



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial

Estudio y caracterización del efecto de adición de hierro y/o
indio al titanio en su formación de aleaciones por fusión por
arco eléctrico

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

AUTOR/A: Rodríguez Morales, Miguel Ángel

Tutor/a: Amigó Borrás, Vicente

Cotutor/a externo: CORREA ROSSI, MARIANA

CURSO ACADÉMICO: 2022/2023

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría dar las gracias principalmente a Vicente Amigó Borrás por haber aceptado tutorizarme en la situación tan difícil en la que me encontraba. Por abrirme las puertas del departamento de materiales y proporcionarme una formación que voy a agradecer el resto de mi vida. Su disponibilidad, paciencia y comprensión ante los inconvenientes dados durante el proceso han sido de gran ayuda para afrontar este trabajo.

Por otra parte, quiero agradeceré a André por haber dedicado parte de su tiempo en explicarme algunos de los procesos y el uso de algunos utensilios utilizados durante la parte experimental.

A mis amigos, en especial a Ignacio y Sergio, mis compañeros de piso, que me han apoyado durante esta etapa y me han motivado para esforzarme en momentos de mal estado anímico.

A mis padres y hermanos por haberme apoyado durante toda la carrera, confiando siempre en mi capacidad de sacarme la carrera en 4 años aún después de las dificultades surgidas tras el primer año.

Por último, quiero agradeceré a mi difunto abuelo ya que lo he tenido muy presente durante el trabajo. Me hubiera encantado que pudiera ver cuanto han crecido sus nietos, estoy seguro de que estaría orgulloso de nosotros.

RESUMEN

La investigación en aleaciones de titanio se extiende a diferentes sectores industriales debido a sus excelentes propiedades, pues posee una resistencia mecánica específica excelente y una muy buena resistencia a la corrosión y oxidación, por lo que su uso, a pesar de su elevado precio, tiene un gran interés hasta temperaturas de 400 °C. Se han desarrollado aleaciones con elementos que estabilizan la fase beta del titanio pero que igualmente resultan muy costosas, como es la aleación Ti-6Al-4V, y por ello la estabilización con hierro, elemento mucho más económico, puede formar parte de las aleaciones de titanio de bajo costo. Por ello el trabajo se plantea con la obtención de aleaciones Ti-Fe con tres contenidos en hierro que puedan proporcionar diferentes contenidos entre la fase alfa y beta y a su vez la posible formación del intermetálico TiFe. Junto a esta aleación también es de interés analizar el comportamiento y capacidad de obtención de aleaciones de titanio con elementos de bajo punto de fusión por la diferencia que en estos elementos podamos tener entre el titanio (temperatura de fusión de 1668 °C) y el indio (temperatura de fusión de 156,6 °C). Por ello, en el trabajo se obtendrán, por fusión por arco eléctrico, tres aleaciones de Ti-Fe con diferentes contenidos en Fe y tres aleaciones Ti-In con tres diferentes contenidos en In, que serán caracterizadas microestructuralmente mediante difracción de rayos X y microscopía electrónica de barrido. Se realizará una caracterización básica de las propiedades mecánicas mediante la determinación de su dureza y microdureza, intentando obtener la respuesta de las aleaciones al micropunzonado en todo caso.

RESUM

La investigació en aliatges de titani s'estén a diferents sectors industrials a causa de les seves excel·lents propietats, ja que posseeix una resistència mecànica específica excel·lent i una molt bona resistència a la corrosió i oxidació, per la qual cosa el seu ús, malgrat el seu preu elevat, té un gran interès fins a temperatures de 400 °C. S'han desenvolupat aliatges amb elements que estableixen la fase beta del titani però que igualment resulten molt costosos, com és l'aliatge Ti-6Al-4V, i per això l'estabilització amb ferro, element molt més econòmic, pot formar part dels aliatges de titani de baix cost. Per això, el treball es planteja amb l'obtenció d'aliatges Ti-Fe amb tres continguts en ferro que puguin proporcionar diferents continguts entre la fase alfa i beta i alhora la possible formació de l'intermetàl·lic TiFe. Al costat d'aquest aliatge també és interessant analitzar el comportament i la capacitat d'obtenció d'aliatges de titani amb elements de baix punt de fusió per la diferència que en aquests elements puguem tenir entre el titani (temperatura de fusió de 1668 °C) i l'indi (temperatura de fusió de 156,6 °C). Per això, en el treball s'obtidran, per fusió per arc elèctric, tres aliatges de Ti-Fe amb diferents continguts a Fe i tres aliatges Ti-In amb tres diferents continguts a In, que seran caracteritzats microestructuralment mitjançant difracció de raigs X i microscòpia electrònica d'escombrada. Es realitzarà una caracterització bàsica de les propietats mecàniques mitjançant la determinació de la seva duresa i microduresa, intentant obtenir la resposta dels aliatges al micropunxonat en tot cas.

ABSTRACT

Research in titanium alloys extends to different industrial sectors due to its excellent properties, as it has an excellent specific mechanical strength and a very good resistance to corrosion and oxidation, so its use, despite its high price, is of great interest up to temperatures of 400 °C. Alloys have been developed with elements that stabilize the beta phase of titanium, but which are also very expensive, such as the Ti-6Al-4V alloy, and therefore stabilization with iron, a much cheaper element, can be part of the alloys of inexpensive titanium. For this reason, the work is proposed with the obtaining of Ti-Fe alloys with three iron contents that can provide different contents between the alpha and beta phase and, in turn, the possible formation of the intermetallic TiFe. Along with this alloy, it is also of interest to analyze the behavior and ability to obtain titanium alloys with low melting point elements due to the difference that we may have in these elements between titanium (melting temperature of 1668 °C) and indium. (melting temperature of 156.6 °C). Therefore, in the work, three Ti-Fe alloys with different Fe contents and three Ti-In alloys with three different In contents will be obtained by electric arc fusion, which will be microstructurally characterized by X-ray diffraction and microscopy. scanning electronics. A basic characterization of the mechanical properties will be carried out by determining their hardness and microhardness, trying to obtain the response of the alloys to micropunching in any case.

DOCUMENTO 1: MEMORIA

Índice

1.	MOTIVACIONES.....	14
2.	OBJETIVOS.....	15
3.	INTRODUCCIÓN.....	16
3.1.	Historia del titanio.....	16
3.2.	Propiedades.....	16
3.3.	Estructura cristalina.....	18
3.4.	Aleaciones de titanio.....	18
3.5.	Propiedades de las aleaciones de titanio.....	20
3.6.	Aleaciones α	21
3.7.	Aleaciones $\alpha+\beta$	21
3.8.	Aleaciones β	22
3.9.	Ti-Fe.....	23
3.10.	Ti-In.....	25
4.	PLANIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....	26
4.1.	Preparación de las muestras.....	26
4.1.1.	Selección de las aleaciones.....	26
4.1.2.	Embutición de los materiales.....	27
4.1.3.	Densidad de las aleaciones.....	27
4.2.	Caracterización mecánica de las aleaciones.....	27
4.2.1.	Ensayo de microdureza.....	28
4.2.2.	Ensayo de micropunzonado.....	28
4.3.	Caracterización microestructural de las aleaciones.....	28
4.3.1.	Análisis mediante microscopía óptica.....	29
4.3.2.	Análisis mediante microscopía electrónica de barrido.....	29
4.3.3.	Análisis mediante difracción de rayos X.....	29
5.	MÉTODOS E INSTRUMENTOS UTILIZADOS.....	30
5.1.	Preparación de las muestras.....	30
5.1.1.	Embutición de los materiales.....	30
5.1.2.	Densidad de las aleaciones.....	33
5.2.	Caracterización mecánica de las aleaciones.....	34
5.2.1.	Ensayo de dureza.....	34
5.2.2.	Ensayo de micropunzonado.....	35
5.3.	Caracterización microestructural de las aleaciones.....	36

5.3.1.	Análisis mediante microscopía óptica	36
5.3.2.	Análisis mediante microscopía electrónica de barrido	36
5.3.3.	Análisis mediante difracción de rayos X.....	37
6.	RESULTADOS	38
6.1.	Preparación de las muestras	38
6.1.1.	Densidad de las aleaciones	38
6.2.	Caracterización mecánica de las aleaciones	39
6.2.1.	Ensayo de microdureza.....	39
6.2.2.	Ensayo de micropunzonado.....	40
6.3.	Caracterización microestructural de las aleaciones	44
6.3.1.	Caracterización mediante microscopía óptica	44
6.3.2.	Caracterización mediante microscopía electrónica de barrido	48
6.3.3.	Caracterización mediante difracción de rayos X.....	58
7.	DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	60
8.	CONCLUSIONES.....	64
9.	BIBLIOGRAFÍA.....	65

Índice de figuras

Figura 1: Densidad de metales seleccionados. (Leyens & Peters, 2003)	17
Figura 2: Estructura cristalina de las fases HCP α y β BCC. (Leyens & Peters, 2003)	18
Figura 3: Influencia de los elementos aleantes en los diagramas de fase de las aleaciones de Ti. (Leyens & Peters, 2003).....	19
Figura 4: Clasificación de las aleaciones de titanio con diagrama de fases tridimensional. (Leyens & Peters, 2003)	19
Figura 5: Diagrama de fases del Ti-Al (Murray, 1987)	21
Figura 6: Diagrama de fases de la aleación Ti-Fe. (Askeland, 2010)	24
Figura 7: Diagrama de fases de la aleación Ti-In (Aldridge & Downs, 2011).	25
Figura 8: Cortadora de precisión Accutom-10. (Metalinspec).....	30
Figura 9: Prensa de embutición CitoPress-1. (Metalinspec)	31
Figura 10: Pulidora LaboPol-5 y dosificador LaboDoser. (Budapest University of Technology and Economics).....	32
Figura 11: Máquina ultrasonidos Elmasonic S 30 H. (Body Cult)	32
Figura 12: Balanza Kern usada para el cálculo de densidades. (Scales Measuring Instruments).....	34
Figura 13: Durómetro HMV-2T usado para el ensayo de dureza Vickers. (Pinterest)	34
Figura 14: Máquina de prueba universal modelo AG-X plus de Shimadzu. (Nicol scales)	35
Figura 15: Microscopio electrónico de barrido modelo Ultra 55. (Universitat Politècnica de València).....	37
Figura 16: Difractómetro de sobremesa modelo D2 PHASER. (Azo Materials)	38
Figura 17: Resultados del ensayo Small punch de Ti-10Fe y Ti-17Fe.	40
Figura 18: Diagrama de fases de la aleación Ti-Fe. (modificado de Askeland, 2010)	41
Figura 19: Resultados del ensayo Small punch de Ti-5In y Ti-10In.	42
Figura 20: Fractura del Ti-10Fe tras el ensayo de Small punch.....	42
Figura 21: Fractura del Ti-5Fe tras el ensayo de Small punch.....	43
Figura 22: Fractura del Ti-10In tras el ensayo de Small punch.	43
Figura 23: Montaje a 50x de la muestra Ti-2.5In.....	44
Figura 24: Montaje a 50x de la muestra Ti-5In.....	45
Figura 25: Montaje a 50x de la muestra Ti-10In.....	45
Figura 26: Muestra de Ti-5Fe a 100x.....	46
Figura 27: Muestra de Ti-10Fe a 100x.....	47
Figura 28: Muestra de Ti-17Fe a 100x.....	47
Figura 29: BSE a 50 aumentos de las aleaciones Ti-2.5In (a), Ti-5In (b) y Ti-10In (c)...	48
Figura 30: BSE a 250 aumentos de las aleaciones Ti-2.5In (a), Ti-5In (b) y Ti-10In (c)..	49
Figura 31: Porcentaje atómico y en peso de los distintos elementos en la zona marcada. (Ti-2,5In, 1000x).....	50
Figura 32: Porcentaje atómico y en peso de los distintos elementos en la zona marcada. (Ti-5In, 500x).....	50
Figura 33: Porcentaje atómico y en peso de los distintos elementos en las zonas marcadas. (Ti-10In, 1000x)	51
Figura 34: Análisis linear de la muestra de Ti-5In a 1000x.	52
Figura 35: Mapa de concentraciones del Ti-5In a 1000x.....	53

