosidad mediante el método de Arquímedes.....	16
4.1.6 Cálculo del módulo de elasticidad.....	17
5. Caracterización mecánica.....	17
5.1 Ensayo de flexión a cuatro puntos .....	17
5.2 Ensayo de microtracción .....	18
5.3 Ensayo de micropunzonado o “Small Punch” .....	19
6. Caracterización microestructural .....	20
6.1 Preparación metalográfica .....	20
6.2 Microscopía electrónica de barrido (FE-SEM): Difracción de electrones retrodispersados (EBSD).....	20
7. Estudio de la corrosión a alta temperatura .....	21
8. Resultados .....	22
8.1 Caracterización de los compactos.....	22
8.2 Caracterización de los sinterizados .....	24
8.3 Método de Arquímedes .....	26
8.4 Cálculo del módulo elástico mediante ultrasonidos .....	28
8.5 Caracterización mecánica.....	29
8.5.1 Ensayo de flexión a cuatro puntos .....	29
8.5.2 Ensayo de microtracción .....	31
8.5.3 Ensayo de micropunzonado “Small Punch” .....	33
8.5.4 Microscopía electrónica de barrido - EBSD.....	35

8.6 Estudio de la corrosión a alta temperatura .....	37
9. Discusión .....	40
10. Conclusiones.....	41
11. Bibliografía .....	42

## Índice documento 2: Presupuesto

1. Cuadro de precios unitarios de mano de obra.....	44
2. Cuadro de precios unitarios de mano de materiales .....	44
3. Cuadro de precios unitarios de maquinaria y equipos .....	45
4. Cuadro de precios descompuestos de la partida presupuestaria 1: Selección y cálculo de cantidades de polvos.....	46
5. Cuadro de precios descompuestos de la partida presupuestaria 2: Mezclado y compactación de los polvos. ....	47
6. Cuadro de precios descompuestos de la partida presupuestaria 3: Sinterizado de compactos.....	48
7. Cuadro de precios descompuestos de la partida presupuestaria 4: Ensayo de flexión a 4 puntos .....	49
8. Cuadro de precios descompuestos de la partida presupuestaria 5: Ensayo de microtracción .....	50
9. Cuadro de precios descompuestos de la partida presupuestaria 6: Ensayo de micropunzonado .....	51
10. Cuadro de precios descompuestos de la partida presupuestaria 7: Análisis por difracción de rayos X.....	52
11. Cuadro de precios descompuestos de la partida presupuestaria 8: Análisis por microscopía óptica .....	53
12. Cuadro de precios descompuestos de la partida presupuestaria 9: Análisis por FSEM . 54	
13. Cuadro de precios descompuestos de la partida presupuestaria 10: Análisis por EBSD55	
14. Cuadro de precios descompuestos de la partida presupuestaria 11: Análisis de corrosión a alta temperatura .....	56
15. Cuadro de precios descompuestos de la partida presupuestaria 12: Preparación metalográfica .....	57
16. Presupuesto de inversión.....	58

## Índice de figuras

Figura 1 Fases del titanio .....	9
Figura 2 Diagrama de estabilizadores de fase del titanio .....	10
Figura 3 Ciclo de sinterizado.....	16

Figura 4 Geometría de la probeta de tracción .....	18
Figura 5 Comparación de la densidad en verde de las aleaciones .....	23
Figura 6 Comparación de la porosidad en verde de las aleaciones .....	23
Figura 7 Comparación de la densidad relativa en verde de las aleaciones .....	23
Figura 8 Curva tensión-deformación del Ti-11 (Ensayo flexión).....	30
Figura 9 Curva tensión-deformación del Ti-64 (Ensayo flexión).....	30
Figura 10 Curva tensión-deformación del Ti-15333 (Ensayo flexión).....	30
Figura 11 Comparación curvas tensión-deformación (Ensayo flexión) .....	31
Figura 12 Curva tensión-deformaciónTi-11 (Ensayo tracción) .....	32
Figura 13 Curva tensión-deformaciónTi-64 (Ensayo tracción) .....	32
Figura 14 Curva tensión-deformaciónTi-15333 (Ensayo tracción) .....	32
Figura 15 Comparación curvas tensión-deformación (Ensayo tracción).....	33
Figura 16 Curva Fuerza punzonado-desplazamiento Ti-11 .....	34
Figura 17 Curva Fuerza punzonado-desplazamiento Ti-64 .....	34
Figura 18 Curva Fuerza punzonado-desplazamiento Ti-1533 .....	34
Figura 19 Comparación curvas Fuerza punzonado-desplazamiento.....	35
Figura 20 EBSD TI-11 .....	36
Figura 21 EBSD TI-15333 .....	36
Figura 22 EBSD TI-64 .....	36
Figura 23 Curva oxidación Ti-11 .....	38
Figura 24 Curva oxidación Ti-15333 .....	38
Figura 25 Curva oxidación Ti-64 .....	38
Figura 26 Comparación curvas oxidación.....	39



# **DOCUMENTO I: MEMORIA**

## 1. Antecedentes

En la situación actual de la industria aeronáutica, las aleaciones de titanio tienen un rol fundamental gracias a sus propiedades excepcionales de resistencia a la corrosión, alta relación resistencia-peso y resistencia a altas temperaturas.

Para poder aprovechar de la mejor manera las propiedades de las aleaciones de titanio, es fundamental la elección de la técnica más óptima para su fabricación. Tradicionalmente, la fabricación se realiza mediante técnica metalúrgicas tradicionales, como la fundición y la forja. Sin embargo, en las últimas décadas la técnica pulvimetalúrgica está cada vez más presente como una alternativa innovadora y prometedora para la fabricación de las aleaciones de titanio.

La técnica pulvimetalúrgica ofrece ventajas notables en términos de control de la microestructura, la composición química y la densidad del material resultante. Esto se puede traducir en la capacidad de producción de componentes de forma y geometría compleja, con una alta densidad y reducción significativa en la generación de residuos de material.

Hay que tener en cuenta que el titanio en su estado puro a temperatura ambiente presenta una estructura cristalina hexagonal compacta (HCP), conocida como fase alfa ( $\alpha$ ). Sin embargo al aumentar su temperatura se produce una transición de fase, donde la estructura cristalina pasa de ser hexagonal compacta (HCP) a ser cúbica centrada en el cuerpo (CCC). La transición entre estas fases se produce a través de una región de fase mixta conocida como la fase alfa-beta ( $\alpha+\beta$ ). La temperatura exacta a la cual ocurre esta transformación de fase alfa ( $\alpha$ ) a beta ( $\beta$ ) en el titanio, en términos generales, suele ocurrir alrededor de los 882 °C dependiendo de la pureza del metal.

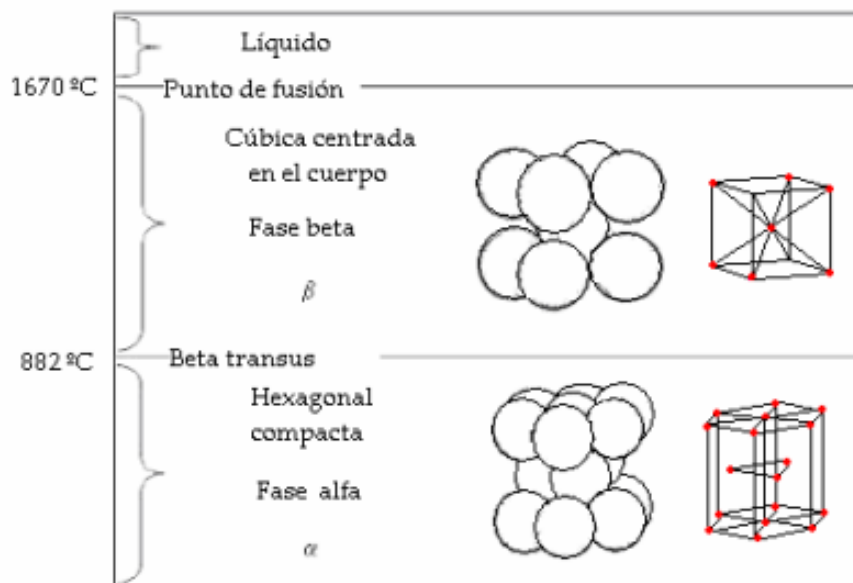


Figura 1 Fases del titanio

Comparando ambas fases, por un lado la fase alfa del titanio se caracteriza por buena estabilidad, buena resistencia a la corrosión a bajas temperaturas y buena resistencia mecánica a temperaturas bajas (menores a los 882 °C). Por otro lado, la fase beta se caracteriza por su mayor deformabilidad plástica, su resistencia a altas temperaturas y su capacidad para ajustar las propiedades mecánicas.

Con todo lo dicho, hay que tener en cuenta que estas transformaciones de fase son fundamentales en la fabricación de aleaciones de titanio, ya que son las que permiten ajustar las propiedades mecánicas y térmicas del material a las necesidades específicas de las aplicaciones.

Por tanto, en la búsqueda de optimizar las propiedades de las aleaciones de titanio, se han desarrollado técnicas para estabilizar las fases  $\alpha$  y  $\beta$ . Los principales estabilizadores de fase utilizados en aleaciones de titanio son el aluminio (Al) y el vanadio (V) para la fase  $\alpha$ , y el molibdeno (Mo), circonio (Zr) y estaño (Sn) para la fase  $\beta$ .

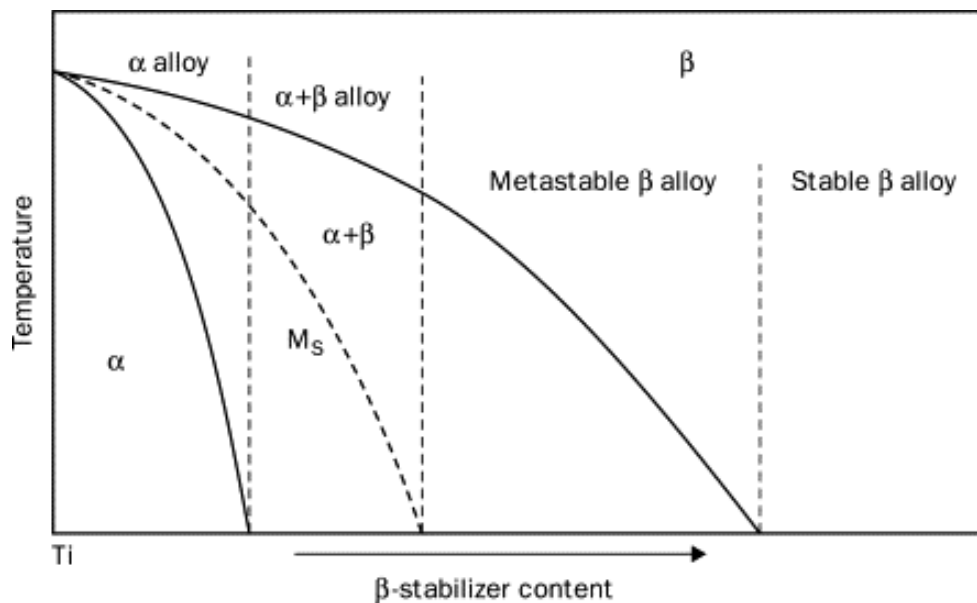


Figura 2 Diagrama de estabilizadores de fase del titanio

Añadiendo estos elementos a las aleaciones, se pueden modificar las temperaturas de transformación de fase y las propiedades mecánicas de las aleaciones, permitiendo una mayor flexibilidad en la manipulación de las características del material.

En este contexto, este trabajo se enfoca en el estudio y análisis de aleaciones de titanio fabricadas mediante técnicas pulvimetalúrgicas, con un enfoque específico en las aleaciones Ti-6Al-4V, Ti-11.5Mo-6Zr-4.5Sn y Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn.

La aleación Ti-6Al-4V, conocida como Ti-64, es la más utilizada en la industria aeronáutica. Se compone principalmente de fase alfa a temperatura ambiente pero puede experimentar una transformación parcial a la fase beta a temperaturas elevadas. Su estructura dual le proporciona

una combinación única de propiedades mecánicas y térmicas que la hacen ideal para componentes estructurales en aviones, como carcasas de motores, trenes de aterrizaje y otras piezas sometidas a altas temperatura.

La aleación Ti-11.5Mo-6Zr-4.5Sn, conocida como Ti-11, contiene principalmente la fase beta del titanio a temperatura ambiente, lo que le proporciona una alta resistencia mecánica y gran capacidad de deformación plástica además de una buena resistencia a altas temperaturas. Es especialmente adecuada para aplicaciones aeronáuticas donde se requiere una elevada resistencia a la fatiga y la fractura, como componentes de turbinas de gas.

La aleación Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn, conocida como Ti-15333, se compone también principalmente de fase beta. En esta aleación, la fase beta es muy estable a altas temperaturas lo que le confiere una excelente resistencia mecánica a elevadas temperaturas. Se suele usar en componentes de sistemas de escape y estructuras de aviones de reacción.

## 2. Motivación

En el contexto de la industria aeronáutica, caracterizada por su constante búsqueda de innovación y avances tecnológicos este trabajo se centra en tres aleaciones específicas: Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al, Ti-11.5Mo-6Zr-4.5Sn y Ti-6Al-4V. Estas aleaciones han sido seleccionadas debido a su capacidad para ofrecer una combinación única de resistencia mecánica, durabilidad y resistencia a la corrosión a altas temperaturas en entornos aeronáuticos.