Figura 36: Comparativa entre concentraciones de oxígeno en dos aleaciones, Ti-5In (izquierda) y Ti-10In (derecha).	54
Figura 37: BSE a 50 aumentos de las aleaciones Ti-5Fe (a), Ti-10Fe (b) y Ti-17Fe (c)...	54
Figura 38: Porcentaje atómico y en peso de los distintos elementos en la zona marcada. (Ti-5Fe, 250x).	55
Figura 39: Porcentaje atómico y en peso de los distintos elementos en la zona marcada. (Ti-10Fe, 250x).	55
Figura 40: Porcentaje atómico y en peso de los distintos elementos en la zona marcada. (Ti-17Fe, 500x).	56
Figura 41: Análisis linear de la muestra de Ti-10Fe a 500x.	56
Figura 42: Mapa de concentraciones del Ti-17Fe a 1000x.	57
Figura 43: Difractogramas de las muestras de Ti-5In (arriba) y Ti-10In (abajo).	58
Figura 44: Difractogramas de las muestras de Ti-10Fe (arriba) y Ti-17Fe (abajo).	59
Figura 45: Comparativa de la dureza en HV de las aleaciones Ti-XIn analizadas, el Ti-6Al-4V y el Ti cp.	61
Figura 46: Comparativa de la dureza en HV de las aleaciones Ti-XFe analizadas, el Ti-6Al-4V y el Ti cp.	61
Figura 47: Comparativa de la fuerza máxima soportada en el ensayo de Small Punch de las aleaciones de Ti-XIn analizadas, el Ti-6Al-4V y el Ti cp.	62
Figura 48: Comparativa de la fuerza máxima soportada en el ensayo de Small Punch de las aleaciones de Ti-XFe analizadas, el Ti-6Al-4V y el Ti cp.	63

Índice de tablas

Tabla 1: Propiedades físicas seleccionadas del titanio, comparándolas con otros elementos competidores (Veiga, Davim, & Loureiro, 2012)	17
Tabla 2: Comparativa entre las propiedades de las aleaciones α , β y $\alpha+\beta$ (Leyens & Peters, 2003).....	20
Tabla 3: Propiedades seleccionadas de Ti6Al4V en dos condiciones metalúrgicas (Leyens & Peters, 2003).....	22
Tabla 4: Ventajas y desventajas generales de las aleaciones de titanio β (Leyens & Peters, 2003).....	23
Tabla 5: Aleaciones comerciales Ti-Fe. (García, 2009).....	24
Tabla 6: Propiedades mecánicas típicas de las aleaciones de titanio coladas (Leyens & Peters, 2003).	27
Tabla 7: Densidad de cada una de las aleaciones estudiadas.	39
Tabla 8: Datos de microdureza recogidos de cada aleación.....	39
Tabla 9: Media y desviación típica del ensayo de microdureza.	40

Índice de ecuaciones

Ecuación 1: Principio de Arquímedes	33
Ecuación 2: modificación de principio de Arquímedes	33
Ecuación 3: Cálculo de dureza Vickers	35

1. MOTIVACIONES

Actualmente, uno de los grandes problemas que se está encontrando el sector industrial es la dificultad de hallar nuevos materiales que mejoren las propiedades de los ya existentes y que, a su vez, su coste no suponga un incremento considerado respecto a estos.

Las aleaciones de titanio se utilizan ampliamente en las industrias aeroespacial y de defensa debido a su alta relación fuerza-peso, resistencia a la corrosión y capacidad para resistir temperaturas extremas. Sin embargo, también se utilizan aleaciones de titanio en una gran variedad de otras industrias, como el procesamiento de productos químicos, la producción de petróleo y gas y la generación de energía. Las motivaciones para realizar un estudio sobre el uso industrial de éstas son muchas y variadas. (ULMA, 2020)

La aleación de Ti más usada actualmente en la industria es el Ti-6Al-4V. Esta presenta propiedades magníficas pero el alto coste del vanadio (V) y sus efectos tóxicos a larga duración en ciertas aplicaciones hacen que el estudio y búsqueda de aleaciones de titanio sea de gran relevancia hoy en día. (Elias, Lima, Valiev, & Meyers, 2008)

El hierro es un aleante utilizado en muchas aleaciones debido a sus magníficas propiedades y su reducido coste. Este es de gran relevancia ya que podría usarse para sustituir elementos β -estabilizantes de gran coste como el vanadio o el molibdeno. (Ayad, Astuty, Muhammad, & Hanim, 2017)

Por su parte el indio es un elemento muy prometedor en la industria biomédica debido a que no presenta evidencia de citotoxicidad y su magnífica biocompatibilidad ya estudiada en experimentos previos. (Baek-Hee, Young Do, & Kyu Hwan, 2003)

Por tanto, la motivación principal de este estudio es el analizar la adición de indio y hierro en distintas concentraciones al titanio para valorar si las propiedades de las aleaciones resultantes mejoran el rendimiento aportado por el Ti cp y se acercan a las aleaciones de gran coste usadas actualmente en la industria.

2. OBJETIVOS

Los objetivos de un estudio sobre aleaciones de titanio, como el Ti-In y el Ti-Fe, pueden variar dependiendo del enfoque y los intereses del investigador. En nuestro caso, nuestro estudio incluye los siguientes objetivos:

1. Evaluar las propiedades mecánicas y físicas de las aleaciones de Ti-In y Ti-Fe, como su dureza, módulo elástico, naturaleza dúctil o frágil, y determinar cómo estas propiedades se comparan con las del titanio puro y con otras aleaciones de titanio.
2. Investigar cómo la proporción de titanio y los demás elementos en las aleaciones afectan sus propiedades mecánicas y físicas, y determinar las condiciones óptimas para obtener aleaciones con las mejores propiedades.
3. Estudiar la microestructura de las aleaciones de Ti-In y Ti-Fe, utilizando técnicas de microscopía como la microscopía óptica y la microscopía electrónica de barrido, para determinar cómo se forman y cómo varían con la proporción de elementos y las condiciones de colada.
4. Analizar los efectos que tiene la concentración de los elementos aleantes en la densidad del material.
5. Evaluar si las propiedades de estas aleaciones pueden sustituir, abaratando así los costes, al Ti-6Al-4V, la aleación más usada hoy en día.

En general, este estudio sobre aleaciones de titanio, concretamente el Ti-In y el Ti-Fe, tiene como objetivo principal evaluar las propiedades de estas aleaciones y determinar su viabilidad y potencial en diferentes aplicaciones industriales con el fin de sustituir a los elementos aleantes actuales de elevado coste.

3. INTRODUCCIÓN

3.1. Historia del titanio

El titanio es un elemento químico de la tabla periódica, con el símbolo Ti y el número atómico 22. Es un metal de transición de color gris plateado y es muy resistente a la corrosión. A pesar de ser el noveno elemento más abundante en la corteza terrestre, el titanio es difícil de extraer y trabajar debido a su alta reactividad química. (Lifeder, 2019)

La historia del titanio comienza en 1791, cuando el químico inglés William Gregor identificó el elemento en una muestra de mineral llamada mena de ilmenita. Sin embargo, no se desarrollaron formas prácticas de producirlo hasta principios del siglo XX. (Encyclopaedia, 2023)

En 1910, el químico estadounidense Matthew Albert Hunter logró producir titanio puro mediante la reducción del cloro con sodio, un proceso conocido como método de Hunter. Este proceso era costoso y no se utilizó comercialmente.

En 1940, el químico estadounidense William J. Kroll desarrolló un proceso más eficiente para producir titanio, conocido como el proceso de Kroll. Este proceso se convirtió en el estándar para la producción de titanio y fue utilizado ampliamente en la industria. (Lifeder, 2019)

El titanio se utiliza en una amplia variedad de aplicaciones industriales, como en la fabricación de aviones y automóviles, en la construcción de edificios y en la producción de dispositivos médicos. Las aleaciones de titanio, que se obtienen al mezclar titanio con otros elementos químicos, son muy resistentes y ligeras, y se utilizan en aplicaciones que requieren alta resistencia y durabilidad. (Leyens & Peters, 2003)

Hoy en día, el titanio se produce en grandes cantidades en todo el mundo y se espera que su demanda continúe creciendo en el futuro debido a sus propiedades únicas y su amplia gama de usos.

3.2. Propiedades

El titanio es uno de los metales más comunes en la superficie de la Tierra, aunque su cantidad pura en ella es limitada. Además, su procesamiento resulta muy costoso, lo que limita su uso en áreas y fines específicos. En términos de densidad, el titanio es considerado un metal ligero, ya que esta es inferior a 5 g/cm^3 , aunque es el más pesado de ellos con una densidad de 4.5 g/cm^3 , superando al aluminio en el doble y siendo la mitad de denso que el hierro. Esto se puede apreciar en la figura 1.

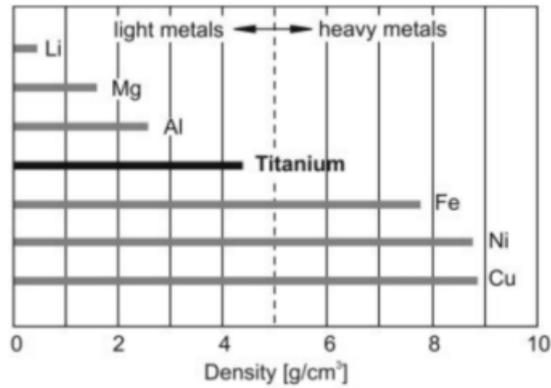


Figura 1: Densidad de metales seleccionados. (Leyens & Peters, 2003)

Otra propiedad destacable del Titanio es su gran resistencia a la corrosión. Este metal es capaz de resistir distintos ambientes corrosivos, incluyendo el agua salada, los ácidos y las soluciones alcalinas. Esta propiedad lo hace ideal para la fabricación de componentes para la industria química, alimentaria, biomédica y farmacéutica, así como también para aplicaciones marinas. (Veiga, Davim, & Loureiro, 2012)

Además, el titanio cuenta con una alta temperatura de fusión, que ronda los 1668 °C. Esta propiedad lo hace resistente a altas temperaturas, lo que lo convierte en ideal para su uso en la fabricación de distintos tipos de motores, como turbinas de avión y piezas para la industria aeroespacial. Todo esto, sumado a su gran resistencia mecánica, lo hacen uno de los metales más versátiles en cuanto a aplicaciones industriales se refiere. (Leyens & Peters, 2003)

En la siguiente tabla se muestra una comparativa entre el titanio y algunos elementos competidores, mostrando algunas propiedades físicas de interés. En esta podemos observar una conductividad térmica y un módulo elástico relativamente inferior a la de los otros elementos mostrados.

Tabla 1: Propiedades físicas seleccionadas del titanio, comparándolas con otros elementos competidores (Veiga, Davim, & Loureiro, 2012)

	Ti	Al	Fe	Ni
Density [g/cm³]	4.5	2.7	7.9	8.9
Melting point [°C]	1670	660	1538	1455
Thermal conductivity [W/mK]*	15-22	221-247	68-80	72-92
Elastic modulus [GPa]	115	72	215	200
Reactivity with oxygen	high +	high	low	low
Corrosion resistance	high +	high	low	medium
Metal price	high +	medium	low	high

3.3. Estructura cristalina

A temperatura ambiente y presión atmosférica, el titanio tiene una estructura cristalina hexagonal compacta (HCP), con un parámetro de red a de 0,295 nm. En esta estructura cristalina, los átomos de titanio están dispuestos de forma compacta, formando una celda unitaria hexagonal. Cada celda unitaria tiene dos parámetros de red, a y c , siendo $a=c/1,587$. (Leyens & Peters, 2003)

Esta estructura HCP es estable hasta los 882,5 °C, a partir de esta temperatura se forma la fase β , esta consiste en una estructura cristalina cúbica centrada en el cuerpo (BCC). Esta estructura se observa en el titanio desde la temperatura de transición 882,5°C hasta los 1678 °C correspondientes a la temperatura de fusión. Sin embargo, la estructura HCP se observa con mayor frecuencia en el titanio puro y sus aleaciones en condiciones ambientales. (Jackson, 2011)

Estas dos estructuras se pueden presenciar en la figura mostrada a continuación.