El enfoque de esta investigación es descubrir si estas aleaciones que se fabrican hoy en día por los métodos tradicionales de forja o colada se pueden empezar a fabricar por la vía pulvimetalúrgica sin sacrificar ninguna de las propiedades del material. Para ello, a medida que se va a ir explorando esta metodología, se van a examinar aspectos fundamentales como la composición de las aleaciones, las etapas de preparación de polvos metálicos, las técnicas de compactación y sinterización, y el análisis detallado de las propiedades mecánicas y microestructurales resultantes.

La principal motivación para el uso pulvimetalurgia en este trabajo es la búsqueda de aleaciones con microestructuras más homogéneas y controladas en comparación con los métodos convencionales. Además, una de las ventajas sobresalientes de esta técnica es la posibilidad de lograr productos *near-final shape*, lo que significa que los componentes pueden fabricarse con formas y geometrías cercanas a las requeridas sin la necesidad de procesos de mecanizado costosos y demorados. Esta característica no solo aumenta la eficiencia en la producción, sino que también reduce los desperdicios de material y contribuye a una mayor sostenibilidad en la fabricación de componentes aeronáuticos.

La aplicación potencial de esta investigación abarca desde componentes estructurales en motores de aeronaves hasta partes internas de turbinas y sistemas de escape, donde las altas temperaturas y las condiciones exigentes requieren materiales de alta resistencia y durabilidad.

En este estudio se busca contribuir al desarrollo del conocimiento en el área de la pulvimetalurgia y proporcionar información valiosa para la industria aeronáutica. Al abordar este desafío, se aspira a unir los avances tecnológicos con las necesidades prácticas de la industria, sentando así las bases para futuras mejoras en la eficiencia y el rendimiento de componentes aeronáuticos de elevada temperatura.

En resumen, este trabajo busca proporcionar una alternativa viable y mejorada en términos de rendimiento y eficiencia para la industria aeronáutica.

### 3. Objetivos

Mi Trabajo de Fin de Grado se enfoca en un objetivo práctico y relevante: el estudio y desarrollo de aleaciones de titanio mediante técnicas pulvimetalúrgicas para su aplicación en entornos aeronáuticos de elevada temperatura.

Para poder alcanzar lo expuesto en mi apartado de motivación, para este TFG se han propuesto los siguientes objetivos específicos:

- Diseño y fabricación mediante un proceso pulvimetalúrgico de tres aleaciones: Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al, Ti-11.5Mo-6Zr-4.5Sn y Ti-6Al-4V.
- Análisis detallado del comportamiento mecánico de las aleaciones mediante:
  - 2.1 Ensayo de micropunzonado.
  - 2.2 Ensayo de microtracción.
  - 2.3 Ensayo de flexión a cuatro puntos.
- Análisis de la microestructura de las aleaciones mediante:
  - 3.1 Microscopía óptica
  - 3.2 Microscopía electrónica de barrido (FE-SEM y EBSD)
- Análisis de la resistencia a la corrosión a alta temperatura.

## 4. Metodología

### 4.1 Fabricación de materiales.

#### 4.1.1 Composición de los materiales

En este trabajo se ha elegido trabajar con tres aleaciones de tipo beta cuyas composiciones teóricas se detallan en la siguiente tabla:

Aleación	Elementos	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Peso atómico (u)	% peso
Ti-11,5Mo-6Zr-4,5Sn	Ti	4,50	47,86	78,00
	Mo	10,28	96,64	11,50
	Zr	6,50	91,22	6,00
	Sn	7,36	118,71	4,50
Ti-11,5Mo-6Zr-4,5Sn	Ti	4,50	47,86	78,00
	Mo	10,28	96,64	11,50
	Zr	6,50	91,22	6,00
	Sn	7,36	118,71	4,50
Ti-6Al-4V	Ti	4,50	47,86	90,00
	V	6,11	50,941	4,00
	Al	2,69	26,98	6,00

#### 4.1.2 Mezcla de polvos

Para la fabricación de todas las probetas utilizadas en este proyecto, como primer paso se deben calcular todas las cantidades de los elementos que las componen. Para ello, se debe obtener la densidad teórica de cada aleación.

El cálculo de las densidades teóricas se ha realizado en una hoja de cálculo Excel, utilizando la densidad elemental de cada elemento que compone la aleación y su porcentaje en peso en la aleación según la ecuación:

$$\rho_{teórica} = \frac{100}{\sum \frac{\%W_i}{W_i}} \quad \text{siendo : } \%W_i \text{ el porcentaje en peso de cada elemento (Ec. 1)}$$

Posteriormente, sabiendo el volumen y la cantidad de probetas, se aplica la definición de la densidad y se obtiene la masa teórica necesaria de cada elemento para fabricar cada probeta según las siguientes ecuaciones:

$$m_{probeta} = \frac{V_{probeta}}{\rho_{teórica}} \quad (\text{Ec.2}) \quad m_{elemental,i} = \frac{m_{probeta} \cdot n_{probetas} \cdot \%W_i}{100} \quad (\text{Ec.3})$$

Con todos los cálculos realizados, las composiciones de cada aleación quedan indicadas en la siguiente tabla:

Aleación	Elementos	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	% en peso	densidad mezcla (g/cm <sup>3</sup> )	Masa probeta (g)	Cantidad de probetas	Masa de mezcla (g)	Masa de elemento (g)
Ti-11,5Mo-6Zr-4,5Sn	Ti	4,50	78,00	5,01	9,01	7	63,13	49,24
	Mo	10,28	11,50					7,26
	Zr	6,50	6,00					3,78
	Sn	7,365	4,50					2,84
Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al	Ti	4,50	76,00	4,79	8,63	7	60,43	45,92
	V	6,11	15,00					9,06
	Cr	7,14	3,00					1,81
	Al	2,69	3,00					1,81
	Sn	7,36	3,00					1,81
Ti-6Al-4V	Ti	4,50	90,00	4,377	7,87	7	55,14	49,63
	V	6,11	4,00					2,20
	Al	2,69	6,00					3,30

#### 4.1.3 Compactación de los polvos

La compactación de los polvos se realizó con una prensa hidráulica de WPP 50 del fabricante alemán *Metallkraft*.

Para llevar a cabo este proceso cada mezcla se dividió en 7 partes equitativas, pesando con precisión la masa exacta de polvo para fabricar cada probeta según se detalla en la tabla detallada anteriormente.

Tras la pesada, tras su compactación se introdujo cada cantidad precisa en una matriz flotante con las dimensiones finales de la probeta: 30x12x5 mm. Tras esta etapa, se aplicó una presión de compresión de 1000 MPa, que equivalen a 300 bares en el manómetro de la prensa, durante aproximadamente 15 segundos.

Para lubricar y facilitar el manejo de los polvos y las probetas en la matriz de compresión, se realiza una limpieza con bórax antes y después de la fabricación de cada probeta.

Al finalizar la compactación de polvos obteniéndose todas las probetas necesarias, se realizaron las mediciones de masa y dimensión de cada muestra. Para las dimensiones se utilizó un calibrador Vernier digital de alta precisión con división de escala 0.01mm y para la determinar masa se ha usado una balanza de precisión con una división de escala de 0.001g.

Seguidamente, se calculó la densidad en verde y la porosidad en verde de cada probeta utilizando las ecuaciones que se describen a continuación:

- Densidad en verde:

$$\rho_v = \frac{m_v}{V_v} \left[ \frac{g}{cm^3} \right] \quad (\text{Ec.4})$$

siendo  $m_v$  masa de la probeta y  $V_v$  el volumen de la misma

- Porosidad en verde:

$$P_v = \left( 1 - \frac{\rho_v}{\rho_t} \right) * 100 \text{ [%]} \quad (\text{Ec.5})$$

siendo  $\rho_v$  la densidad en verde y  $\rho_t$  la densidad teórica de los compactos

#### 4.1.4 Sinterización de los compactos

Para realizar la sinterización de los compactos, aplicando un ciclo específico con se muestra en la figura del ciclo de sinterizado, se ha utilizado un horno de alto vacío de la marca *Carbolite* modelo HVT 15-75-450.

El ciclo de sinterizado ha consistido en:

- Etapa 1: Elevar la temperatura desde los 24°C iniciales hasta 800°C.
- Etapa 2: Mantener la temperatura de 800°C durante 1 hora para uniformizar la temperatura en todas las muestras.
- Etapa 3: Elevar la temperatura desde los 800°C hasta 1250°C
- Etapa 4: Mantener la temperatura de 1250°C durante 3 horas para obtener unas aleaciones con una distribución química homogénea y uniforme.
- Etapa 5: Enfriamiento de 1250°C hasta 25°C



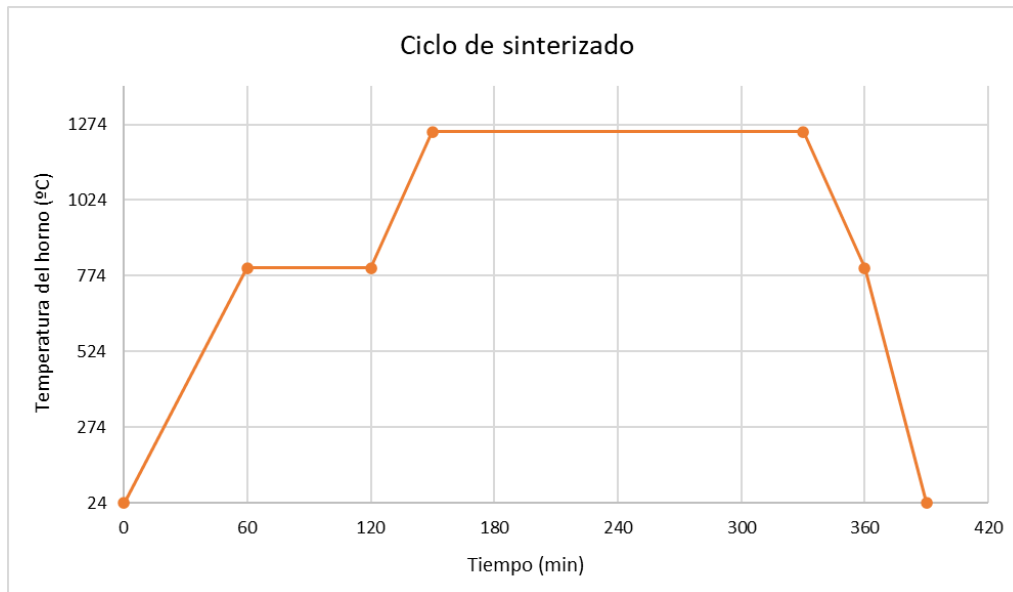


Figura 3 Ciclo de sinterizado

Tras la obtención de todas las probetas sinterizadas, se volvieron a medir sus dimensiones y masas para detectar posibles cambios. Para esta última operación, se han utilizado las mismas herramientas mencionadas en la tarea compactación de los polvos.

#### 4.1.5 Cálculo de la densidad y la porosidad mediante el método de Arquímedes

Al finalizar el sinterizado, se aplicó el método de Arquímedes conforme a la norma ASTM C373-14 para evaluar la porosidad y la densidad de todas las muestras.

Las medidas que necesitamos para aplicar el método de Arquímedes son: el peso en seco o *dry* (PD), el peso de la muestra húmeda o *moist* (PM) y el peso de la muestra sumergida en agua o *submerged* (PS). Para realizar estas mediciones se ha utilizado una balanza de alta precisión de la marca Kern modelo ABJ-NM con una división de escala de 0.0001g.

Obtenidas todas las mediciones, se calcularon los siguientes parámetros:

- Porosidad abierta ( $P_a$ ), mediante la expresión  $P_a = \frac{PM-PD}{PD-PS} \cdot 100$  [%] (ec.6)
- Porosidad cerrada ( $P_c$ ), mediante la expresión  $P_c = 1 - \frac{PD}{(PD-PS) \cdot \rho_T} \cdot 100$  [%] (ec.7)
- Densidad experimental ( $\rho_E$ ), mediante la expresión  $\rho_E = \frac{PD}{PM-PS}$  (ec.8)
- Densidad realtiva ( $\rho_R$ ), mediante la expresión  $\rho_R = \frac{\rho_E}{\rho_T}$  (ec.9)

#### 4.1.6 Cálculo del módulo de elasticidad

El cálculo del método de elasticidad se realizó utilizando dos métodos diferentes, primero con el equipo Sonelastic y posteriormente por ultrasonidos con ondas longitudinales. Pero finalmente se decidió quedar solo con las medidas obtenidas por ultrasonidos ya que el Sonelastic dió resultados incoherentes e imposibles físicamente.

El método de ultrasonidos es una técnica no destructiva empleada para determinar diversas propiedades mecánicas de los materiales. La determinación del módulo elástico de nuestras aleaciones de titanio utilizando ultrasonidos longitudinales se basa en la relación entre la velocidad de propagación de estas ondas y las propiedades intrínsecas del material.

Para realizar este experimento, se ha utilizado un equipo de ultrasonidos y gel de acoplamiento. Para ello se colocó el gel sobre el transductor del equipo y se acopló a la muestra, y se esperó unos segundos hasta visualizar en la pantalla del equipo la velocidad de propagación de las ondas.

Obtenida la velocidad, se aplicó la siguiente fórmula para calcular el módulo elástico:

$$E (Pa) = \frac{v_l^2 \cdot \rho \cdot (1+\vartheta) \cdot (1-2\vartheta)}{(1-\vartheta)} \quad (\text{ec. 10}), \text{ donde:}$$

$v_l$  es la velocidad de propagación de la onda  $\left(\frac{m}{s}\right)$

$\rho$  es la densidad del material  $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$

$\vartheta$  es el coeficiente de Poisson del material

## 5. Caracterización mecánica

### 5.1 Ensayo de flexión a cuatro puntos

La probeta que se utiliza para este ensayo es directamente la probeta que se obtiene tras el proceso de sinterizado sin ningún mecanizado o tratamiento posterior. Para este ensayo, se han tomado 3 probetas de cada tipo aleación siendo un total de 9 probetas. Cada probeta tenía una dimensión aproximada de 30x12x5mm, las dimensiones que nos interesan para la realización del ensayo es el espesor (T) y la anchura (W) de cada probeta.