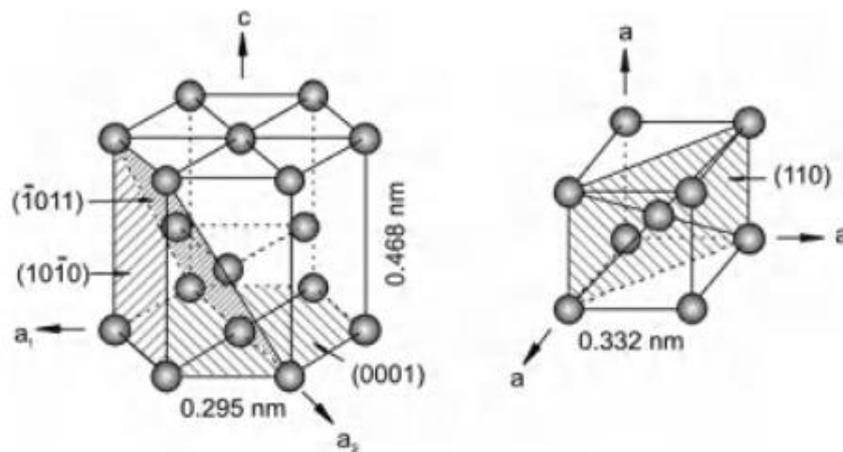


Figura 2: Estructura cristalina de las fases HCP α y β BCC. (Leyens & Peters, 2003)

La estructura cristalina del titanio desempeña un papel importante en la determinación de sus propiedades mecánicas, térmicas y electrónicas, y es un factor clave en el desarrollo de nuevas aleaciones de titanio con mejores prestaciones.

3.4. Aleaciones de titanio

El titanio se ha aleado con diversos elementos a lo largo del tiempo, descubriendo así que algunos elementos ayudan a la formación de fase β y otros a que se establezca la fase α . En la siguiente figura se observa una clasificación de ciertos elementos aleantes y como su adición al titanio modifica el diagrama de fases de este.

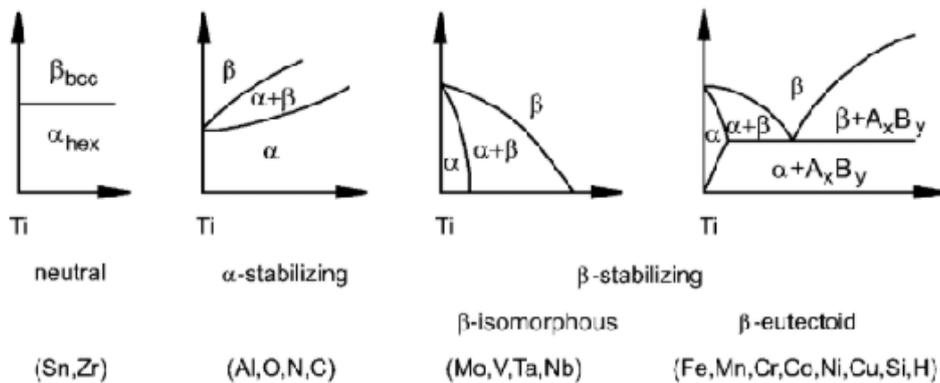


Figura 3: Influencia de los elementos aleantes en los diagramas de fase de las aleaciones de Ti. (Leyens & Peters, 2003)

Las aleaciones de titanio se suelen clasificar en tres categorías conocidas como α , β y $\alpha+\beta$. No obstante, para ser más rigurosos, existen otras categorías como las β -metaestables y las casi- α .

En el siguiente diagrama tridimensional mostrado en la figura 4 se observa la distribución de las diversas categorías de aleaciones previamente mencionadas en función de la proporción de elementos α -estabilizantes y β -estabilizantes añadidos y la temperatura.

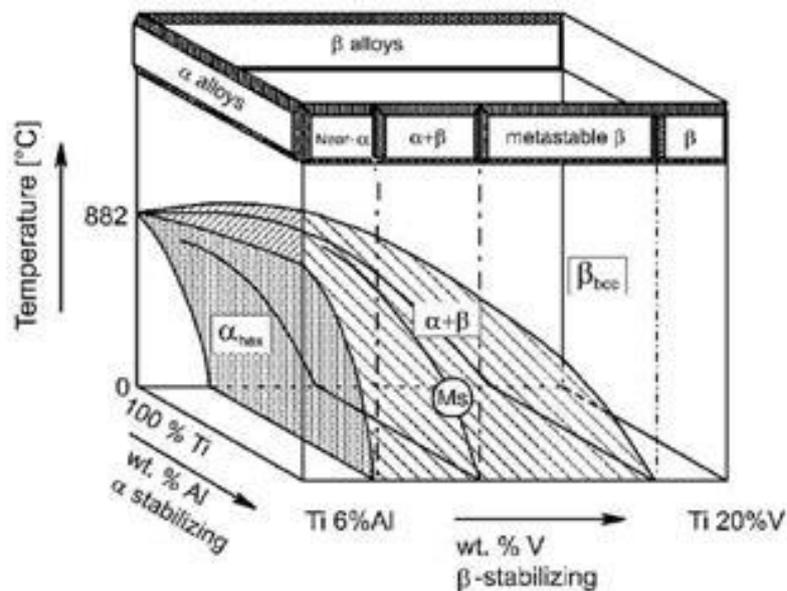


Figura 4: Clasificación de las aleaciones de titanio con diagrama de fases tridimensional. (Leyens & Peters, 2003)

Dentro de las aleaciones α encontramos al titanio puro y a las aleaciones con solo elementos α -estabilizantes o elementos neutros. Por otro lado, con un porcentaje muy ínfimo de elementos β -estabilizantes están los llamados casi- α . Estas poseen mayor resistencia a la tracción a temperatura ambiente que las aleaciones α , y muestran la mayor resistencia a la fluencia entre todas las aleaciones de Ti a temperaturas superiores a los 400°C aproximadamente. (Sinha, Sanyal, & Bandyopadhyay, 2017)

Siguiéndolos se encuentran las aleaciones $\alpha+\beta$, estas son con diferencia las más utilizadas. Estas corresponden a las aleaciones con un 5% hasta un 40% de elementos β -estabilizantes a temperatura ambiente. Las características de este tipo de aleaciones pueden mejorarse mediante tratamientos térmicos y/o procesamiento termomecánico. Se caracterizan por la transformación martensítica durante el enfriamiento rápido desde la región β hasta la temperatura ambiente. La conocida Ti-6Al-4V se encuentra en este grupo de aleaciones. (Leyens & Peters, 2003)

A medida que se va incrementando la fracción de β -estabilizantes aparecen las aleaciones β -metaestables y para acabar están las aleaciones β .

3.5. Propiedades de las aleaciones de titanio

Las propiedades de las aleaciones de titanio vienen determinadas sobre todo por la fracción de elementos aleantes que contiene y por las propiedades individuales de las fases α y β . Esto es debido a que comparado con la fase β , la estructura cristalina de la α es anisotrópica y se encuentra de forma mucho más compactada. La fase α presenta una interesante variedad de propiedades comparada con la β . Algunas de estas son:

- Mayor resistencia a deformación plástica
- Ductilidad reducida
- Propiedades mecánicas y físicas anisotrópicas
- Una velocidad de difusión inferior en al menos dos órdenes de magnitud
- Mayor resistencia al deslizamiento

Tabla 2: Comparativa entre las propiedades de las aleaciones α , β y $\alpha+\beta$ (Leyens & Peters, 2003).

	α	$\alpha + \beta$	β
Densidad	+	+	-
Fuerza	-	+	++
Ductilidad	- / +	+	+/-
Resistencia a la fractura	+	-/+	+/-
Resistencia a la fluencia	+	+/-	-
Resistencia a la corrosión	++	+	+/-
Resistencia a la oxidación	++	+/-	-
Soldabilidad	+	+/-	-
Conformabilidad en frío	--	-	-/+

De la tabla anterior se puede deducir, como previamente hemos mencionado, que las aleaciones $\alpha+\beta$ son las más usadas. La combinación entre las dos fases permite poder obtener aleaciones con grandes propiedades mecánicas gracias a la parte β y buenas prestaciones químicas debido a la parte α .

3.6. Aleaciones α

Este tipo de aleaciones, debido a su excelente comportamiento frente a la corrosión y la deformación, son muy usadas en las industrias químicas y de ingeniería de procesos. La presencia de oxígeno en estas aleaciones provoca un incremento drástico de la dureza simultaneo a una reducción de la ductilidad.

Estas incluyen al titanio comercialmente puro, y a la combinación de este con elementos aleantes neutros o α -estabilizantes.

El Al es uno de los elementos α -estabilizantes más usados para crear aleaciones de titanio, éste forma una de las más conocidas y estudiadas, el Ti-Al. Esta presenta varias fases intermetálicas de las cuales hoy en día solo son técnicamente relevantes la α_2 -Ti₃Al y γ -TiAl₂. Las otras fases son demasiado frágiles para su uso. Sabiendo esto y contemplando el diagrama de fases del Ti-Al en la figura 5 podemos deducir que no se suele añadir más de un 10% en peso de aluminio debido a que a partir de ese porcentaje las fases no deseables empiezan a ser bastante estables.

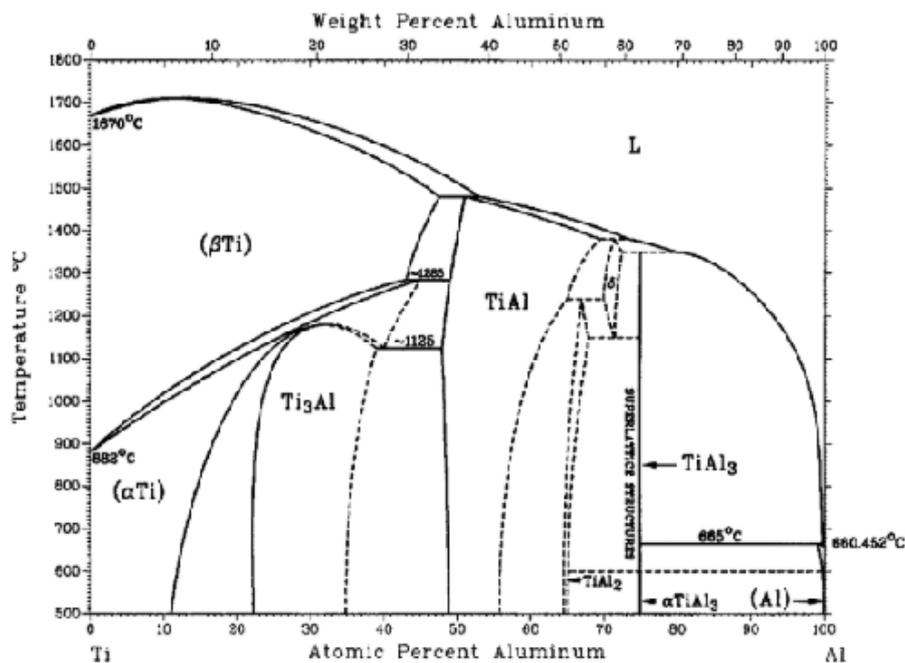


Figura 5: Diagrama de fases del Ti-Al (Murray, 1987)

3.7. Aleaciones $\alpha+\beta$

Como mencionamos anteriormente, este apartado abarca las aleaciones que contengan un porcentaje de β -estabilizantes desde un 5% hasta un 40%. Además, en este grupo se encuentra la aleación más comercial del titanio, la Ti-6Al-4V. Esta representa más de un 50% de la producción total del titanio. (Leyens & Peters, 2003)

Hay dos principales motivos por el que el uso de esta aleación esté tan extendido, sobre todo en la industria aeroespacial, el primero es porque presenta un muy buen equilibrio entre sus propiedades y el segundo es porque es la aleación con la que más se ha experimentado con diferencia.

En la siguiente tabla se muestran algunas de las principales propiedades de esta aleación en dos condiciones metalúrgicas distintas.

Tabla 3: Propiedades seleccionadas de Ti6Al4V en dos condiciones metalúrgicas (Leyens & Peters, 2003)

Material	TS [MPa]	YS [MPa]	E [GPa]	Hardness [HV]	K [W/mK]	β -Transus [°C]
Ti-6Al-4V (annealed bar)	895	825	110	340	7.3	995
Ti-6Al-4V (solution + age bar)	1035	965	-	360	7.5	995

TS – Tensile Strength; YS – Yield Strength; E – Elastic modulus; C – Thermal conductivity.

3.8. Aleaciones β

Este tipo de aleaciones presentan un porcentaje mayor que 40% de β -estabilizantes. En los últimos años han aumentado su importancia debido a que su gran resistencia, se les puede endurecer hasta a alcanzar niveles de resistencia superiores a los 1400MPa.

Algunas aleaciones pertenecientes a esta categoría son el TIMETAL 10-2-3 (Ti-10V-2Fe-3Al), Beta-C (Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr), TIMETAL 15-3 (Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al), TIMETAL 21S (Ti-15Mo-3Nb-3Al-0,2Si) y el TIMETAL LCB (Ti-6,8Mo-4,5Fe-1,5Al). De estos, tanto el TIMETAL 10-2-3 como el Beta-C presentan una muy buena respuesta a ensayos de resistencia y tenacidad. (Leyens & Peters, 2003)

Estas aleaciones tienen densidades relativamente más altas, y generalmente resistencias a la fluencia más bajas que las aleaciones α/β . Se utilizan en aplicaciones estructurales en las que se requieren altas resistencias específicas, bajo módulo elástico, buena resistencia a la fatiga, suficiente tenacidad, excelente resistencia a la corrosión y buena conformabilidad.

Tabla 4: Ventajas y desventajas generales de las aleaciones de titanio β (Leyens & Peters, 2003).

Ventajas	Desventajas
alta relación resistencia/densidad	alta densidad
bajo módulo	bajo módulo
alta resistencia/alta tenacidad	malas propiedades a bajas y altas temperaturas
alta resistencia a la fatiga	pocas opciones de procesamiento (algunas aleaciones)
buena templabilidad profunda	alto coste de formulación
baja temperatura de forja	problemas de segregación
tira producible - bajo coste PTM* (algunas aleaciones)	alta elasticidad
conformable en frío (algunas aleaciones)	inestabilidades microestructurales
fácil de tratar térmicamente	mala resistencia a la corrosión (algunas aleaciones)
excelente resistencia a la corrosión (algunas aleaciones)	recogida intersticial
excelente resistencia a la combustión (algunas aleaciones)	
*PTM: Procesamiento termomecánico	

3.9. Ti-Fe

Uno de los principales problemas de las aleaciones de titanio es el elevado coste de los elementos aleantes. Es por eso que las aleaciones basadas en hierro son de gran relevancia.

El Fe es un elemento β -estabilizante, se trata del segundo metal más abundante de la corteza terrestre, solo por detrás del aluminio, y el cuarto elemento más abundante de la misma, tras el oxígeno, el silicio y aluminio.

Es un elemento con una alta temperatura de fusión, 1536 °C, y junto al titanio forma aleaciones $\alpha+\beta$ o β , según los niveles de Fe que presente la aleación.

A lo largo de los años se ha experimentado con el uso del hierro en este tipo de aleaciones observando que, a partir de ciertas concentraciones en peso de Fe, se empiezan a formar compuestos intermetálicos en la aleación provocando un aumento de su fragilidad. Esto se puede ver en el diagrama de fases expuesto en la siguiente figura.

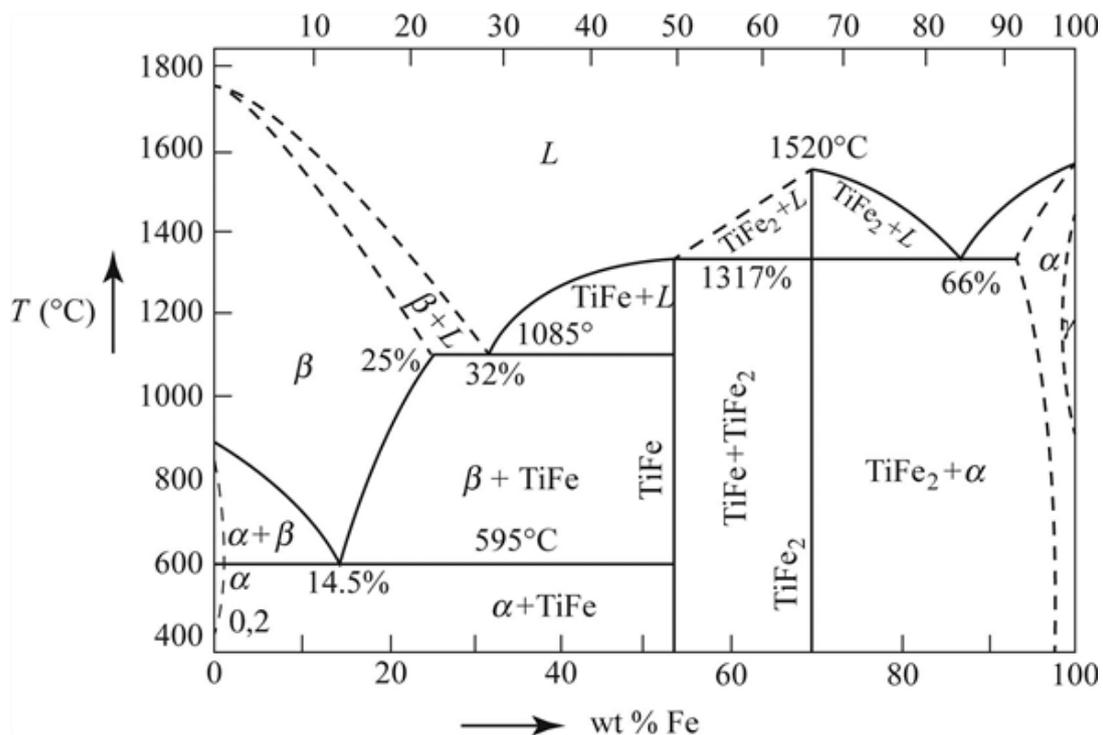


Figura 6: Diagrama de fases de la aleación Ti-Fe. (Askeland, 2010)

A pesar de esto, el Fe sigue siendo un elemento muy interesante ya que estabiliza la fase β del titanio (BCC) y es mucho más barato que los estabilizadores β empleados convencionalmente (vanadio, tántalo y niobio).

Se han hecho intentos y se pueden encontrar algunas aleaciones forjadas comerciales que contemplan el hierro en su composición química, como es el caso de TIMETAL LCB (Low Cost Beta, Ti-6,8Mo-4,5Fe-1,5Al) y la aleación Ti-5Al-2,5Fe que se creó para aplicaciones biomédicas.

En la tabla 5 podemos observar algunas de las aleaciones comerciales Ti-Fe y sus propiedades.

Tabla 5: Aleaciones comerciales Ti-Fe. (García, 2009)

Aleación	Composición	Estado	Resistencia [MPa]	Deformación [%]
RMI Low-cost alloy	Ti-6.4Al-1.2Fe	Recocido	965	20
TIMETAL-62S	Ti-6Al-1.7Fe-0.1Si	Recocido	895	10
		STM	1055	-
Tikrutan LT35	Ti-5Al-2.5Fe	Recocido	780	8
		STM	955	14
TIMETAL LCB	Ti-1.5Al-5.5Fe-6.8Mo	ST	1020	13
		STM	1296	6

* STM= solubilización+temple+ maduración, ST=solubilización+temple

3.10. Ti-In

A contrario del hierro, el indio es un elemento α -estabilizante y de baja temperatura de fusión, 156,6 °C, que comparándola con la del titanio, 1668 °C, genera interés en mezclar estos dos tipos de elementos con el fin de observar el comportamiento entre dos compuestos con temperaturas de fusión tan distintas.

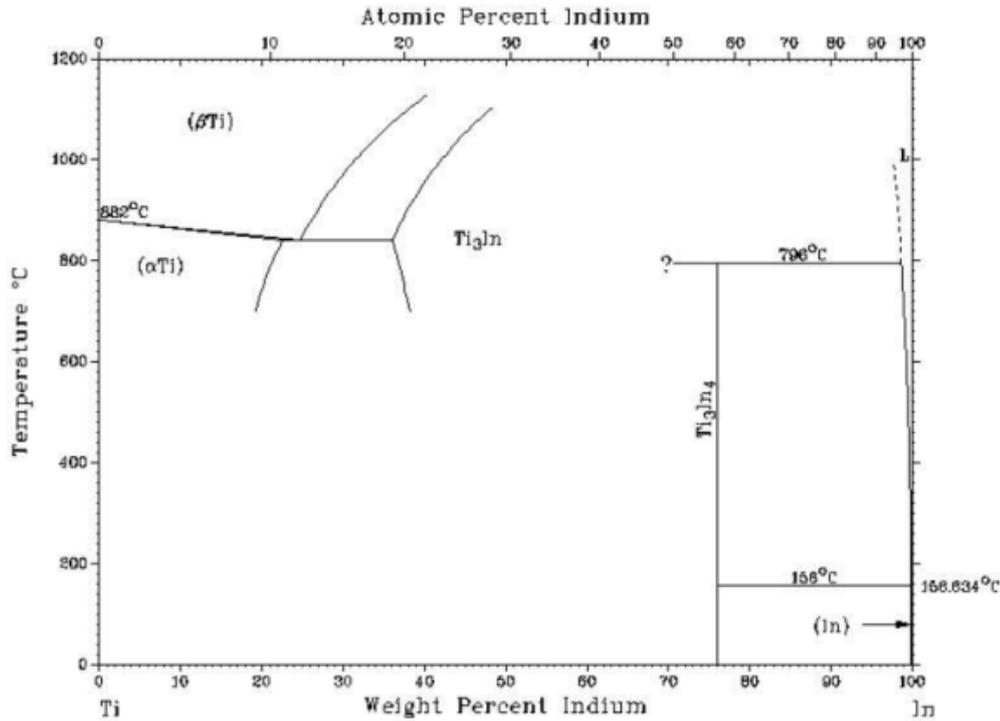


Figura 7: Diagrama de fases de la aleación Ti-In (Aldridge & Downs, 2011).

En el diagrama de fases mostrado en la figura 7 se observa como la mezcla entre estos dos elementos forma una aleación α con una temperatura de transición a fase β situada en los 882 °C. A partir de un 40% en peso de indio se empieza a formar Ti₃In, un compuesto intermetálico.

No se ha experimentado mucho con este tipo de aleación por lo que no se tiene mucha información sobre las propiedades y los posibles usos de estas aleaciones. No obstante, sí que existen estudios donde se descubrió que las aleaciones Ti-In eran biocompatibles. (Han, y otros, 2015)

Se prevé que puede tener un importante uso en la salud dental mejorando el rendimiento de los implantes dentales, sus propiedades mecánicas, su resistencia a la corrosión y su biocompatibilidad.

4. PLANIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

4.1. Preparación de las muestras

En esta fase inicial del proyecto se justifica el interés por el estudio de las aleaciones seleccionadas.

Su objetivo, además del ya mencionado, es preparar las aleaciones para los ensayos próximos enfocados al análisis mecánico y estructural de las muestras.

4.1.1. Selección de las aleaciones

Para el presente estudio se han seleccionado dos materiales aleantes distintos entre sí para observar el comportamiento de éstos al juntarlos con el titanio. Estos dos materiales son el indio y el hierro.

El estudio de las aleaciones con hierro es muy prometedor ya que abarataría mucho el coste de las aleaciones comerciales.

Por otro lado, el indio presenta una temperatura de fusión muy inferior a la del titanio por lo que es interesante comprobar el comportamiento al alearlos.

De cada tipo de aleación se han estudiado tres muestras con concentraciones distintas de cada elemento aleante. Por parte del Ti-In se han seleccionado Ti-2.5In, Ti-5In y Ti-10In. Por el lado del Ti-Fe se han seleccionado Ti-5Fe, Ti-10Fe y Ti-17Fe.

Para obtener estos materiales se les ha sometido a un proceso de colada con atmósfera inerte de argón en un horno. Posteriormente, se han enfriado rápidamente para conseguir en el caso de las aleaciones con hierro la estabilización de la fase β . Si no hubiéramos hecho esto y hubiéramos realizado un enfriamiento muy lento las tres aleaciones presentarían solo fase α e intermetálico TiFe que se hubiera acumulado en los bordes de grano.

La colada es un proceso muy interesante en el titanio y sus aleaciones ya que permite modelar las propiedades y características de los compuestos según la aplicación específica que vaya a tener. Además, abarata los costes de producción y facilita, aumentando así, la fabricación de las piezas. En la siguiente tabla se muestran las propiedades de algunas aleaciones de titanio coladas.

Tabla 6: Propiedades mecánicas típicas de las aleaciones de titanio coladas (Leyens & Peters, 2003).

Aleación	UTS (Mpa)	YS (Mpa)	%El	max. T (°C)
cp-Ti (DIN 17865)	350	280	15	350
Ti-64 (EN 3352)	880	815	5	350
Ti-6242 (WL 3.7141)	860	760	6	450
TIMETAL 834	1020	900	4	600
Y TiAl	500-600	400-500	1-2	800

4.1.2. Embutición de los materiales

Tras escoger los materiales a tratar, hay que extraer una muestra de cada pieza. Esto se realizará mediante una cortadora de precisión para que el corte sea lo más limpio posible. Una vez obtenidas las muestras se les ha de realizar unas muescas con el fin de que el posterior embutido sea más eficiente.