Una vez se han seleccionado las probetas, se ha pasado a pintar una de las caras laterales de cada probeta de color negro y se ha pegado sobre esa cara un adhesivo negro pintado con rombos blancos en su parte central. Esta preparación sobre la probeta es esencial para el desarrollo del ensayo, ya que los rombos dibujados en el adhesivo son los que sirven de referencia para la máquina de ensayos para la toma de datos. Por lo tanto, hay que procurar que la visibilidad de dichos rombos sea muy clara.

Tras la colocación del adhesivo, se introdujo cada probeta entre los dos soportes específicos para el ensayo de flexión, y posteriormente el montaje probeta-soporte se instaló dentro de la máquina de ensayos. El soporte superior tiene una separación entre apoyos (L1) de 11mm y el inferior tiene una separación entre apoyos (L2) de 22mm.

La máquina con la cual se ha realizado el ensayo es la Autograph AG-100 KN Xplus de la marca japonesa Shimadzu. Para este ensayo la máquina realiza un esfuerzo de compresión vertical con una velocidad 0.5 mm/min sobre el soporte superior del montaje hasta que se produce la rotura de la probeta.

La configuración de la máquina y el procesado de los resultados se realizaron con el software dedicado Trapezium X del mismo fabricante de la máquina de ensayos. Los datos obtenidos luego se exportaron a una hoja de cálculo Excel, con la que se ha podido obtener:

- Los valores de deformación en mm/mm
- Los valores de tensión en MPa.
- La curva tensión vs deformación.
- El módulo elástico a flexión de las aleaciones en GPa.

## 5.2 Ensayo de microtracción

Para llevar a cabo el ensayo de microtracción, todas las probetas utilizadas han sido mecanizadas previamente.

En primer lugar se ha realizado un mecanizado sobre las muestras sinterizadas con una fresadora-taladradora del modelo OPTIMUM BF 20 hasta obtener la geometría estándar para probetas de tracción.

Posteriormente se ha realizado un corte en longitud de 2 mm de espesor sobre todas con una máquina cortadora Accutom-10 utilizando un disco de alúmina de diámetro 125 mm y espesor 0.5 mm.

De esta manera se han obtenido 3 probetas de cada tipo de aleación (siendo un total de 9 probetas) para ensayo de tracción normalizadas según la norma **UNE-EN ISO 6892-1**, cuyas dimensiones se detallan en la siguiente figura:

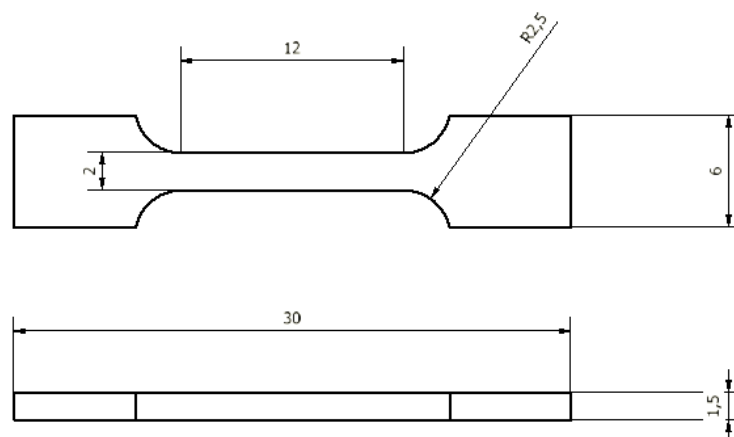


Figura 4 Geometría de la probeta de tracción

Previamente al ensayo, se aplicó una capa de esmalte negro en la región central de las muestras (alma) y en ambos extremos del alma justo donde empieza a curvarse la probeta se colocó un punto blanco. Estos puntos blancos al igual que para el resto de los ensayos sirven de referencia para la cámara de máquina de ensayos para capturar los datos.

Finalizada la preparación de las probetas, se procedió a realizar el ensayo de microtracción en la misma máquina de ensayos del apartado (Ensayo de flexión a cuatro puntos). Sin embargo, para este ensayo se han utilizado diferentes soportes específicos para microtracción. Para este ensayo la máquina realiza un esfuerzo de tracción vertical con una velocidad 0.5 mm/min sobre el soporte superior del montaje hasta que se produce la rotura de la probeta.

La configuración de la máquina y el procesado de los resultados se realizaron con el software dedicado Trapezium X del mismo fabricante de la máquina de ensayos. Los datos obtenidos luego se exportaron a una hoja de cálculo Excel, con la que se ha podido obtener:

- Los valores de deformación de la cruceta en mm/mm.
- Los valores de deformación del extensómetro en mm/mm.
- Los valores de tensión en MPa.
- La curva tensión vs deformación.

### 5.3 Ensayo de micropunzonado o “Small Punch”

Para llevar a cabo el ensayo de micropunzonado, se ha realizado un mecanizado sobre las muestras sinterizadas de todas las aleaciones.

El mecanizado ha consistido en un corte en anchura de 1 mm con una máquina cortadora Accutom-10 utilizando un disco de alúmina de diámetro 125 mm y espesor 0.5 mm.

De esta manera se han obtenido 3 probetas de cada tipo de aleación (siendo un total de 9 probetas) para ensayo de micropunzonado normalizadas, según la norma **UNE-EN 10371**. Cada probeta tiene forma prisma rectangular recto cuya dimensión aproximada es de 12x5x0.5mm.

Finalizado el mecanizado de las probetas, se procedió a realizar el ensayo de micropunzonado en la misma máquina de ensayos del apartado anterior (Ensayo de flexión a cuatro puntos). Sin embargo, para este ensayo se han utilizado diferentes soportes específicos para *Small Punch*.

Para este ensayo la máquina realiza un esfuerzo de compresión vertical con una velocidad 0.5 mm/min sobre el soporte superior del montaje hasta que se produce la rotura de la probeta.

La configuración de la máquina y el procesado de los resultados se realizaron con el software dedicado Trapezium X del mismo fabricante de la máquina de ensayos. Los datos obtenidos luego se exportaron a una hoja de cálculo Excel, con la que se ha podido obtener:

- Los valores de fuerza de punzonado máxima.
- El desplazamiento máximo antes del fallo.
- La curva fuerza vs desplazamiento máximo.

## 6. Caracterización microestructural

### 6.1 Preparación metalográfica

Para poder estudiar la microestructura de las aleaciones, hay que realizar una preparación metalográfica de las muestras que posteriormente se van a utilizar para la microscopía óptica, la difracción de rayos X y el microscopio electrónico.

La preparación metalográfica ha consistido en embutir las muestras de cada aleación, que no se vayan a analizar por microscopía electrónica, en una embutidora CitoPress del fabricante Struers con una resina polimérica ClaroFast. Para las muestras que se vayan a analizar en microscopía electrónica se embutieron con una resina conductora de grafito ConduFast.

Seguidamente, para poder obtener una imagen clara e idónea en microscopía, se ha realizado un desbaste y posteriormente un pulido de la superficie de la muestra.

El desbaste se realizó en una desbastadora LaboPol-25 con tres discos de lija con granulometría diferente, el primer de disco de 220 mallas, el segundo de 500 y el último de 1000.

Finalmente, el pulido se efectuó Utilizando una pulidora LaboPol-5 y un dispensador LaboDossier y las muestras se pulieron en tres etapas:

- Se empezó con primera etapa de pulido que dura 20 minutos y se realiza con un disco MD-Largo que ha sido lubricado con aceite y una solución de diamante de 9 micras mientras gira a una velocidad de 250 rpm y aplica una fuerza de 20 N.
- Una segunda etapa en la que se utilizó un disco MD-Nap de 25 mm con una pasta de diamante de 1 mm que se mantuvo funcionando durante 10 minutos a 200 rpm con una fuerza de 20 N.
- La última etapa implicó el uso de un disco MD-Chem lubricado con una mezcla de 20 ml de suspensión de sílica OP-U y 4 ml de peróxido de hidrógeno, que se dispensó manualmente con una pipeta de plástico, la etapa duró hasta el final de la solución y se utilizó una velocidad de 150 rpm y una fuerza equivalente a 15 N.

Después de completar la etapa de desbaste y cada etapa de pulido, las muestras fueron limpiadas cuidadosamente agua y jabón, y enjuagadas con agua destilada y sumergidas unos segundos en etanol para eliminar el exceso de agua y acelerar el secado.

### 6.2 Microscopía electrónica de barrido (FE-SEM): Difracción de electrones retrodispersados (EBSD)

Las muestras a la que se han hecho ya la preparación metalográfica con la resina conductora, se utilizaron para analizar la microestructura y observar las diferentes fases formadas, así como investigar las fracturas creadas por la flexión de los materiales, se utilizó un microscopio electrónico de barrido por emisión de campo ULTRA55 de la marca Zeiss. En el mismo microscopio electrónico con el detector de electrones retrodispersados (EBSD) se realizó un estudio de la microestructura de las diferentes aleaciones pudiendo estudiar todas las fases y elementos presentes en la aleación y su proporción real.

Todas las operaciones realizadas por el microscopio se controlaron con el programa Aztec de Oxford Instruments y todos los resultados se extrajeron y analizaron, con el mismo software.

## 7. Estudio de la corrosión a alta temperatura

El primer paso para realizar el estudio de corrosión a alta temperatura ha sido la preparación mecánica de las muestras. Para ello, se ha cortado en anchura una probeta sinterizada de cada aleación con la máquina cortadora *Accutom-10* utilizando un disco de alúmina de diámetro 125 mm y espesor 0.5 mm, obteniéndose muestras de aproximadamente 1.5 mm de espesor.

Tras el mecanizado, se han hecho las mediciones de masa y dimensiones de todas las muestras. Además, se ha hecho una medición de la rugosidad superficial de cada muestra con un perfilómetro óptico *Profilm 3D* de la marca *LIVESTRONG*.

Posteriormente, se han ido colocando todas las muestras en bandejas de cerámica resistentes a altas temperaturas.

El siguiente paso ha sido precalentar un horno de mufla *KL 03/11* del fabricante *Termoconcept* hasta alcanzar una temperatura de 700°C y seguidamente se introdujeron las bandejas con las muestras.

Para poder hacer un estudio completo del comportamiento a corrosión se ha dejado cada muestra durante un periodo determinado de tiempo tal como se indica en la siguiente tabla:

N.º de identificación de muestra	Aleación	Tiempo en el horno (h)
1 17 9	Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn Ti-11,5Mo-6Zr-4,5Sn Ti-6Al-4V	1
7 23 14	Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn Ti-11,5Mo-6Zr-4,5Sn Ti-6Al-4V	4
2 18 10	Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn Ti-11,5Mo-6Zr-4,5Sn Ti-6Al-4V	24
3 19 11	Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn Ti-11,5Mo-6Zr-4,5Sn Ti-6Al-4V	48
6 22 13	Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn Ti-11,5Mo-6Zr-4,5Sn Ti-6Al-4V	74
5 21 12	Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn Ti-11,5Mo-6Zr-4,5Sn Ti-6Al-4V	148

Después de sacar cada muestra del horno se han vuelto a realizar mediciones de su masa, dimensiones y rugosidad superficial para poder evaluar el cambio debido al efecto de la corrosión.

## 8. Resultados

### 8.1 Caracterización de los compactos

Ident. Muestra	Aleación	Masa después compactación (g)	Dimensiones después compactación			Volumen en verde (cm <sup>3</sup> )	Densidad en verde (g/cm <sup>3</sup> )	Porosidad en verde (%)
			Largo (mm)	Ancho (mm)	Espesor (mm)			
1904	Ti-11.5Mo-6Zr-4.5Sn	8,994	30,020	12,040	5,360	1,94	4,64	7,34
1905		8,971	30,030	12,110	5,390	1,96	4,58	8,66
1906		8,991	30,010	12,130	5,450	1,98	4,53	9,55
1907		9,006	30,140	12,210	5,380	1,98	4,55	9,21
1908		9,015	30,170	12,160	5,570	2,04	4,41	11,95
1909		8,992	30,070	12,250	5,570	2,05	4,38	12,53
1910		8,862	30,290	12,160	5,360	1,97	4,49	10,41
1911	Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al	8,615	30,350	12,190	5,620	2,08	4,14	13,61
1912		8,597	30,120	12,150	5,450	1,99	4,31	10,13
1913		8,613	30,030	12,150	5,540	2,02	4,26	11,16
1914		8,614	30,050	12,100	5,530	2,01	4,28	10,68
1915		8,615	30,030	12,000	5,470	1,97	4,37	8,88
1916		8,615	30,030	12,050	5,440	1,97	4,38	8,75
1917		8,591	30,020	11,970	5,430	1,95	4,40	8,20
1918	Ti-6Al-4V	7,876	30,070	11,990	5,800	2,09	3,77	13,95
1919		7,850	30,020	11,990	5,750	2,07	3,79	13,34
1920		7,843	30,070	12,010	5,790	2,09	3,75	14,30
1921		7,841	29,980	11,960	5,790	2,08	3,78	13,71
1922		7,834	30,060	11,970	5,870	2,11	3,71	15,26
1923		7,821	29,980	12,000	5,850	2,10	3,72	15,10
1924		7,739	30,020	12,010	5,760	2,08	3,73	14,86

Aleación	Porosidad en verde (%) promedio	Densidad en verde (g/cm <sup>3</sup> ) promedio	Desviación estándar de la densidad en verde (g/cm <sup>3</sup> )	Densidad relativa en verde (%) promedio	Densidad en verde (%) desvest
Ti-11.5Mo-6Zr-4.5Sn	9,95	4,51	0,09	90,05	1,83
Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al	10,20	4,31	0,09	89,80	1,85
Ti-6Al-4V	14,36	3,75	0,03	85,64	0,73

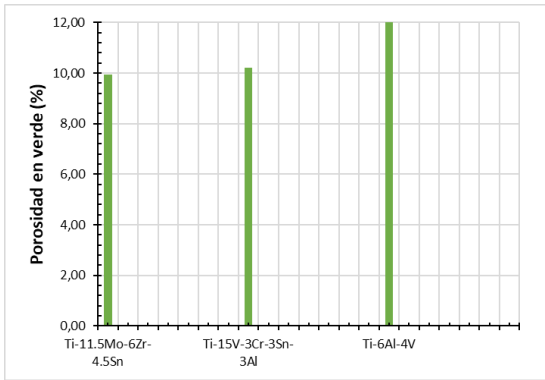


Figura 6 Comparación de la porosidad en verde de las aleaciones

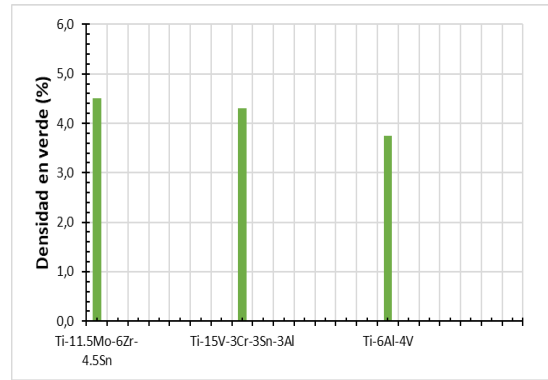


Figura 5 Comparación de la densidad en verde de las aleaciones

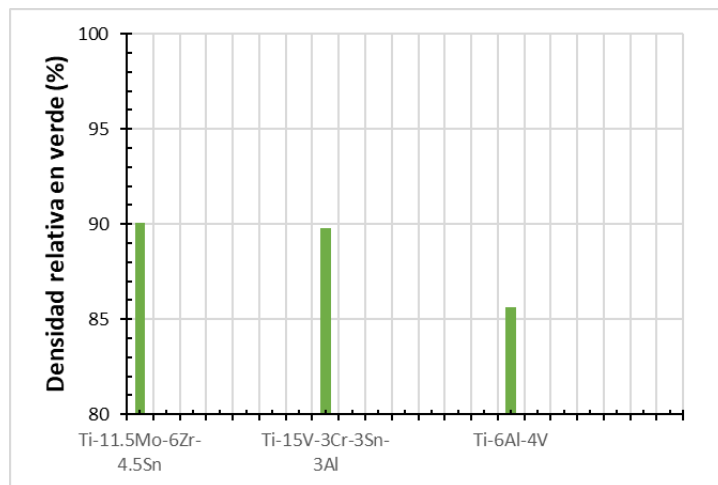


Figura 7 Comparación de la densidad relativa en verde de las aleaciones



## 8.2 Caracterización de los sinterizados

Muestra	Aleación	Dimensiones despues compactación			Volumen despues compactación verde (cm <sup>3</sup> )	Dimensiones despues sinterizado			Volumen despues sinterizado (cm <sup>3</sup> )
		Largo mm	Ancho mm	Espesor mm		Largo mm	Ancho mm	Espesor mm	
1904	Ti-11.5Mo-6Zr-4.5Sn	30,020	12,040	5,360	1,937	28,820	11,750	5,330	1,805
1905		30,030	12,110	5,390	1,960	29,010	11,670	5,340	1,808
1906		30,010	12,130	5,450	1,984	28,970	11,760	5,390	1,836
1907		30,140	12,210	5,380	1,980	29,000	11,630	5,390	1,818
1908		30,170	12,160	5,570	2,043	28,760	11,550	5,500	1,827
1909		30,070	12,250	5,570	2,052	28,940	11,660	5,430	1,832
1910		30,290	12,160	5,360	1,974	28,930	11,600	5,320	1,785
1911	Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al	30,350	12,190	5,620	2,079	29,280	11,900	5,500	1,916
1912		30,120	12,150	5,450	1,994	29,200	11,770	5,480	1,883
1913		30,030	12,150	5,540	2,021	29,300	11,810	5,460	1,889
1914		30,050	12,100	5,530	2,011	29,220	11,750	5,600	1,923
1915		30,030	12,000	5,470	1,971	29,250	11,800	5,410	1,867
1916		30,030	12,050	5,440	1,969	29,260	11,820	5,460	1,888
1917		30,020	11,970	5,430	1,951	29,260	11,780	5,460	1,882
1918	Ti-6Al-4V	30,070	11,990	5,800	2,091	28,580	11,450	5,530	1,810
1919		30,020	11,990	5,750	2,070	28,410	11,450	5,550	1,805
1920		30,070	12,010	5,790	2,091	28,280	11,370	5,620	1,807
1921		29,980	11,960	5,790	2,076	28,450	11,490	5,560	1,818
1922		30,060	11,970	5,870	2,112	28,420	11,450	5,610	1,826
1923		29,980	12,000	5,850	2,105	28,460	11,430	5,610	1,825
1924		30,020	12,010	5,760	2,077	28,250	11,390	5,530	1,779

Muestra	Aleación	Contracción					
		$\Delta$ largo %	$\Delta$ ancho %	$\Delta$ espesor %	$\Delta$ volumen %	Promedio $\Delta$ volumen %	Desviación típica
1904	Ti-11.5Mo-6Zr-4.5Sn	4,00	2,41	0,56	6,83	8,73	1,56
1905		3,40	3,63	0,93	7,77		
1906		3,47	3,05	1,10	7,44		
1907		3,78	4,75	-0,19	8,18		
1908		4,67	5,02	1,26	10,59		
1909		3,76	4,82	2,51	10,70		
1910		4,49	4,61	0,75	9,57		
1911	Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al	3,53	2,38	2,14	7,83	5,31	1,50
1912		3,05	3,13	-0,55	5,57		
1913		2,43	2,80	1,44	6,53		
1914		2,76	2,89	-1,27	4,38		
1915		2,60	1,67	1,10	5,27		
1916		2,56	1,91	-0,37	4,07		
1917		2,53	1,59	-0,55	3,55		
1918	Ti-6Al-4V	4,96	4,50	4,66	13,46	13,35	0,60
1919		5,36	4,50	3,48	12,77		
1920		5,95	5,33	2,94	13,58		
1921		5,10	3,93	3,97	12,45		
1922		5,46	4,34	4,43	13,57		
1923		5,07	4,75	4,10	13,29		
1924		5,90	5,16	3,99	14,32		

### 8.3 Método de Arquímedes

Método de Arquímedes					
Ident.	Aleacion	Densidad mezcla	Peso muestra en seco	Peso muestra submergida	Peso muestra saturada
Muestra		(g/cm <sup>3</sup> )	(g)	(g)	(g)
1904	Ti-11.5Mo-6Zr-4.5Sn	5,01	9,021	7,233	9,026
1905			8,990	7,123	8,996
1906			9,012	7,227	9,016
1907			9,024	7,234	9,029
1908			9,038	7,236	9,043
1909			9,013	7,225	9,019
1910			8,888	7,126	8,892
1911	Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al	4,79	8,604	6,757	8,611
1912			8,590	6,746	8,598
1913			8,604	6,756	8,608
1914			8,604	6,756	8,609
1915			8,603	6,755	8,609
1916			8,604	6,761	8,609
1917			8,576	6,736	8,584
1918	Ti-6Al-4V	4,37	7,834	6,099	7,898
1919			7,809	6,077	7,868
1920			7,799	6,073	7,862
1921			7,799	6,069	7,861
1922			7,793	6,065	7,854
1923			7,780	6,057	7,847
1924			7,701	5,994	7,764

Método de Arquimedes : Cálculo de porosidad								
Ident.	Aleacion	V teórico	V exterior	V poro abierto	V poro cerrado	% Porosidad de poro abierto	% Porosidad de poro cerrado	% Porosidad total
Muestra		(cm3)	(cm3)	(cm3)	(cm3)	(%)	(%)	(%)
1904	Ti-11.5Mo-6Zr-4.5Sn	1,80	1,79	0,004	0,011	0,26	0,66	0,92
1905		1,79	1,87	0,006	0,072	0,33	3,85	4,18
1906		1,80	1,79	0,003	0,013	0,20	0,73	0,93
1907		1,80	1,79	0,005	0,011	0,30	0,64	0,93
1908		1,80	1,81	0,005	0,002	0,28	0,12	0,40
1909		1,80	1,79	0,006	0,010	0,34	0,58	0,92
1910		1,77	1,77	0,00	0,012	0,25	0,68	0,94
1911		Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al	1,79	1,85	0,0071	0,053	0,38	2,88
1912	1,79		1,85	0,007	0,052	0,43	2,85	3,28
1913	1,79		1,85	0,004	0,053	0,25	2,90	3,16
1914	1,79		1,85	0,005	0,054	0,28	2,93	3,21
1915	1,79		1,85	0,006	0,054	0,34	2,92	3,26
1916	1,79		1,85	0,005	0,048	0,31	2,62	2,93
1917	1,79		1,85	0,007	0,052	0,42	2,84	3,26
1918	Ti-6Al-4V	1,79	1,80	0,063	0,055	3,55	3,07	6,62
1919		1,78	1,79	0,059	0,052	3,32	2,94	6,26
1920		1,78	1,79	0,062	0,056	3,51	3,15	6,67
1921		1,78	1,79	0,062	0,052	3,47	2,92	6,39
1922		1,78	1,79	0,061	0,053	3,42	2,97	6,40
1923		1,78	1,79	0,066	0,054	3,72	3,04	6,75
1924		1,76	1,77	0,063	0,052	3,58	2,97	6,54

Método de Arquimedes: Cálculo de la densidad experimental							
Ident.	Aleacion	Densidad experimental	Densidad exp promedio	Densidad Exp. Desviación estandar	Relativa	Densidad Relativa Promedio	Densidad Relativa Desv. Estándar
Muestra			(g/cm <sup>3</sup> )	(g/cm <sup>3</sup> )	(%)	(%)	(%)
1904	Ti-11.5Mo-6Zr-4.5Sn	5,03	4,99	0,09	100,40	99,66	1,71
1905		4,80			95,82		
1906		5,04			100,53		
1907		5,03			100,34		
1908		5,00			99,84		
1909		5,02			100,24		
1910		5,03			100,43		
1911		Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al			4,64		
1912	4,64		96,72				
1913	4,64		96,84				
1914	4,64		96,79				
1915	4,64		96,74				
1916	4,66		97,07				
1917	4,64		96,74				
1918	Ti-6Al-4V		4,36	4,36	0,01	99,53	99,50
1919		4,36	99,62				
1920		4,36	99,64				
1921		4,35	99,45				
1922		4,36	99,55				
1923		4,35	99,32				
1924		4,35	99,39				

#### 8.4 Cálculo del módulo elástico mediante ultrasonidos

Material	Coefficiente de Poisson	Velocidad de transmisión de ultrasonidos (m/s)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Módulo de elasticidad (GPa)
Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al	0,33	5819	4640	106,04
Ti-6Al-4V	0,34	6316	4390	112,86
Ti-11.5Mo-6Zr-4.5Sn	0,36	5560	4990	90,21

## 8.5 Caracterización mecánica

### 8.5.1 Ensayo de flexión a cuatro puntos

Aleación	Muestra	Tensión máxima	Promedio tensión máxima (Mpa)	Desviación estándar de tensión máxima (mm)	Alargamiento máximo (mm/mm)	Promedio alargamiento (mm/mm)	Desviación estándar del alargamiento (mm/mm)
Ti-11.5Mo-6Zr-4.5Sn	1904	688,884	1187,49	517,11	0,29	0,40	0,12
	1905	1721,32			0,54		
	1906	1152,27			0,36		
Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al	1911	253,192	305,07	64,36	0,18	0,17	0,02
	1912	377,109			0,18		
	1913	284,923			0,14		
Ti-6Al-4V	1918	928,855	1013,15	85,05	0,28	0,29	0,02
	1919	1011,66			0,27		
	1920	1098,94			0,31		

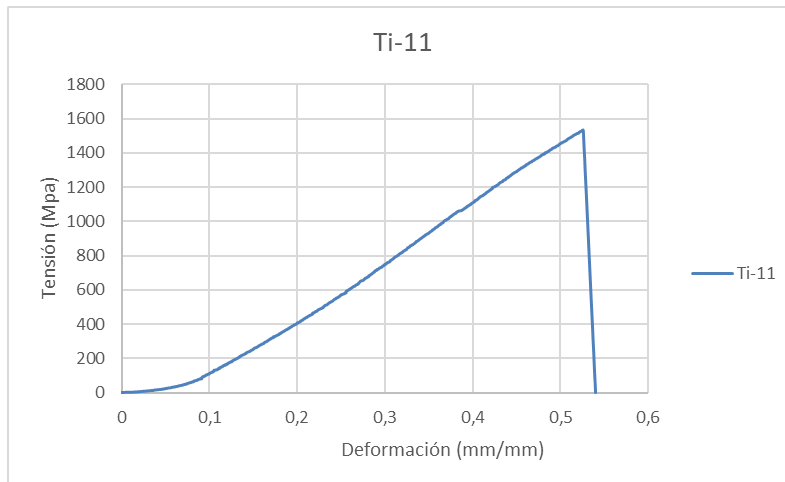


Figura 8 Curva tensión-deformación del Ti-11 (Ensayo flexión)