Para que el posterior análisis microscópico sea lo más revelador posible la superficie a analizar debe estar pulida y presentar el mínimo de impurezas posible. Es por ello, que para tratar nuestras muestras se embuten en una resina para posteriormente iniciar un proceso de lijado de 4 fases, cambiando progresivamente a lijas más finas reduciendo el desbaste.

A esta etapa le sigue dos etapas de pulido, la primera con pasta de diamante y la segunda con una suspensión OP-S. Al finalizar se someterán las muestras durante 15 minutos a un baño de ultrasonidos.

Una vez finalizado este proceso tendremos nuestras muestras preparadas para analizarlas microscópicamente.

4.1.3. Densidad de las aleaciones

La densidad es una magnitud física que nos indica la relación entre la masa de un material y el volumen que ocupa.

El objetivo de esta fase es analizar como varía la densidad de la aleación según la concentración y el tipo de elemento aleante escogido. Esto dependerá de la densidad de la aleación, si es superior o inferior a la del titanio.

4.2. Caracterización mecánica de las aleaciones

En esta fase experimental se busca recoger las diferentes propiedades mecánicas de las aleaciones estudiadas y el consecuente estudio de la influencia de los elementos aleantes Fe e In en el titanio. Para cumplir este objetivo se realizarán los siguientes ensayos:

- Ensayo de dureza
- Ensayo de micropunzonado

4.2.1. Ensayo de microdureza

La dureza de un material es una propiedad mecánica que nos indica la resistencia a la deformación plástica localizada inducida por indentación mecánica de éste.

Para éste se ha escogido el ensayo Vickers, ya que el tamaño de las muestras de las aleaciones es bastante limitado. En este ensayo utilizaremos una punta piramidal de diamante para realizar muescas sobre la parte central de la superficie de cada una de nuestras muestras. A cada una de las muestras se le aplicará una fuerza de 2942 N equivalente a un HV0,3.

Conocer la dureza de un material es de gran importancia ya que nos es de gran ayuda para decidir si un material es adecuado o no para una aplicación.

4.2.2. Ensayo de micropunzonado

Uno de los ensayos más prometedores hoy en día es el de micropunzonado, llamado SPT (Small Punch Test). Este ensayo es de gran relevancia ya que otros requieren de piezas de gran tamaño lo que conlleva elevados tiempos de fabricación y mucho gasto de material para realizar los ensayos. Este tipo de ensayo no solo optimiza el tiempo si no también el material y los recursos empleados.

Además, para nuestras aleaciones estudiadas es de gran interés conocer el comportamiento mecánico de piezas pequeñas ya que refleja su presencia en alguna de sus aplicaciones como es el caso de las prótesis bucodentales.

En este ensayo se usarán tres láminas de unos 0,5 mm de espesor de cada una de las aleaciones con el fin de obtener muchas propiedades mecánicas relevantes de cada una de ellas como la ductilidad, fragilidad, comportamiento a tracción y el límite elástico.

Durante el experimento se registrará de forma continua la carga frente al desplazamiento experimentado por el punzón hasta el punto de fractura,

4.3. Caracterización microestructural de las aleaciones

El objetivo de esta fase es el análisis microestructural de cada una de las muestras de las aleaciones seleccionadas. En esta se observará la influencia que tiene el tipo de elemento aleante utilizado y su concentración. Como mencionamos anteriormente el Fe es un elemento β -estabilizante y el In es α -estabilizante.

Para observar las diversas distribuciones de fases de las aleaciones se ha procedido a los siguientes análisis:

- Análisis mediante microscopía óptica
- Análisis mediante microscopía electrónica de barrido
- Análisis mediante difracción de rayos X

4.3.1. Análisis mediante microscopía óptica

La previa preparación de las muestras donde se embutía el material, se desbastaba y se pulía para finalizar con un baño de ultrasonidos tiene una finalidad importante a la hora de la observación microscópica. Si no se realiza correctamente esta previa preparación nos encontraremos bastantes rayas y manchas negras debidas a gotas de agua o a la porosidad del material.

En esta fase se observa cada una de las muestras a 50x y 100x y se realizan algunas fotos de zonas de las muestras con menos impurezas, que sean interesantes para posteriormente poder sacar conclusiones de la influencia de los materiales aleantes.

Se trata de un primer análisis superficial para ver que las muestras están correctamente desbastadas y presentan el mínimo número de impurezas para continuar con el posterior análisis en el microscopio electrónico.

4.3.2. Análisis mediante microscopía electrónica de barrido

El objetivo de este análisis es realizar un estudio más profundo sobre la microestructura de las aleaciones.

No solo se observará a grandes aumentos las aleaciones si no que obtendremos valores de concentraciones de los elementos y de las fases.

Para ello se utilizarán herramientas de análisis como el análisis puntual, el análisis de línea y los mapas analíticos en zonas que puedan ser de interés. Además, se realizarán fotografías a distintas escalas 50x, 250x, 500x y 1000x en zonas donde se aprecie información de interés para poder extraer conclusiones.

Para ello usaremos las imágenes de electrones retrodispersados, BSE (Backscattered-Electron) un método de detección de electrones retrodispersados. Existen más métodos como el SE (Secondary Electrons) que a diferencia del BSE capta a los electrones más superficiales por lo que su uso es más adecuado para obtener la topografía de los materiales.

4.3.3. Análisis mediante difracción de rayos X

Mediante este ensayo se analizará cada una de las muestras con el fin de obtener datos sobre el ángulo de difracción de cada una de las aleaciones, que serán de gran relevancia e interés a la hora de extraer conclusiones.

Para ello las muestras se someterán a tecnología de difracción de rayos X.

Tras ello obtendremos los difractogramas de cada una de las muestras que nos mostrará los indicadores anteriormente mencionados.

5. MÉTODOS E INSTRUMENTOS UTILIZADOS

5.1. Preparación de las muestras

Tras la justificación de la selección de las aleaciones se procede a la preparación de las muestras para los posteriores ensayos. Para ello se ha seguido una serie de procesos y medidas para limpiar las muestras y obtener la densidad de cada una de ellas.

5.1.1. Embutición de los materiales

Para obtener las muestras de cada una de las aleaciones se usó una cortadora de precisión modelo Accutom-10 del fabricante Struers.



Figura 8: Cortadora de precisión Accutom-10. (Metalinspec)

Una vez obtenidas nuestras muestras se procede a embutirlas en una resina conductora. Para ello se ha usado una prensa de embutición modelo CitoPress-1 del fabricante Struers. Previamente a introducir la muestra junto a la resina se debe lubricar la máquina con estearato de zinc para mejorar su funcionamiento.



Figura 9: Prensa de embutición CitoPress-1. (Metalinspec)

Tras esto, iniciaremos el proceso de desbaste en el que iremos pasando cada una de las muestras por lijas, reduciendo el espesor de estas progresivamente, con el fin de ir eliminando las rayas. Estas lijas serán de las siguientes granulometrías: 240, 500, 1000 y 2500. Entre cada lija habrá que girar 90° la muestra respecto al anterior lijado. En este proceso se usa una lijadora LaboPol-25 del fabricante Struers y se aplicará agua como lubricante.

Posteriormente, se inicia el proceso de pulido donde se empieza por un primer paño al que se le aplicará una pasta de diamante y se abrirá un conducto que vaya aplicando gotas de aceite poco a poco para esparcir bien la pasta por el paño. Este proceso durará hasta que a vista de microscopio óptico no se aprecien prácticamente rayas.

Continuaremos con el pulido final donde se le tendrá que aplicar durante todo el proceso una mezcla de silicio líquido con agua oxigenada, una suspensión OP-S. Esto durará unos 15 minutos a una frecuencia de 350 rpm. Este paso y el previo se realizarán en una pulidora modelo LaboPol-5 del fabricante Struers.



Figura 10: Pulidora LaboPol-5 y dosificador LaboDoser. (Budapest University of Technology and Economics)

A continuación, se procede con el baño de ultrasonidos. Esto consiste en sumergir las muestras en unos vasos con etanol para eliminar las gotas de agua y someterlos a ultrasonidos durante 15 minutos. Esto se realizará en una máquina de ultrasonidos modelo Elmasonic S 30 H del fabricante ELMA. Al finalizar y al extraer las muestras del vaso hay que secarlas inmediatamente con una fuente de aire para que no se formen manchas en las piezas, imperceptibles para el ojo humano pero visibles en el microscopio óptico.



Figura 11: Máquina ultrasonidos Elmasonic S 30 H. (Body Cult)

Una vez secas, nuestras muestras estarán preparadas para los consecuentes análisis microestructurales.

5.1.2. Densidad de las aleaciones

Debido a que partimos de materiales ya formados con morfologías complejas de medir el modo empleado para determinar la densidad de nuestras muestras se ha resume en un principio tan básico como es el de Arquímedes.

Ecuación 1: Principio de Arquímedes

$$E = V_s * g * \rho_f$$

Donde V_s es el volumen del sólido sumergido y ρ_f es la densidad del fluido donde se sumerge.

Realizando algunas modificaciones en la fórmula y moviendo operadores obtenemos la siguiente fórmula.

Ecuación 2: modificación de principio de Arquímedes

$$\rho_s = \frac{\rho_f * m_d}{(m_d - m_w)}$$

Así obtenemos la densidad de cada una de nuestras aleaciones empleadas mediante la densidad del fluido en el que se sumerge, la masa del material en seco (m_d) y la masa del material sumergido en agua (m_w).

Para obtener las masas de cada una de las aleaciones se ha utilizado una balanza Kern modelo ABJ-NM/ABS-N de 0,1 mg de precisión.



Figura 12: Balanza Kern usada para el cálculo de densidades. (Scales Measuring Instruments)

5.2. Caracterización mecánica de las aleaciones

5.2.1. Ensayo de dureza

El presente ensayo se realizará en un durómetro modelo HMV-2T del fabricante Shimadzu. Se usará una punta piramidal de diamante que aplicará a las muestras una dureza Vickers HV de 0,3 equivalente a 2942 N. Cada una de las medidas durará 12 segundos.



Figura 13: Durómetro HMV-2T usado para el ensayo de dureza Vickers. (Pinterest)

La fuerza aplicada sobre las muestras se puede extraer a través de la siguiente fórmula.

Ecuación 3: Cálculo de dureza Vickers

$$HV \approx \frac{1,8544 * F}{d^2}$$

F corresponde a la fuerza aplicada sobre la pirámide penetradora y d a la media de las diagonales de las huellas.

Este ensayo se realizará 10 veces en cada muestra con el fin de obtener un resultado lo más exacto posible.

5.2.2. Ensayo de micropunzonado

Mediante una cortadora de precisión se han obtenido tres láminas de unos 0,5 mm de espesor de cada una de las aleaciones.

Posteriormente se ha usado una máquina de prueba universal del fabricante Shimadzu para realizar los ensayos de micropunzonado.



Figura 14: Máquina de prueba universal modelo AG-X plus de Shimadzu. (Nicol scales)

Para realizar estos ensayos hay que indicar el espesor exacto de la muestra que se va a ensayar en el ordenador. Posteriormente se introduce la muestra, posteriormente se ajusta la altura del punzón de forma manual y luego se inicia la prueba donde la máquina aplicará

fuerza a la muestra hasta que lo paremos de forma manual debido a que la fuerza está cayendo o a que se pare de forma automática debido a una fractura de la muestra.

A lo largo del gráfico se irán formando dientes de sierra debido al agrietamiento del material y se observará la influencia del espesor de la muestra en el ensayo al igual que la concentración de cada uno de los elementos aleantes.

Posteriormente se han observado estas muestras en un microscopio estereoscópico modelo M125 del fabricante Leica. La finalidad es intentar observar un poco el agrietamiento de nuestras muestras dándonos información sobre su naturaleza dúctil o frágil.

5.3. Caracterización microestructural de las aleaciones

5.3.1. Análisis mediante microscopía óptica

En el siguiente análisis se ha procedido a la visualización mediante microscopía óptica de cada una de las muestras. Para ello se utilizó un microscopio óptico del fabricante NIKON, modelo Eclipse LV100.