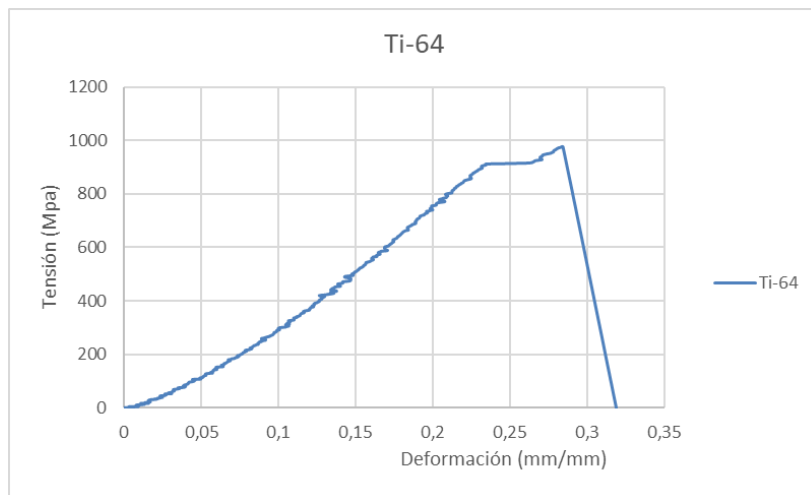


Figura 9 Curva tensión-deformación del Ti-64 (Ensayo flexión)

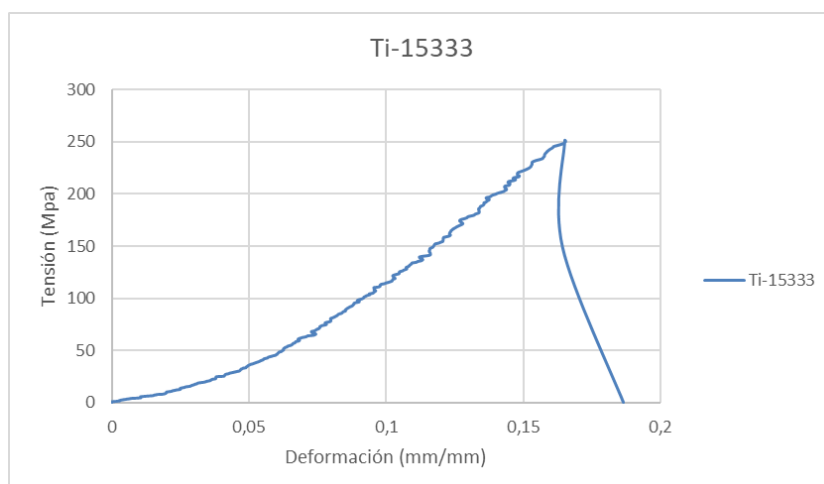


Figura 10 Curva tensión-deformación del Ti-15333 (Ensayo flexión)

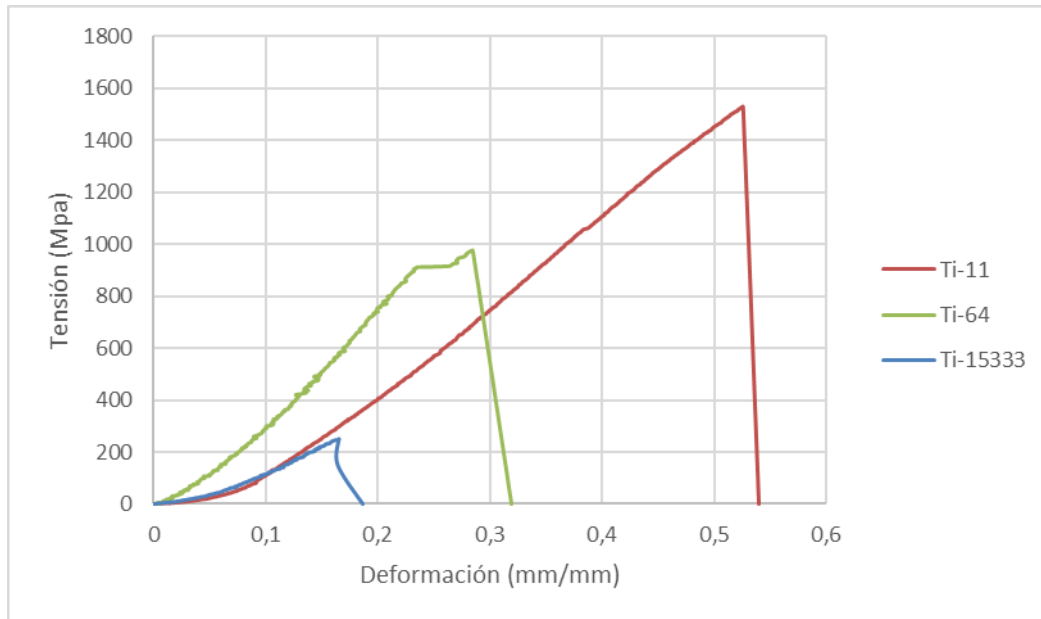


Figura 11 Comparación curvas tensión-deformación (Ensayo flexión)

### 8.5.2 Ensayo de microtracción

Probeta	Tensión máxima (Mpa)	Promedio tensión máxima (Mpa)	Alargamiento máximo de la cruceta (mm/mm)	Promedio alargamiento (mm/mm)	Alargamiento máximo de extensimetría (mm/mm)	Promedio alargamiento (mm/mm)
1	1430,81	1239,96	0,082	0,07	0,01	0,016
2	1192,97		0,05		0,01	
3	1096,12		0,07		0,02	
4	712,64	1001,33	0,04	0,05	0,002	0,008
5	1266,76		0,08		0,02	
6	1024,59		0,04		0,002	
7	353,97	320,42	0,02	0,01	0,002	0,001
8	328,27		0,01		0,0007	
9	279,01		0,01		0,002	



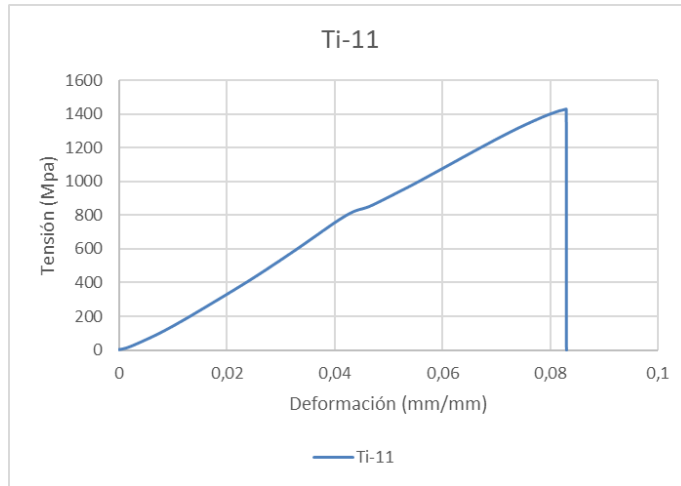


Figura 12 Curva tensión-deformaciónTi-11 (Ensayo tracción)

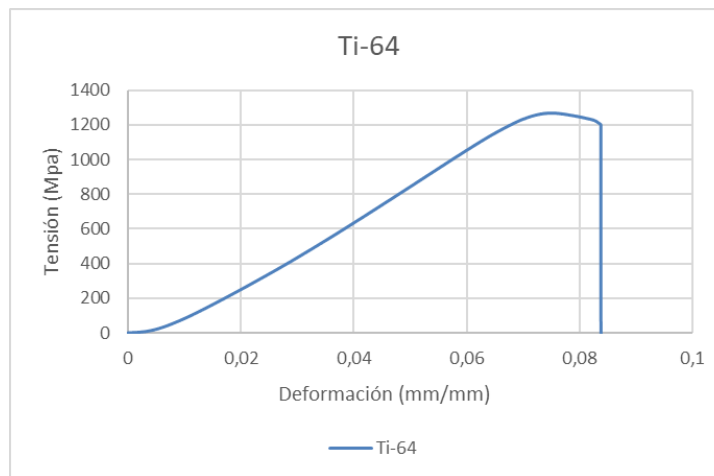


Figura 13 Curva tensión-deformaciónTi-64 (Ensayo tracción)

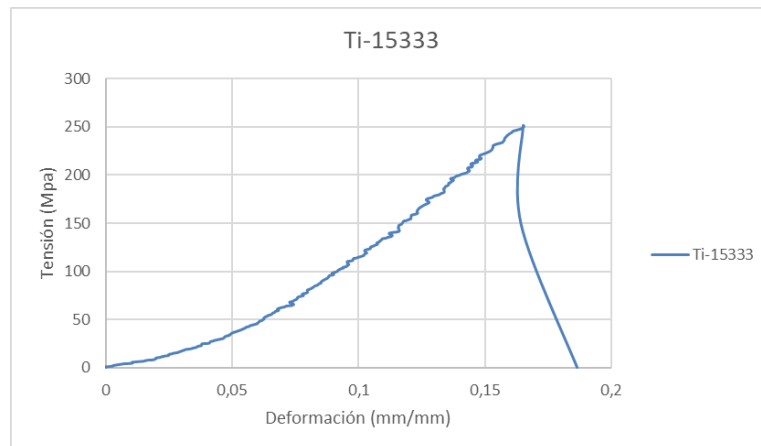


Figura 14 Curva tensión-deformaciónTi-15333 (Ensayo tracción)

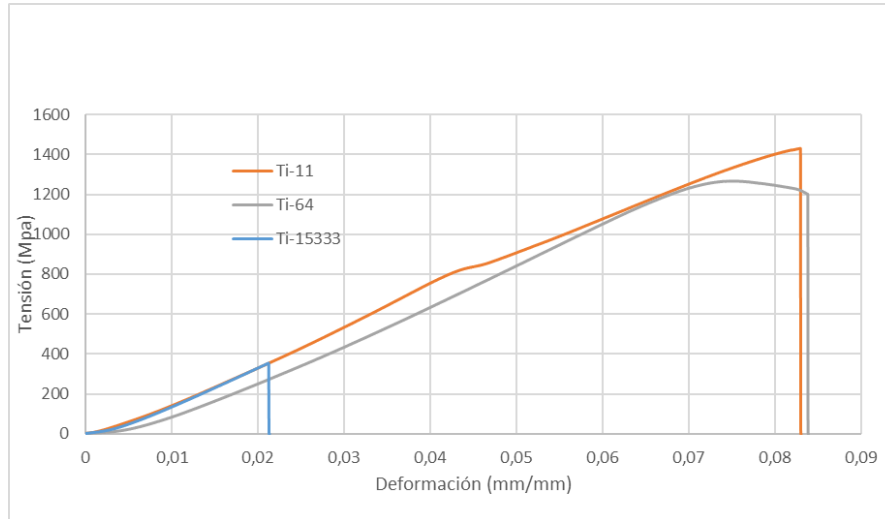


Figura 15 Comparación curvas tensión-deformación (Ensayo tracción)

### 8.5.3 Ensayo de micropunzonado “Small Punch”

Aleación	Probeta	Resistencia máxima a la fuerza de punzonado (N)	Promedio resistencia max al punzonado (N)	Profundidad máxima alcanzada por el punzón en el material (mm)	Promedio de la max prof. (mm)
Ti-6Al-4V	1	589,16	564,97	0,52	0,38
	2	395,82		0,29	
	3	709,93		0,34	
Ti-11.5Mo-6Zr-4.5Sn	4	746,88	945,78	0,47	0,58
	5	970,13		0,61	
	6	1120,33		0,654	
Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al	7	399,71	351,48	0,201	0,25
	8	280,61		0,33	
	9	374,11		0,21	