Se han hecho diversas fotografías de cada una de las muestras a dos aumentos distintos, 50x y 100x, en zonas donde se aprecie información de interés.

5.3.2. Análisis mediante microscopía electrónica de barrido

Para este análisis se ha utilizado un microscopio electrónico de barrido SEM modelo Ultra 55 del fabricante Zeiss.



Figura 15: Microscopio electrónico de barrido modelo Ultra 55. (Universitat Politècnica de València)

El método usado para observar los materiales ha sido el BSE (Backscattered electrons). El funcionamiento de este detector consiste en la captación de los electrones retrodispersados que surgen de la muestra. Estos electrones retrodispersados producirán una determinada cifra de pares electrón-hueco según la energía que contengan. Estos detectores contienen una unión p-n que está unida a dos electrodos, uno atrae a los electrones y otro a los huecos, de esta forma se produce una corriente eléctrica que depende también de la cantidad de electrones retrodispersados absorbidos.

Se ha escogido este detector y no otro ya que es muy útil para conocer la distribución de los distintos elementos en la superficie de la muestra ya que es muy sensible a los cambios en los números atómicos.

5.3.3. Análisis mediante difracción de rayos X

Para el análisis DRX se ha usado un difractómetro de sobremesa modelo D2 PHASER del fabricante BRUKER.

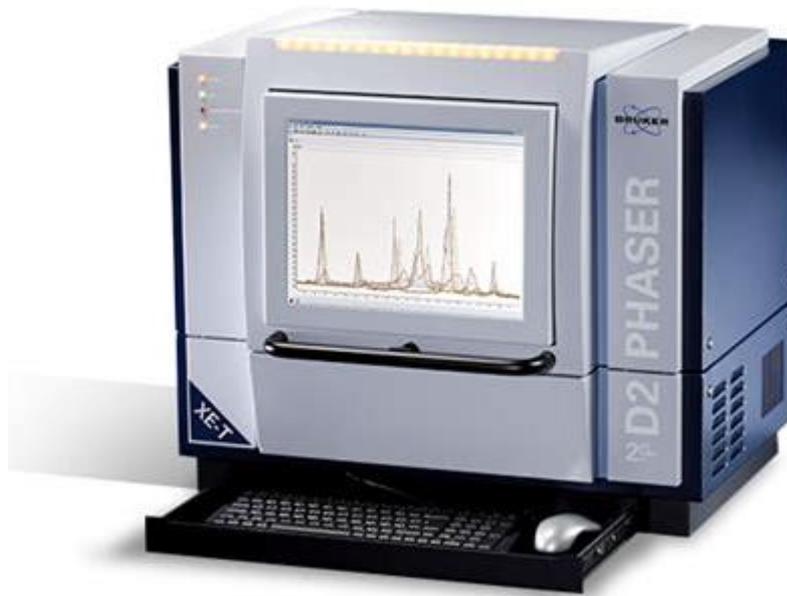


Figura 16: Difractómetro de sobremesa modelo D2 PHASER. (Azo Materials)

Introducimos cada una de las muestras en el difractómetro, barriendo entre 20 y 90°, con un paso de 0,02°. De ese modo podrá aplicarse el método de Rietveld para la determinación cuantitativa de las fases si fuera necesario.

6. RESULTADOS

6.1. Preparación de las muestras

6.1.1. Densidad de las aleaciones

Tras determinar ambas masas de cada una de las aleaciones con la balanza Kern se ha procedido a trasladar los datos a una hoja de cálculo donde realizando los debidos cálculos se ha llegado a los siguientes resultados representados en la tabla 7.

Tabla 7: Densidad de cada una de las aleaciones estudiadas.

	ρ_f (Kg/m ³)	m_d (g)	m_w (g)	$m_d - m_w$	ρ_s (Kg/m ³)
Ti-2.5In	1000	6,3321	4,9526	1,3795	4590,14136
Ti-5In	1000	9,6998	7,5885	2,1113	4594,23104
Ti-10In	1000	9,2597	7,3637	1,896	4883,80802
Ti-5Fe	1000	11,705	9,0975	2,6075	4488,97411
Ti-10Fe	1000	6,9925	5,5271	1,4654	4771,73468
Ti-17Fe	1000	8,1261	6,478	1,6481	4930,58674

Conociendo que la densidad del titanio es de 4510 kg/m³, la del indio es 7310 kg/m³, la del hierro es 7870 kg/m³ y los datos anteriores podemos razonar porque la densidad de la aleación va incrementándose a medida que se va aumentando la concentración en peso del elemento aleante.

6.2. Caracterización mecánica de las aleaciones

Una vez realizados los diversos ensayos para obtener las propiedades mecánicas, se ha llegado a los resultados representados en los siguientes apartados.

6.2.1. Ensayo de microdureza

Tras realizar las medidas con el durómetro se recogieron diez cifras de cada una de las aleaciones.

Tabla 8: Datos de microdureza recogidos de cada aleación.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ti-2.5In	361	368	368	369	442	364	386	419	428	371
Ti-5In	368	373	369	400	339	330	366	393	382	377
Ti-10In	378	386	404	425	392	373	469	371	417	392
Ti-5Fe	476	435	461	466	490	501	442	423	466	466
Ti-10Fe	451	439	449	444	469	449	516	427	420	469
Ti-17Fe	507	499	513	469	487	521	522	501	479	525

La tabla 8 en sí no aporta mucha información por lo que debemos calcular la media y la desviación típica. Tras realizar los cálculos mencionados la tabla se quedaría así.

Tabla 9: Media y desviación típica del ensayo de microdureza.

	media	σ
Ti-2.5In	386,58	30,25
Ti-5In	369,12	21,63
Ti-10In	399,74	29,93
Ti-5Fe	462,04	24,03
Ti-10Fe	452,60	26,99
Ti-17Fe	501,97	19,11

En la tabla 9 podemos observar la media de los datos de microdureza en HV de cada una de las aleaciones ensayadas. En algunas muestras existe una desviación típica bastante notoria por lo que habría que contemplar la existencia de algún dato anómalo y su consecuente eliminación para calcular la media.

6.2.2. Ensayo de micropunzonado

Se han obtenido tres curvas distintas de cada material. En estas curvas se ve reflejada la ductilidad del material. Para analizarlas y discutir los resultados procederemos a mostrarlas empezando por las que contienen indio, de menor a mayor concentración, indicando el espesor de cada una de las muestras ya que éste es un factor importante a la hora de entender nuestros resultados.

Haciendo una comparativa entre los gráficos extraídos se puede concluir la influencia de los elementos aleantes en las propiedades mecánicas. En la imagen siguiente se muestra una comparativa entre dos de las aleaciones Ti-Fe.

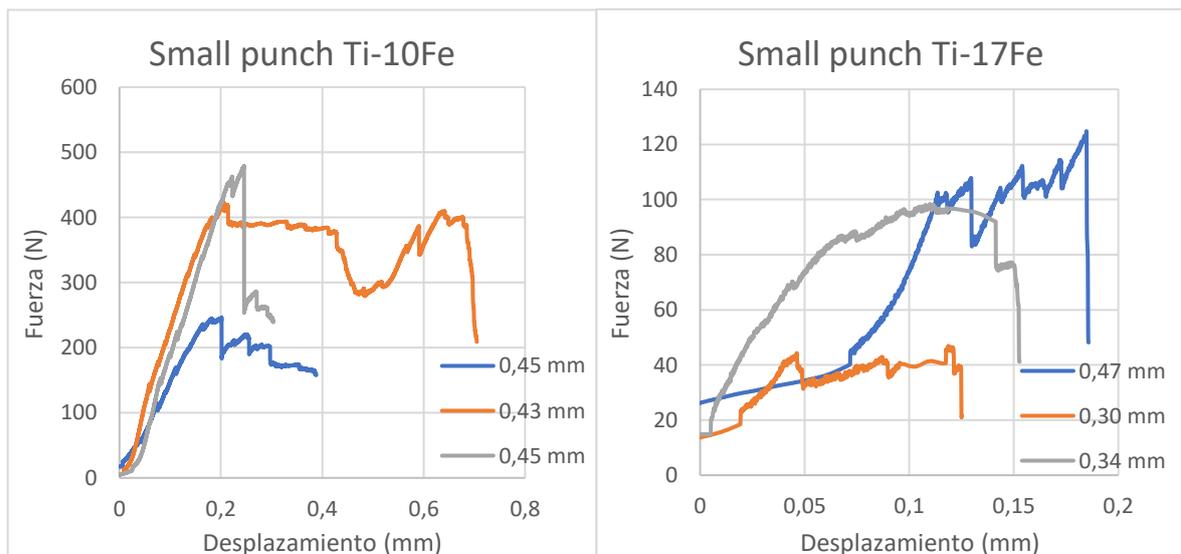


Figura 17: Resultados del ensayo Small punch de Ti-10Fe y Ti-17Fe.

En las gráficas anteriores se puede observar que la concentración de hierro hace que la aleación aguante menos carga. Esto se entiende observando el diagrama de fases de la aleación Ti-Fe.

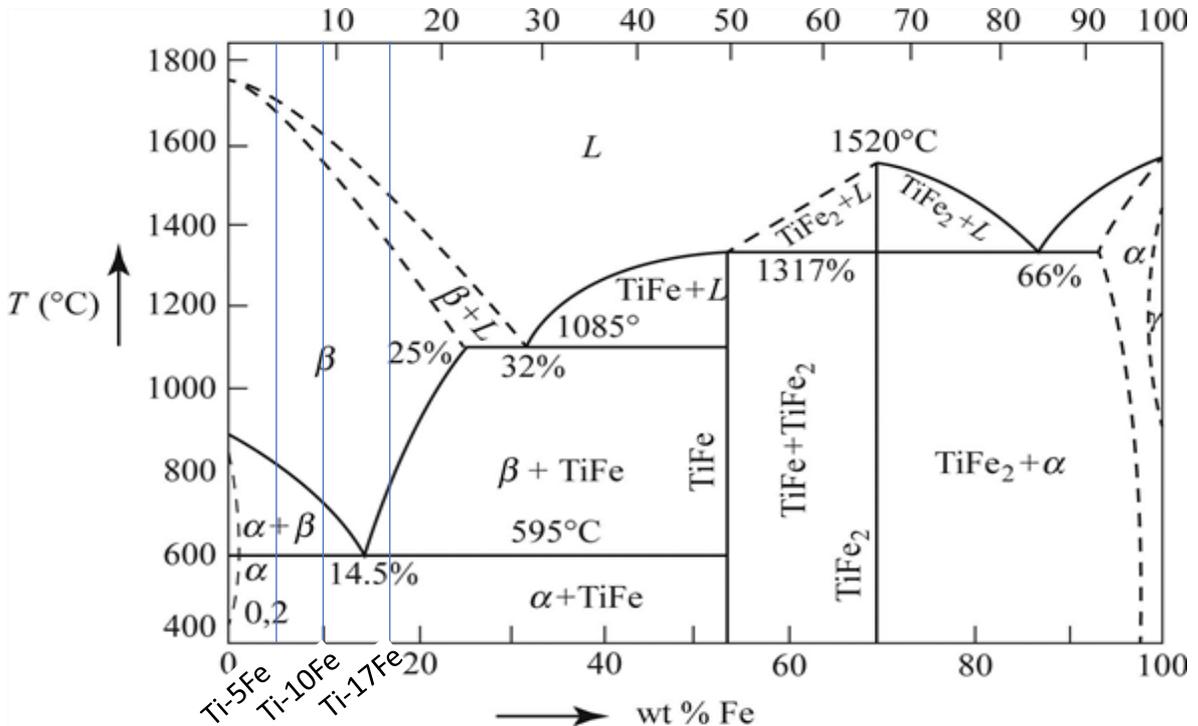


Figura 18: Diagrama de fases de la aleación Ti-Fe. (modificado de Askeland, 2010)

En estudios realizados, se ha observado que las condiciones óptimas de concentración en hierro que maximizan las propiedades del titanio están en torno al 5 y el 7%. Si se aumenta más la concentración de éste se empiezan a formar compuestos intermetálicos que incrementan drásticamente la fragilidad de éstos. Es por ello por lo que la carga soportada por el Ti-17Fe es menor. (Bolzoni, Ruiz-Navas, & Gordo, 2016)

Esto a su vez significa que la concentración de hierro influye en el límite elástico de la aleación, disminuyéndola a medida que va aumentando.

El pie que se observa en alguna de las gráficas es debido a que al iniciar el ensayo el punzón estaba situado a bastante distancia de la bola y ha tenido que desplazarse hasta el contacto.