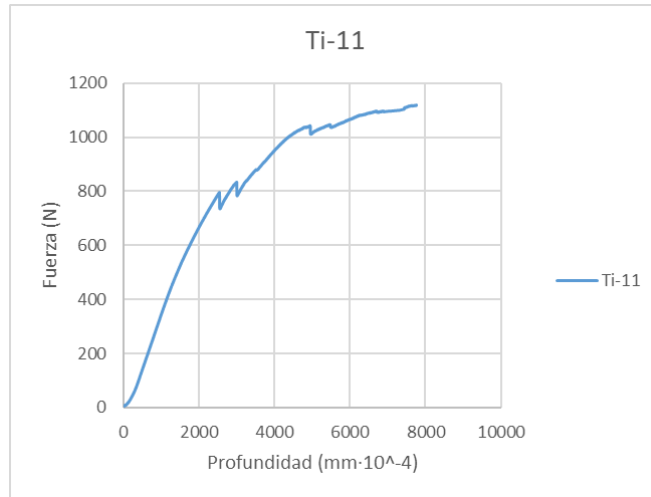


Figura 16 Curva Fuerza punzonado-desplazamiento Ti-11

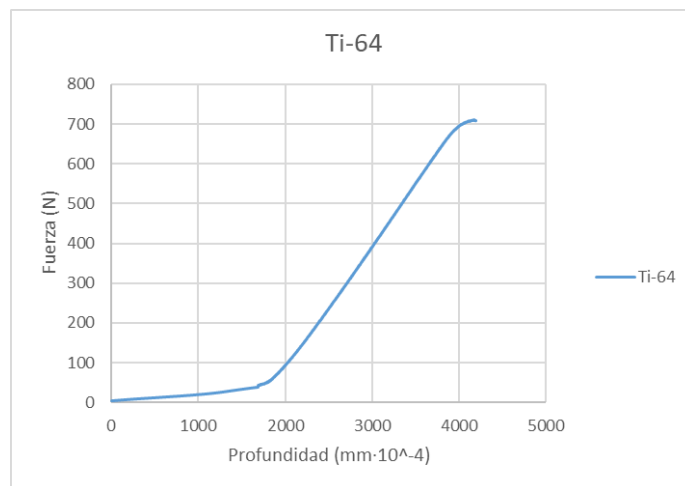


Figura 17 Curva Fuerza punzonado-desplazamiento Ti-64

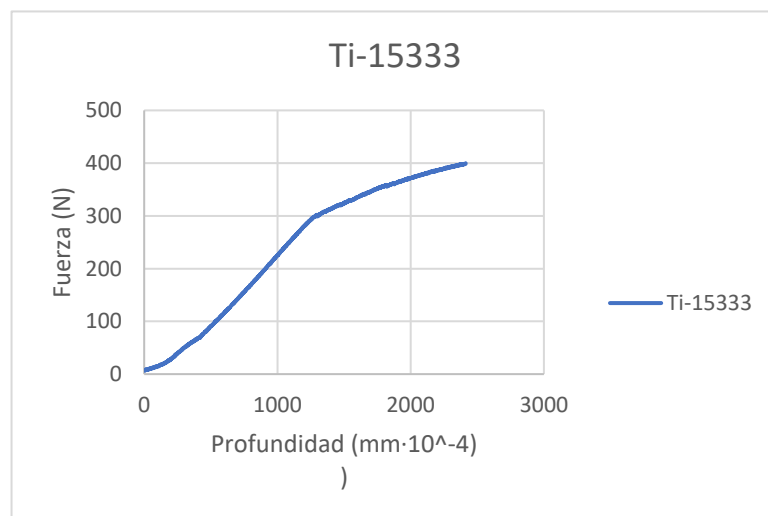


Figura 18 Curva Fuerza punzonado-desplazamiento Ti-1533

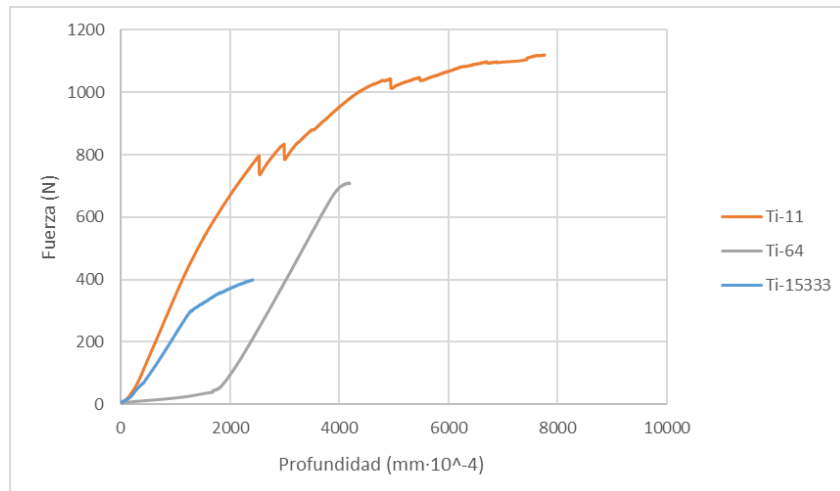


Figura 19 Comparación curvas Fuerza punzonado-desplazamiento

#### 8.5.4 Microscopía electrónica de barrido - EBSD

Aleación	% Fase con estructura HC (fase $\alpha$ )	% Fase con estructura CC (fase $\beta$ )	% Estructura indeterminada	Tamaño de grano medio ( $\mu\text{m}$ )
Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al	33,83	63,41	2,76	38,22
Ti-6Al-4V	90,31	4,57	5,12	43,43
Ti-11.5Mo-6Zr-4.5Sn	0,07	93,89	6,04	283,72

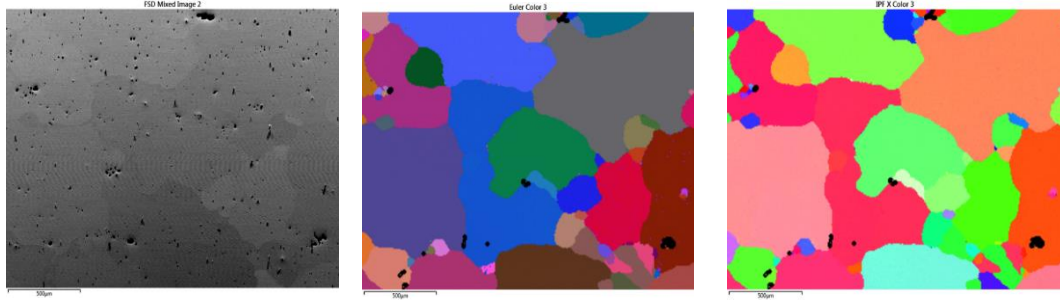


Figura 20 EBSD TI-11

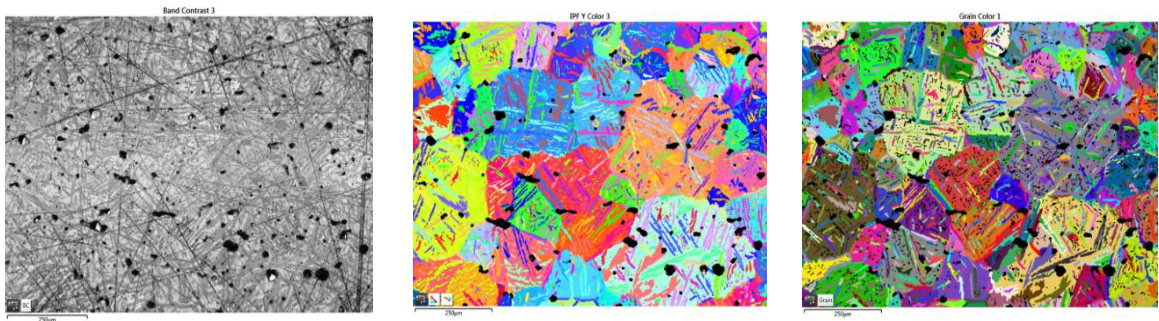


Figura 21 EBSD TI-15333

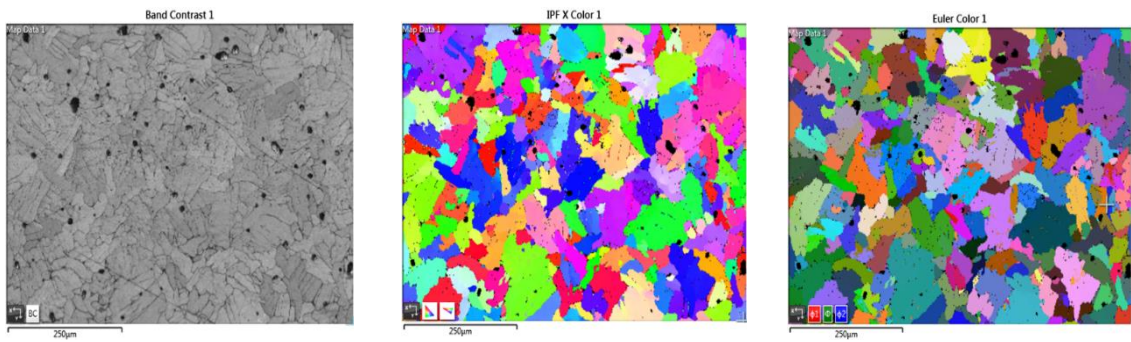


Figura 22 EBSD TI-64

## 8.6 Estudio de la corrosión a alta temperatura

Aleación	Propiedades controladas	Sin oxidar	1h en el horno	4h en el horno	24h en el horno	48h en el horno	74h en el horno	148h en el horno
Ti-11,5Mo-6Zr-4,5Sn	Rugosidad Sa (mm) (ISO 25178)	0,57	0,53	0,74	6,29	4,19	2,94	2,04
	Rugosidad Sq (mm) (ISO 25178)	0,69	0,66	0,95	7,98	6,26	4,40	2,61
	$\Delta$ Masa (g)	0	0,001	0,003	0,06	0,110	0,241	0,251
Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn	Rugosidad Sa (mm) (ISO 25178)	0,28	1,18	2,29	6,49	31,08	2,50	10,3
	Rugosidad Sq (mm) (ISO 25178)	0,37	1,52	2,88	8,55	36,82	2,89	12,09
	$\Delta$ Masa (g)	0	0,004	0,010	0,014	0,129	0,187	0,291
Ti-6Al-4V	Rugosidad Sa (mm) (ISO 25178)	0,58	1,59	2,45	0,89	1,61	2,60	2,87
	Rugosidad Sq (mm) (ISO 25178)	0,75	2,01	2,87	1,01	1,93	3,00	3,34
	$\Delta$ Masa (g)	0	0,000	0,000	0,016	0,021	0,028	0,049

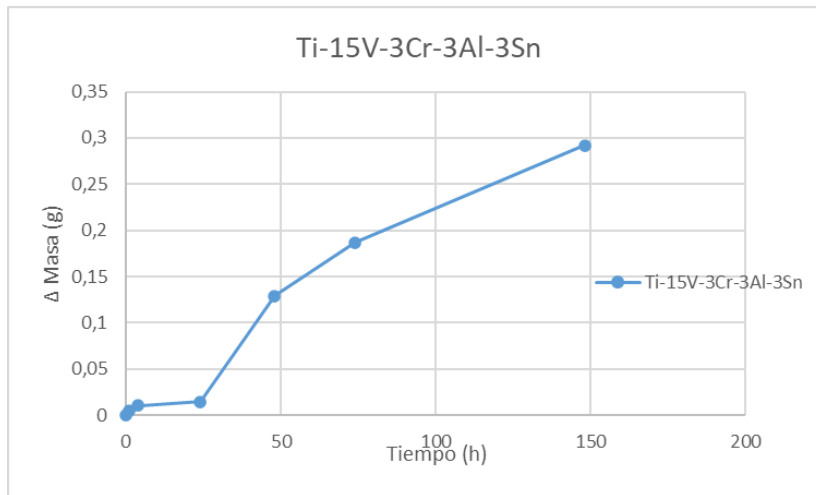


Figura 23 Curva oxidación Ti-15333

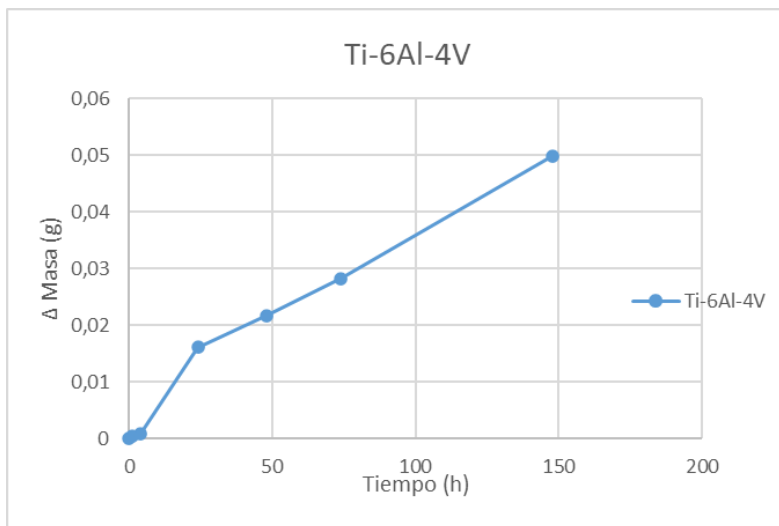


Figura 24 Curva oxidación Ti-64

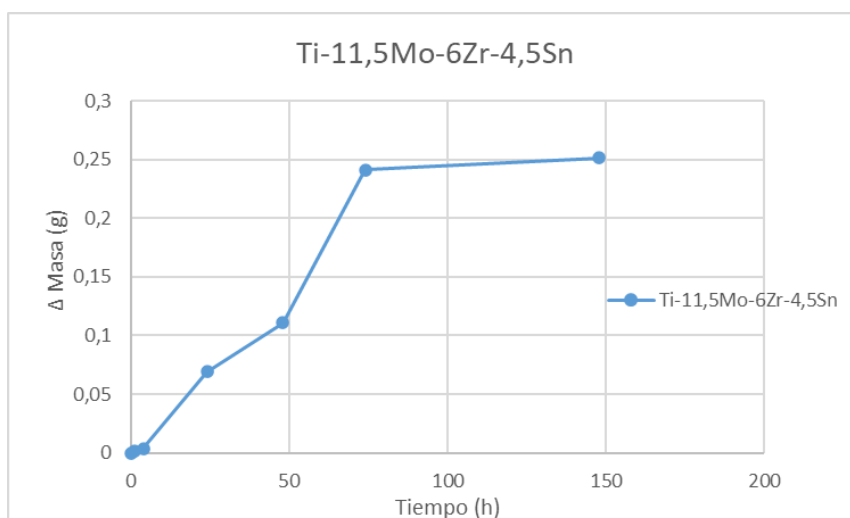


Figura 25 Curva oxidación Ti-11

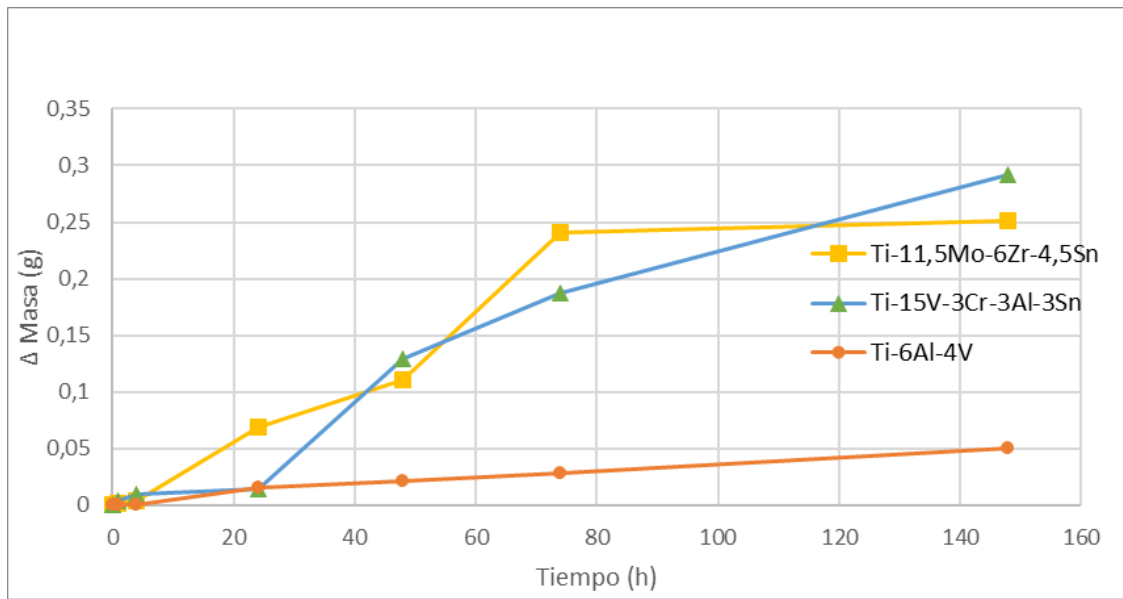


Figura 26 Comparación curvas oxidación



## 9. Discusión

Los resultados obtenidos tras el estudio de las aleaciones de titanio Ti-11.5Mo-6Zr-4.5Sn, Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al y Ti-6Al-4V mediante técnicas pulvimetalúrgicas, aportan información sobre sus potenciales y sus posibles áreas de mejora.

El Ti-6Al-4V aunque presentó una porosidad relativamente alta en su estado "verde", mostró una notable contracción durante el sinterizado, un fenómeno que ha sido identificado en estudios previos, como el de Lütjering y Williams (2007). Esta transformación puede indicar una consolidación significativa de la estructura de la aleación, lo que se refleja en sus destacadas propiedades mecánicas y su superior resistencia a la corrosión a alta temperatura. Cabe resaltar, su tensión máxima en los ensayos de microtracción que fue de 1001.33 Mpa y en el ensayo de small punch, la fuerza máxima de punzonado que fue de 709.931 N.

Por su parte, la aleación Ti-11.5Mo-6Zr-4.5Sn, mostró un comportamiento excelente en muchos aspectos, salvo el de la resistencia a la corrosión a alta temperatura donde queda muy lejos de la Ti-6Al-4V. Esta aleación no sólo tuvo la menor porosidad inicial y la mayor densidad en su estado "verde", sino que sus propiedades mecánicas también fueron impresionantes: 1721.32 Mpa en el ensayo de flexión, 1239.97 Mpa en microtracción y 1120.33N en el ensayo de small punch.

Por otro lado, la aleación Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al aunque posee una composición química con una proporción interesante entre las fases alfa y beta, sus características mecánicas resultaron ser inferiores, registrando tensiones máximas de 377.109 Mpa y 320.42333 Mpa en ensayos de flexión y microtracción, respectivamente. Una posible explicación de este desempeño reducido, tal como lo sugiere Boyer, Welsch y Collings (1994), podría ser la interacción no ideal entre las fases alfa y beta en esta aleación bajo las condiciones específicas de las técnicas pulvimetalúrgicas utilizadas. La sinterización incompleta o una difusión no óptima entre sus componentes podrían ser las causas de estas características disminuidas.

Ante estos resultados, se plantea la pregunta de cómo se podrían mejorar las propiedades de estas aleaciones. La respuesta a esto es que con ajustes en tratamientos térmicos, compactación en caliente y aplicación de revestimientos protectores se pueden optimizar las aleaciones. En particular, para aleaciones como la Ti-15333, que es la que tuvo mejores resultados, la revisión de su composición química y la consideración de tratamientos superficiales, adición de agentes de sinterizado y refinadores de grano podrían ser estrategias clave para optimizar aún más estas aleaciones.

En resumen, mientras la pulvimetalurgia ofrece muchas oportunidades en la fabricación de aleaciones de titanio, hay que tener en cuenta que cada aleación presenta su propia problemática. Un estudio detallado y ajustes continuos en el proceso de fabricación, apoyados por investigaciones específicas, serán fundamentales para alcanzar el mejor rendimiento, especialmente para aleaciones como la Ti-15333. Estos esfuerzos no solo mejorarán las propiedades de estas aleaciones sino que también contribuirán significativamente al avance de la industria en su búsqueda de materiales más eficientes.

## 10. Conclusiones

- La densidad de las aleaciones en verde podría ser un indicador de su comportamiento posterior al sinterizado, destacando la importancia de minimizar la porosidad en las primeras etapas del proceso de fabricación.
- La aleación Ti-11.5Mo-6Zr-4.5Sn es la aleación que ha tenido las mejores propiedades mecánicas, con una tensión de rotura y fuerza de punzonado de punzonado significativamente elevadas, posiblemente debido a la predominancia de fase beta. Sin embargo no ha presentado el mejor comportamiento frente a la corrosión a alta temperatura.
- El Ti-6Al-4V, aunque no ha tenido las mejores características mecánicas, demostró una excelente resistencia a la corrosión a alta temperatura y una consolidación estructural notable tras el sinterizado. Eso se debe posiblemente a la predominancia de la fase alfa.
- A pesar de una proporción equilibrada de fases alfa y beta en el Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al, esta aleación presentó características mecánicas muy bajas respecto de los resultados que se esperaban, probablemente debido a interacciones no deseadas entre sus fases o sinterización insuficiente. La revisión y ajuste en los procesos de sinterización, junto con tratamientos superficiales y refinadores de grano, podrían ser una solución para mejorar las propiedades de esta aleación.
- En este trabajo hemos concluido que las técnicas pulvimetalúrgicas tienen un potencial considerable en el desarrollo de aleaciones de titanio aunque requieren optimizaciones específicas para cada aleación ya sea durante el proceso de fabricación o realizando tratamientos posteriores.

## 11. Bibliografía

- ASM International. (2003). *Titanium: A Technical Guide*. ASM International.
- Banerjee, D., & Williams, J. C. (2013). *Perspectives on Titanium Science and Technology*. Acta Materialia, 61(3), 844-879.
- Banerjee, D., & Williams, J.C. (2013). Perspectives on the development of a modern titanium industry in India. Current Science, 104(8), 1020-1027.
- Boyer, R., Welsch, G., & Collings, E.W. (1994). *Materials Properties Handbook: Titanium Alloys*. ASM International.
- Ebel, T., & Maier, H. J. (2009). *Powder Metallurgical Near-Net-Shape Technology of Titanium and Titanium Alloys*. Advanced Engineering Materials, 11(8), 547-558.
- Eylon, D., Boyer, R., & Froes, F. H. (2010). *Advanced Titanium Alloys in Aerospace Applications*. En ASM Handbook (págs. 685-693). ASM International.
- Froes, F. H. (2015). *Titanium Powder Metallurgy: Science, Technology and Applications*. Elsevier.
- Froes, F., & Qian, M. (2016). *Titanium Powder Metallurgy: Science, Technology and Applications*. Butterworth-Heinemann.
- German, R. M. (2014). *Powder Metallurgy Science*. Metal Powder Industries Federation.
- Gogia, A. K. (2008). *Pulvimetalurgia del titanio*. Revista de Metalurgia, 44(5), 375-387.
- Jha, S. C., et al. (2018). *Powder Metallurgy of Titanium Alloys: Challenges and Opportunities*. JOM, 70(9), 1748-1757.
- Leyens, C., & Peters, M. (2003). *Titanium and Titanium Alloys: Fundamentals and Applications*. Wiley-VCH.
- Lütjering, G., & Williams, J. C. (2007). *Titanium*. Berlin: Springer.
- Lütjering, G., & Williams, J.C. (2007). *Titanium*. Springer Science & Business Media.
- Qian, M., & Froes, F. H. (2015). *Advanced Titanium Alloys for Aerospace Applications*. En *Titanium Powder Metallurgy* (págs. 279-315). Elsevier.
- Savvakín, D. G., et al. (2019). *Production of high-strength titanium alloys for aerospace applications by powder metallurgy*. Materials Science & Engineering: A, 759, 228-235.
- Semiatin, S. L., et al. (2015). *Processing, Microstructure, and Mechanical Properties of Near- $\beta$  Ti-5Al-5Mo-5V-3Cr Reduced to Powder by Hydrogenation-Dehydrogenation*. Metallurgical and Materials Transactions A, 46(9), 4007-4017.
- Sinha, V. P., & Froes, F. H. (1980). *The Powder Metallurgy of Titanium Alloys*. JOM, 32(6), 18-25.
- Zhang, D., & Chen, R. (2015). *Effect of processing parameters on microstructure and properties of titanium alloys prepared by powder metallurgy*. Journal of Alloys and Compounds, 630, 35-42.

## **DOCUMENTO II: PRESUPUESTO**

1. Cuadro de precios unitarios de mano de obra			
Código	Unidad	Descripción	Precio (€)
MM01	h	Tutor de proyecto	61,88
MM02	h	Cotutor de proyecto	46,05
MM03	h	Ingeniero Junior	18,40
MM04	h	Técnico de laboratorio	27,86

2. Cuadro de precios unitarios de mano de materiales			
MM05	kg	Titanio en polvo	89,20
MM06	kg	Molibdeno en polvo	289,90
MM07	kg	Circonio en polvo	446,00
MM08	kg	Aluminio en polvo	22,62
MM09	kg	Estaño en polvo	33,45
MM10	kg	Vanadio en polvo	50,18
MM11	kg	Ti-6Al-4V en polvo	278,75
MM12	u	Recipientes de plástico	0,47
MM13	kg	Bolas de acero	12,27
MM14	kg	Bórax	8,92
MM15	u	Parafilm	51,80
MM16	l	Agua destilada	0,67
MM17	l	Etanol	20,03
MM18	u	Caja disco de diamante	357,12
MM19	u	Esmalte negro	1,95
MM20	u	Rotulador blanco	3,62
MM21	u	Pegatinas de referencia	0,11
MM22	kg	Resina Condufast	100,35
MM23	kg	Resina Clarofast	95,61
MM24	u	Papel de lija 80 mallas	0,75
MM25	u	Papel de lija 220 mallas	3,35
MM26	u	Papel de lija 500 mallas	3,57
MM27	u	Papel de lija 1000 mallas	3,89
MM28	u	Disco MD-Largo	34,73
MM29	u	Disco MD-Nap	22,30
MM30	u	Disco MD-Chen	35,68
MM31	l	Solución de diamante 9 micras	266,71
MM32	l	Pasta de diamante 1 micra	336,25
MM33	l	Aceite lubricante	28,77
MM34	l	Suspensión sílica	87,69
MM35	l	Agua oxigenada	6,18
MM36	u	Pipeta	25,23
MM37	u	Caja de guantes latex talla M	4,91

3. Cuadro de precios unitarios de maquinaria y equipos			
Código	Unidad	Descripción	Precio (€)
HE01	h	Caja de guantes GP Jacomex	1,33
HE02	h	Báscula de precisión Kern	0,18
HE03	h	Túrbula Inversina Bioengineering	0,53
HE04	h	Prensa hidráulica WPP 50 de Metallkraft	1,23
HE05	h	Matriz flotante 30x12	0,49
HE06	h	Pie de rey	0,01
HE07	h	Horno tubular de alto vacío Carbolite HVT	126,89
HE08	h	Máquina de ensayos Shimadzu Autograph	7,18
HE09	h	Utillajes para flexión	0,07
HE10	h	Utillajes para micropunzonado	6,08
HE11	h	Utillajes para microtracción	0,14
HE12	h	Taladradora-fresadora OPTIMUM	1,01
HE13	h	Cortadora Accutom-10	2,88
HE14	h	Embutidora CitoPress-1	2,62
HE15	h	Desbastadora LaboPol-25	2,61
HE16	h	Pulidora LaboPol-5 + dosificador	3,91
HE17	h	Ultrasonidos	0,49
HE18	h	Pulidora VibroMet-2	2,74
HE19	h	Difractómetro de rayos x Phaser 2D	7,30
HE20	h	Microscopio óptico Nikon	8,15
HE21	h	Microscopio electrónico de barrido de emisión de campos	18,30
HE22	h	Detector de energías dispersivas de rayos x	10,85
HE23	h	Horno de mufla KL 03/11	18,42
HE24	h	Equipo Arquímedes	0,14
HE25	h	Equipo Sonelastic	1,61
HE26	h	Equipo ultrasonidos	1,88
HE27	h	Software MAUD (código abierto)	0,00
HE28	h	Software Aztec de Oxford Instruments Ltda.	2,06