Por otro lado, en las aleaciones de Ti-In obtuvimos resultados distintos como se muestra a continuación.

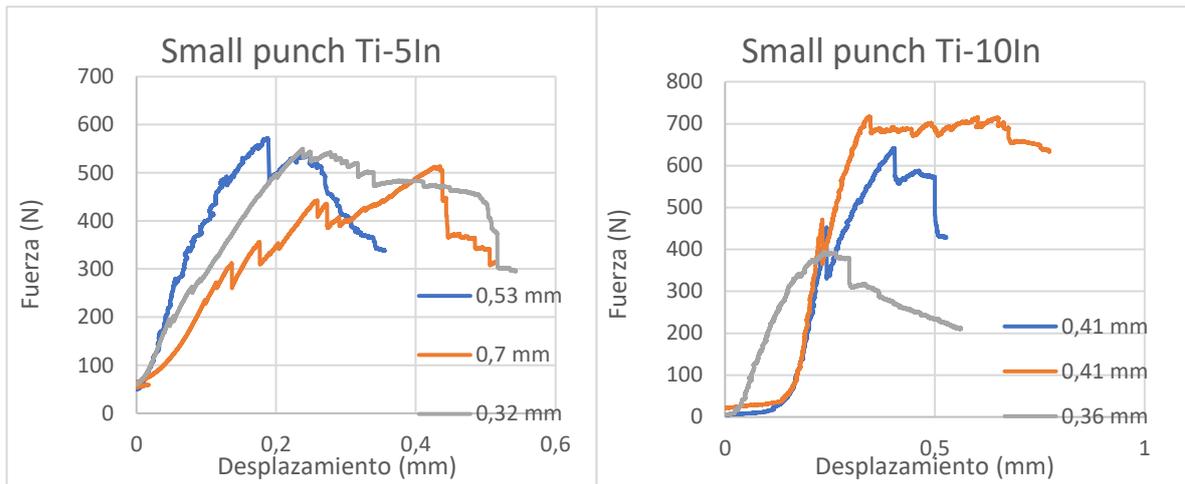


Figura 19: Resultados del ensayo Small punch de Ti-5In y Ti-10In.

En este caso el indio sí que mejora la resistencia a la fractura del material, a medida que aumenta su concentración observamos como la carga soportada por la aleación es superior.

Se puede concluir que el indio incrementa el límite elástico de la aleación.

A continuación, se observaron las fracturas mediante microscopio donde se ve claramente la naturaleza frágil o dúctil de las aleaciones.



Figura 20: Fractura del Ti-10Fe tras el ensayo de Small punch.

En la imagen anterior se puede observar una fractura bastante explosiva, no sigue un patrón en concreto, esto es debido a la fragilidad de la aleación que en vez de ir deformándose progresivamente va reteniendo energía hasta que se produce la fractura.



Figura 21: Fractura del Ti-5Fe tras el ensayo de Small punch.

En esta muestra con menos cantidad de hierro se ve que la fractura está más controlada y se aprecia una grieta principal de la cual se van generando otras como la señalada que sigue el sentido del corte.

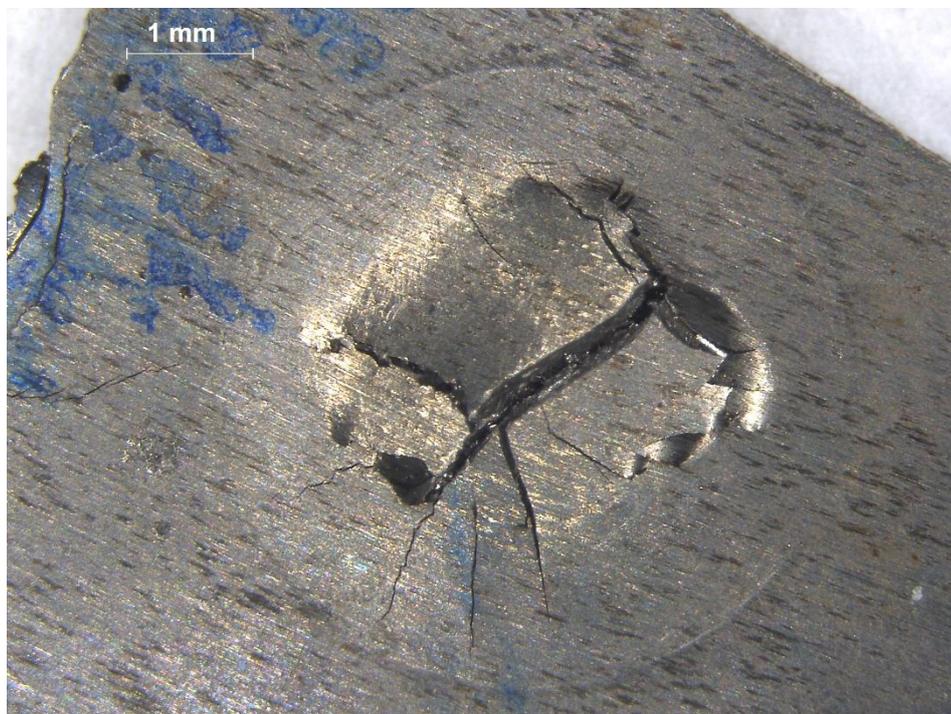


Figura 22: Fractura del Ti-10In tras el ensayo de Small punch.

En esta imagen se observa una de las muestras de Ti-10In ensayadas. Se puede observar una gran grieta principal distinta a las observadas en las muestras de Ti-Fe, esta se ha ido creando lentamente debido al carácter dúctil del material.

Los dientes de sierra que se observan en las gráficas se deben al origen de grietas, los correspondientes a las aleaciones Ti-Fe son más llamativos debido a que las grietas que se generan liberan mucha más energía que las de Ti-In que como se puede apreciar el proceso hasta la fractura es más constante y duradero.

6.3. Caracterización microestructural de las aleaciones

6.3.1. Caracterización mediante microscopía óptica

Algunas de las imágenes obtenidas en esta observación de nuestras aleaciones son las posteriormente mostradas.



Figura 23: Montaje a 50x de la muestra Ti-2.5In.



Figura 24: Montaje a 50x de la muestra Ti-5In.

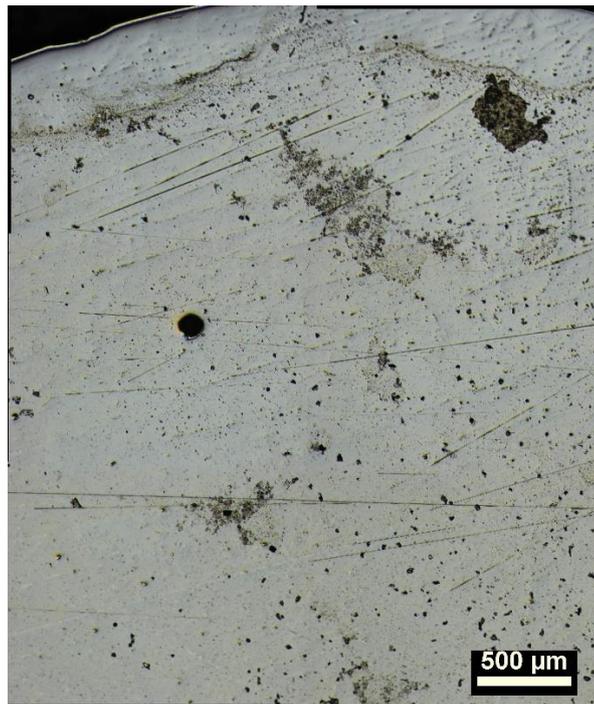


Figura 25: Montaje a 50x de la muestra Ti-10In.

De las anteriores figuras se concluye que el indio no afecta en la formación de fase beta como era de esperar ya que se trata de un elemento α -estabilizante. Además, a medida que la concentración del elemento aleante aumenta se observa una leve disminución de la porosidad de la muestra, representada como manchas negras en las figuras.

Además de esto podemos apreciar el porqué de la importancia de realizar un buen proceso de desbaste en nuestras muestras. Como podemos observar en la figura 23 y 25 existen varias rayas que dificultan la extracción de datos, estas rayas nos perjudicarán aún más en la observación en el microscopio electrónico de barrido.

En las posteriores figuras se muestran las fotografías tomadas a las aleaciones estudiadas con contenido en hierro.

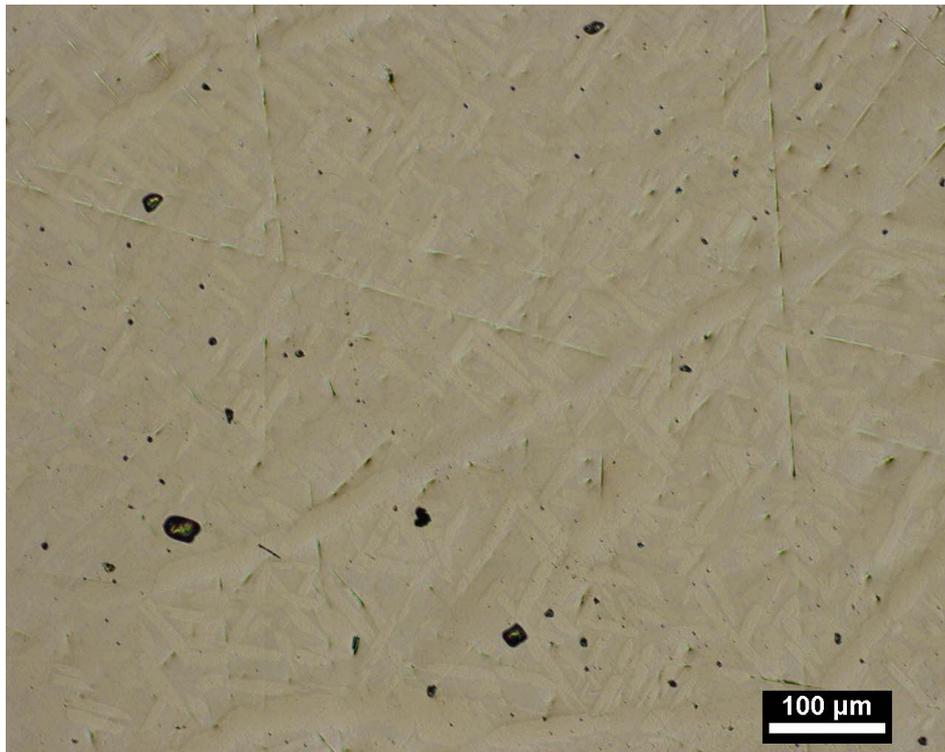


Figura 26: Muestra de Ti-5Fe a 100x.

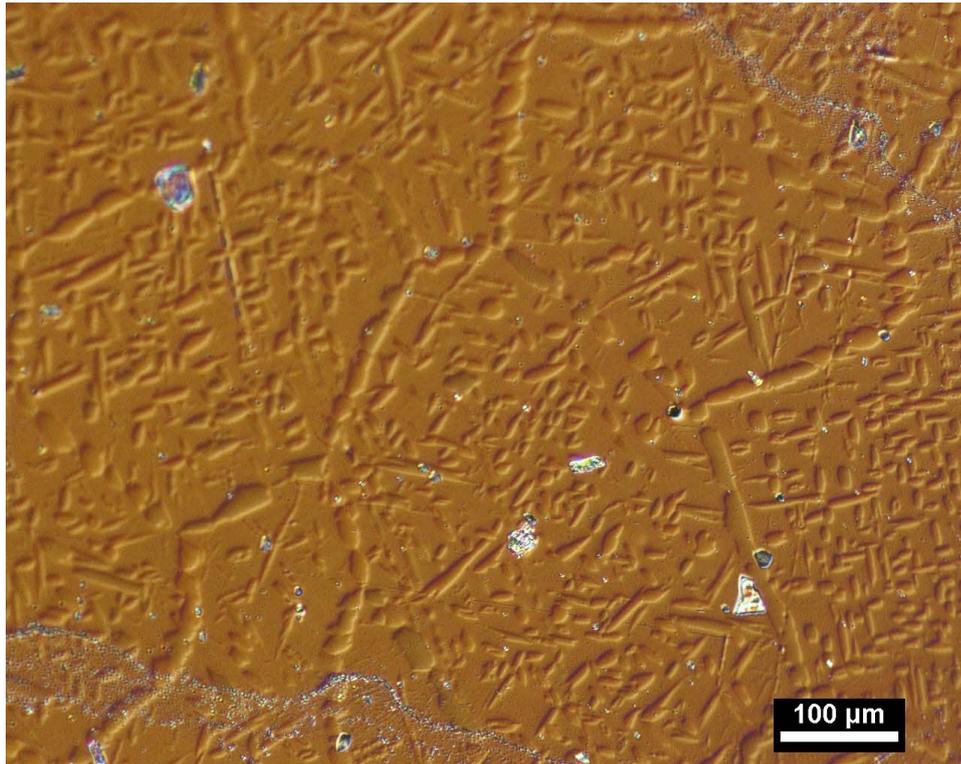


Figura 27: Muestra de Ti-10Fe a 100x.