**4. Cuadro de precios descompuestos de la partida presupuestaria 1: Selección y cálculo de cantidades de polvos.**

Código	Unidad	Resumen	Cantidad	Precio (€/u)	Importe (€)
PP001	U	Selección y cálculo de cantidades de polvos			252,66
MM01	h	Tutor de proyecto	2,00	61,88	123,77
MM02	h	Cotutor de proyecto	2,00	46,05	92,10
MM03	h	Ingeniero Junior	2,00	18,40	36,80

**5. Cuadro de precios descompuestos de la partida presupuestaria 2: Mezclado y compactación de los polvos.**

Código	Unidad	Resumen	Cantidad	Precio (€/u)	Importe (€)
PP002	U	Mezclado y compactación de los polvos			730,86
MM01	h	Tutor de proyecto	2,00	61,88	123,77
MM02	h	Cotutor de proyecto	1,00	46,05	46,05
MM03	h	Ingeniero Junior	12,00	18,40	220,77
MM04	h	Técnico de laboratorio	10,00	27,86	278,64
MM05	kg	Titanio en polvo	0,10	89,20	8,50
MM06	kg	Molibdeno en polvo	0,01	289,90	2,10
MM07	kg	Circonio en polvo	0,00	446,00	1,69
MM08	kg	Aluminio en polvo	0,00	22,62	0,04
MM09	kg	Estaño en polvo	0,00	33,45	0,16
MM11	kg	Ti-6Al-4V en polvo	0,06	278,75	15,37
MM10	kg	Vanadio en polvo	0,01	50,18	0,45
MM12	u	Recipientes de plástico	4,00	0,42	1,68
MM13	kg	Bolas de acero	0,05	11,00	0,54
MM14	kg	Bórax	0,25	8,92	2,23
MM15	u	Parafilm	0,10	46,46	4,65
MM37	u	Caja de guantes latex	0,20	4,40	0,88
HE01	h	Caja de guantes GP Jacomex	6,00	1,20	7,20
HE02	h	Báscula de precisión Kern	1,50	0,16	0,24
HE03	h	Túrbula Inversina Bioengineering	0,60	0,48	0,29
HE04	h	Prensa hidráulica WPP 50 de Metallkraft	10,00	1,11	11,10
HE05	h	Matriz flotante 30x12	10,00	0,44	4,40
HE06	h	Pie de rey	12,00	0,01	0,12



**6. Cuadro de precios descompuestos de la partida presupuestaria 3: Sinterizado de compactos**

Código	Unidad	Resumen	Cantidad	Precio (€/u)	Importe (€)
PP003	U	Sinterizado de compactos			3798,76
MM01	h	Tutor de proyecto	3,00	61,88	185,65
MM02	h	Cotutor de proyecto	1,00	46,05	46,05
MM03	h	Ingeniero Junior	12,00	18,40	220,77
MM04	h	Técnico de laboratorio	10,00	27,86	278,64
HE25	h	Equipo Sonelastic	6,00	1,61	9,68
HE07	h	Horno tubular de alto vacío Carbolite HVT	24,00	126,89	3045,29
HE24	h	Equipo Ultrasonidos	6,00	1,88	11,27
HE24	h	Equipo Arquímedes	9,00	0,14	1,29
HE17	h	Ultrasonidos	0,25	0,49	0,12

**7. Cuadro de precios descompuestos de la partida presupuestaria 4: Ensayo de flexión a 4 puntos**

Código	Unidad	Resumen	Cantidad	Precio (€/u)	Importe (€)
PP004	U	Ensayo de flexión a 4 puntos			937,71
MM01	h	Tutor de proyecto	2,50	61,88	154,71
MM02	h	Cotutor de proyecto	1,00	46,05	46,05
MM03	h	Ingeniero Junior	24,00	18,40	441,54
MM04	h	Técnico de laboratorio	8,00	27,86	222,91
HE08	h	Máquina de ensayos Shimadzu	10,00	7,18	71,80
HE09	h	Utillajes para flexión	10,00	0,07	0,70

**8. Cuadro de precios descompuestos de la partida presupuestaria 5: Ensayo de microtracción**

Código	Unidad	Resumen	Cantidad	Precio (€/u)	Importe (€)
PP005	U	Ensayo de microtracción			1032,14
MM01	h	Tutor de proyecto	2,00	61,88	123,77
MM02	h	Cotutor de proyecto	1,00	46,05	46,05
MM03	h	Ingeniero Junior	20,00	18,40	367,95
MM04	h	Técnico de laboratorio	10,00	27,86	278,64
MM18	u	Caja disco de diamante	0,20	357,12	71,42
MM19	u	Esmalte negro	0,10	1,95	0,20
MM20	u	Rotulador blanco	0,20	3,62	0,72
HE06	h	Pie de rey	10,00	0,01	0,10
HE08	h	Máquina de ensayos Shimadzu Autograph	16,00	7,18	114,88
HE11	h	Ustillajes para microtracción	16,00	0,14	2,24
HE12	h	Taladradora-fresadora OPTIMUM	4,50	1,01	4,55
HE13	h	Cortadora Accutom-10	7,50	2,88	21,63

**9. Cuadro de precios descompuestos de la partida presupuestaria 6: Ensayo de micropunzonado**

Código	Unidad	Resumen	Cantidad	Precio (€/u)	Importe (€)
PP006	U	Ensayo de micropunzonado			1121,91
MM01	h	Tutor de proyecto	2,00	61,88	123,77
MM02	h	Cotutor de proyecto	1,00	46,05	46,05
MM03	h	Ingeniero Junior	20,00	18,40	367,95
MM04	h	Técnico de laboratorio	10,00	27,86	278,64
MM18	u	Caja disco de diamante	0,20	357,12	71,42
MM19	u	Esmalte negro	0,10	1,95	0,20
HE06	h	Pie de rey	10,00	0,01	0,10
HE08	h	Máquina de ensayos Shimadzu Autograph	16,00	7,18	114,88
HE10	h	Utlilajes para micropunzonado	16,00	6,08	97,28
HE13	h	Cortadora Accutom-10	7,50	2,88	21,63

**10. Cuadro de precios descompuestos de la partida presupuestaria 7: Análisis por difracción de rayos X**

Código	Unidad	Resumen	Cantidad	Precio (€/u)	Importe (€)
PP007	U	Análisis por difracción de rayos X			1295,69
MM01	h	Tutor de proyecto	1,00	61,88	61,88
MM02	h	Cotutor de proyecto	4,00	46,05	184,20
MM03	h	Ingeniero Junior	23,00	18,40	423,14
MM04	h	Técnico de laboratorio	19,00	27,86	529,41
MM16	l	Agua destilada	0,04	0,67	0,03
MM17	l	Etanol	0,03	20,03	0,60
HE27	h	MAu	5,00	0,00	0,00
HE17	h	Ultrasonidos	3,00	0,49	1,47
HE19	h	Difractómetro de rayos x Phaser 2D	13,00	7,30	94,95

**11. Cuadro de precios descompuestos de la partida presupuestaria 8: Análisis por microscopía óptica**

Código	Unidad	Resumen	Cantidad	Precio (€/u)	Importe (€)
PP008	U	Análisis por microscopía óptica			699,71
MM01	h	Tutor de proyecto	3,00	61,88	185,65
MM02	h	Cotutor de proyecto	4,00	46,05	184,20
MM03	h	Ingeniero Junior	8,00	18,40	147,18
MM04	h	Técnico de laboratorio	5,00	27,86	139,32
MM16	l	Agua destilada	0,05	0,67	0,03
MM17	l	Etanol	0,03	20,03	0,60
HE17	h	Ultrasonidos	4,00	0,49	1,96
HE20	h	Microscopio óptico Nikon	5,00	8,15	40,77

**12. Cuadro de precios descompuestos de la partida presupuestaria 9: Análisis por FSEM**

Código	Unidad	Resumen	Cantidad	Precio (€/u)	Importe (€)
PP009	U	Análisis por FSEM			1477,95
MM01	h	Tutor de proyecto	2,00	61,88	123,77
MM02	h	Cotutor de proyecto	4,00	46,05	184,20
MM03	h	Ingeniero Junior	13,00	18,40	239,17
MM04	h	Técnico de laboratorio	16,00	27,86	445,82
MM16	l	Agua destilada	0,02	0,67	0,01
MM17	l	Etanol	0,03	20,03	0,60
HE28	h	Aztec de Oxford Instruments Ltda.	22,00	2,06	45,22
HE21	h	Microscopio electrónico de barrido de emisión de campos	24,00	18,30	439,17

**13. Cuadro de precios descompuestos de la partida presupuestaria 10: Análisis por EBSD**

Código	Unidad	Resumen	Cantidad	Precio (€/u)	Importe (€)
PP0010	U	Análisis por EBSD			1708,03
MM01	h	Tutor de proyecto	2,00	61,88	123,77
MM02	h	Cotutor de proyecto	4,00	46,05	184,20
MM03	h	Ingeniero Junior	22,00	18,40	404,75
MM04	h	Técnico de laboratorio	24,50	27,86	682,66
MM16	l	Agua destilada	0,02	0,67	0,01
HE22	h	Detector de energías dispersivas de rayos x	10,00	10,85	108,50
MM17	l	Etanol	0,03	20,03	0,60
HE28	h	Aztec de Oxford Instruments Ltda.	10,00	2,06	20,55
HE21	h	Microscopio electrónico de barrido de emisión de campos	10,00	18,30	182,99



**14. Cuadro de precios descompuestos de la partida presupuestaria 11: Análisis de corrosión a alta temperatura**

Código	Unidad	Resumen	Cantidad	Precio (€/u)	Importe (€)
PP0011	U	Análisis de corrosión a alta temperatura			6055,15
MM01	h	Tutor de proyecto	2,00	61,88	123,77
MM02	h	Cotutor de proyecto	4,00	46,05	184,20
MM03	h	Ingeniero Junior	160,00	18,40	2943,60
MM04	h	Técnico de laboratorio	2,00	27,86	55,73
HE13	h	Cortadora Accutom-10	7,50	2,88	21,63
HE23	h	Horno de mufla KL 03/11	148,00	18,42	2726,21
HE06	h	Pie de rey	2,00	0,01	0,02

**15. Cuadro de precios descompuestos de la partida presupuestaria 12:  
Preparación metalográfica**

Código	Unidad	Resumen	Cantidad	Precio (€/u)	Importe (€)
PP0012	U	Preparación metalográfica			1983,76
MM01	h	Tutor de proyecto	3,00	61,88	185,65
MM02	h	Cotutor de proyecto	1,00	46,05	46,05
MM03	h	Ingeniero Junior	23,00	18,40	423,14
MM04	h	Técnico de laboratorio	33,00	27,86	919,51
MM16	l	Agua destilada	1,50	0,67	1,00
MM17	l	Etanol	0,50	20,03	10,01
MM22	kg	Resina Condufast	0,10	100,35	9,53
MM23	kg	Resina Clarofast	0,05	95,61	4,78
MM24	u	Papel de lija 80 mallas	1,00	0,75	0,75
MM25	u	Papel de lija 220 mallas	1,00	3,35	3,35
MM26	u	Papel de lija 500 mallas	1,00	3,57	3,57
MM27	u	Papel de lija 1000 mallas	1,00	3,89	3,89
MM28	u	Disco MD-Largo	1,00	34,73	34,73
MM29	u	Disco MD-Nap	1,00	22,30	22,30
MM30	u	Disco MD-Chen	1,00	35,68	35,68
MM31	l	Solución de diamante 9 micras	0,02	266,71	5,33
MM32	l	Pasta de diamante 1 micra	0,02	336,25	6,73
MM33	l	Aceite lubricante	0,02	28,77	0,58
MM34	l	Suspensión sílica	0,36	87,69	31,57
MM35	l	Agua oxigenada	0,04	6,18	0,25
MM36	u	Pipeta	2,00	25,23	50,46
HE14	h	Embutidora CitoPress-1	11,50	2,62	30,12
HE15	h	Desbastadora LaboPol-25	26,50	2,61	69,11
HE16	h	Pulidora LaboPol-5 + dosificador	13,00	3,91	50,85
HE17	h	Ultrasonidos	4,00	0,49	1,94
HE18	h	Pulidora VibroMet-2	12,00	2,74	32,88

## 16. Presupuesto de inversión

Código	Unidad	Descripción	Cantidad	Precio (€/ud)	Importe (€)
PP001	U	Selección y cálculo de cantidades de polvos	1	252,66	252,66
PP002	U	Mezclado y compactación de los polvos	1	730,86	730,86
PP003	U	Sinterizado de compactos	1	3798,76	3798,76
PP004	U	Ensayo de flexión a 4 puntos	1	937,71	937,71
PP005	U	Ensayo de microtracción	1	1032,14	1032,14
PP006	U	Ensayo de micropunzonado	1	1121,91	1121,91
PP007	U	Análisis por difracción de rayos X	1	1295,69	1295,69
PP008	U	Análisis por microscopía óptica	1	699,71	699,71
PP009	U	Análisis por FSEM	1	1477,95	1477,95
PP010	U	Análisis por EBSD	1	1708,03	1708,03
PP011	U	Análisis de corrosión a alta temperatura	1	6055,15	6055,15
PP012	U	Preparación metalográfica	1	1983,76	1983,76
PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN MATERIAL					21094,34
13% Gastos generales					2742,26
6% Beneficio Industrial					337,51
PRESUPUESTO DE LICITACION O CONTRATA					24174,11
21% IVA					5076,56
TOTAL, PRESUPUESTO C/IVA					29250,68
<p>Asciende el presupuesto proyectado, a la expresada cantidad de: Veintinueve mil doscientos cincuenta con sesenta y ocho céntimos</p>					