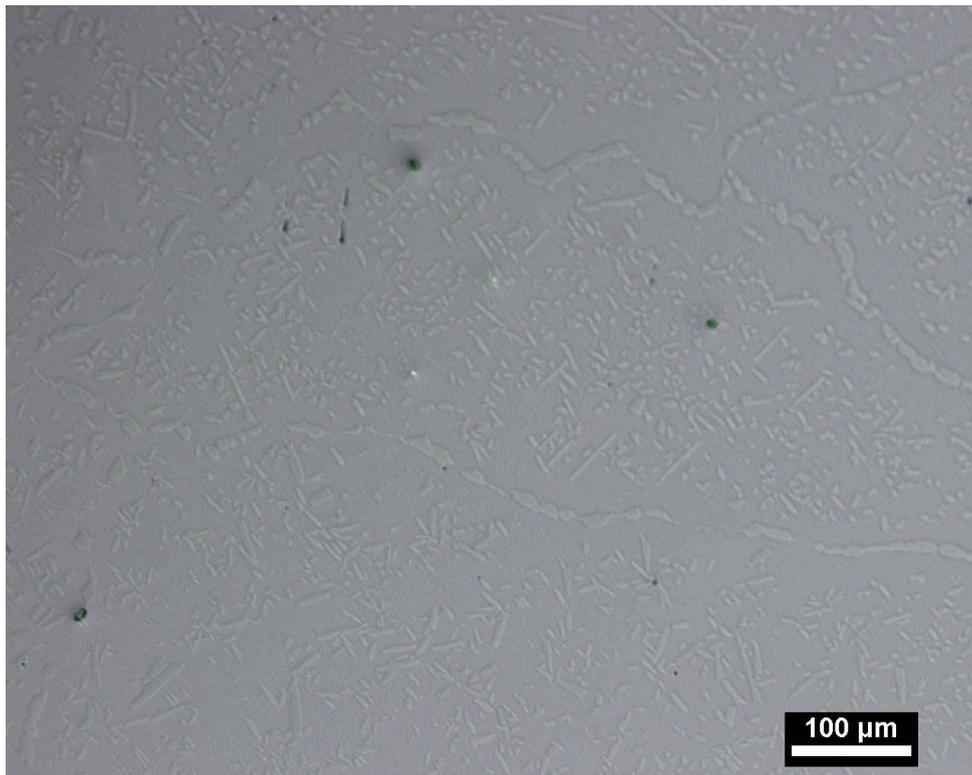


Figura 28: Muestra de Ti-17Fe a 100x.

Como se puede observar, se diferencia a simple vista la presencia de dos fases diferenciadas, la fase alfa y la fase beta. Esto se debe a que, como se ha mencionado previamente, el hierro

se trata de un elemento β -estabilizante. Además, el hierro es β -eutectoide como podemos ver en la figura 18. Concluimos que se está trabajando con dos muestras hipoeutectoides, Ti-5Fe y Ti-10Fe, y una hipereutectoide, Ti-17Fe, en la que se percibe fase beta y elemento intermetálico TiFe.

6.3.2. Caracterización mediante microscopía electrónica de barrido

Una vez se ha observado con microscopio óptico las fases de cada una de nuestras aleaciones se procede a observar las muestras en microscopio electrónico de barrido el cual nos aportará más información sobre la distribución de elementos en cada una de las fases observadas previamente. Además, podremos analizar en mayor detalle zonas específicas usando funcionalidades como el análisis linear, el análisis regional y un mapa de concentraciones.

Se procede a exponer los resultados de la microscopía electrónica según el tipo de aleación. Primero comentaremos los resultados de las distintas aleaciones Ti-In y posteriormente expondremos las Ti-Fe.

Para comenzar vamos a observar los resultados a 50 aumentos de las tres aleaciones distintas de Ti-In.

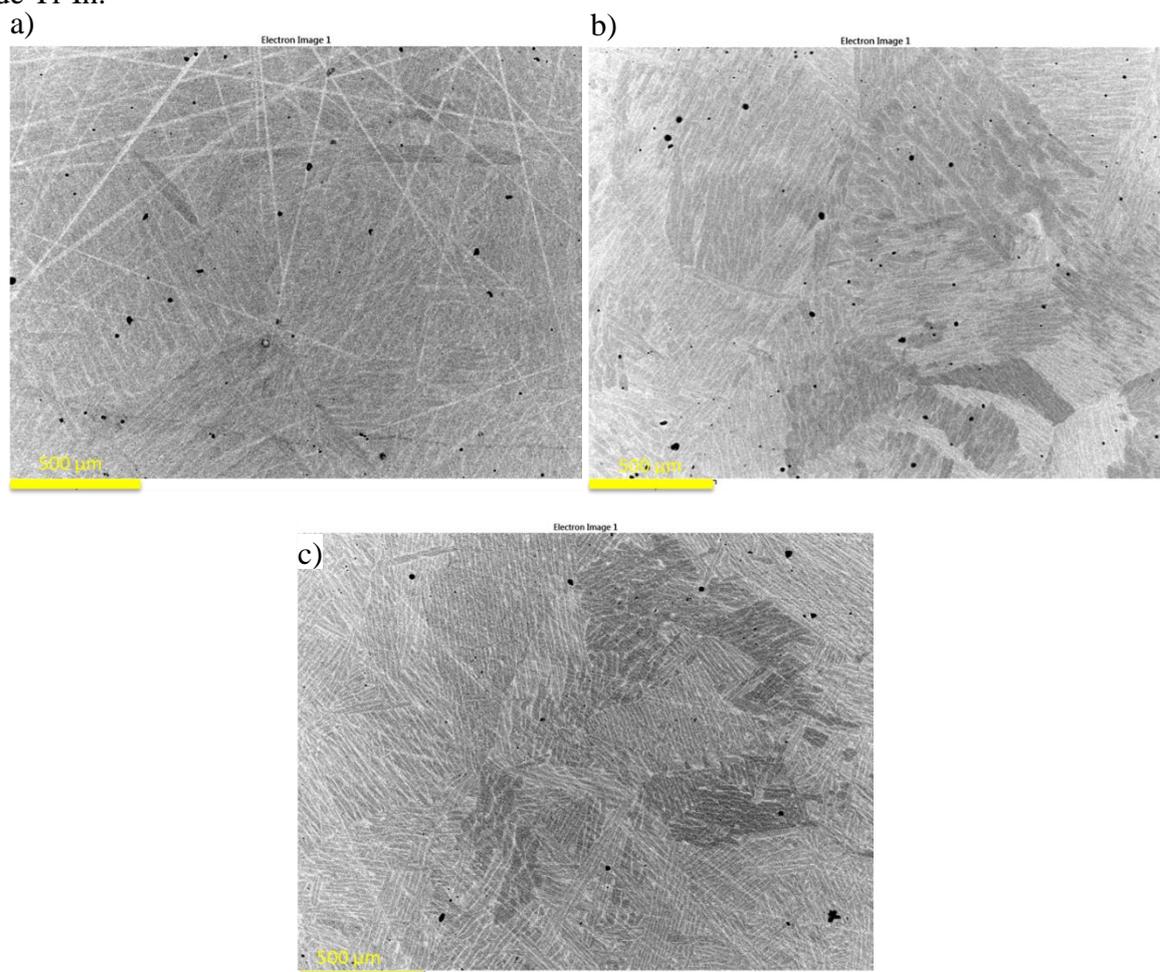


Figura 29: BSE a 50 aumentos de las aleaciones Ti-2.5In (a), Ti-5In (b) y Ti-10In (c).

La poca información que podemos extraer de las anteriores imágenes es que a medida que aumentamos la concentración de indio en nuestra aleación, la porosidad, mostrada con manchas negras, disminuye. Un material con mucha porosidad suele significar que tiene poca resistencia a la corrosión ya que en los poros se forman diferenciales de concentración de oxígeno y por lo general las propiedades mecánicas de este sean bastante limitadas.

Por otro lado, observamos que los granos se muestran representados en una escala de grises, siendo los más oscuros los que presenten elementos con menor peso molecular. Para observar con más detalle la concentración de elementos en cada uno de estos granos se observa a 250 y a 500 aumentos

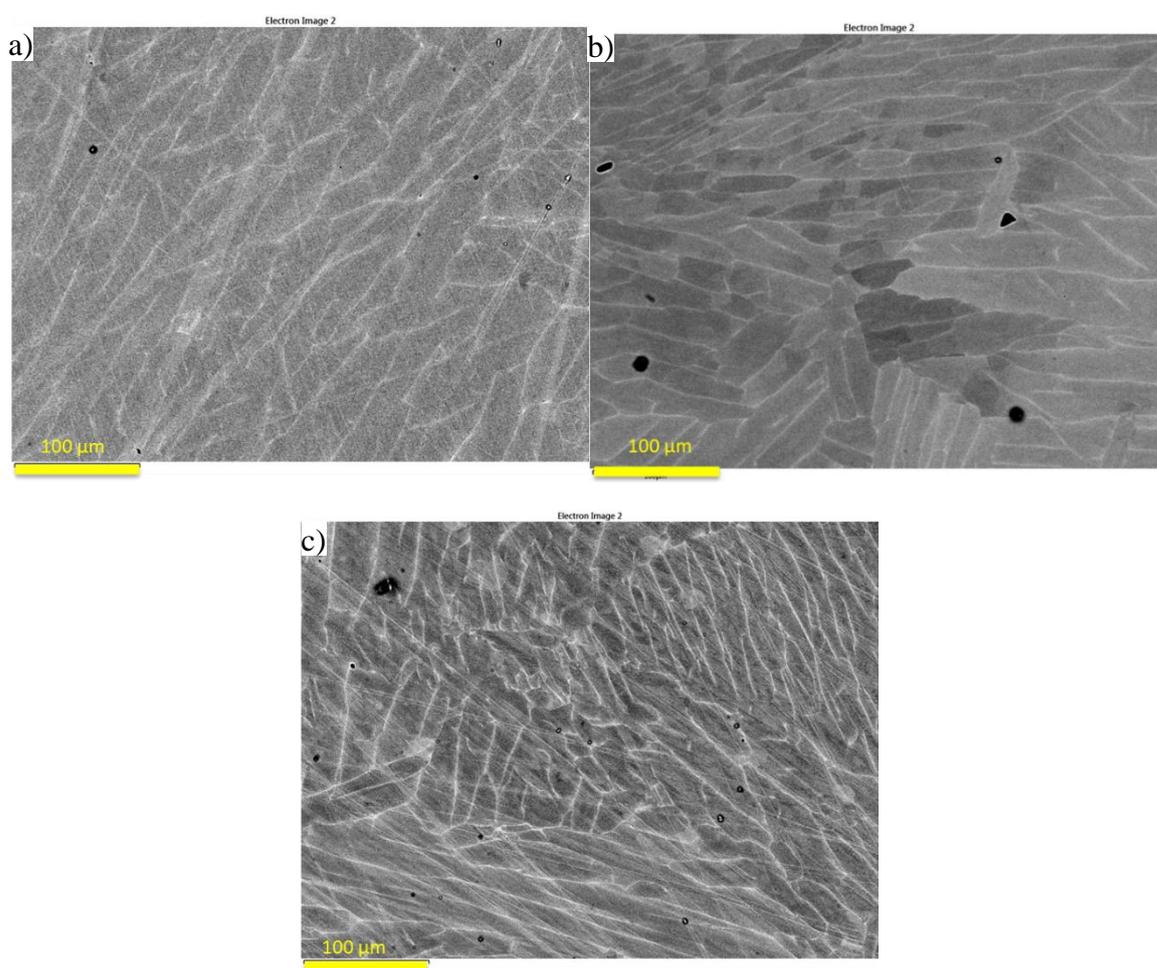
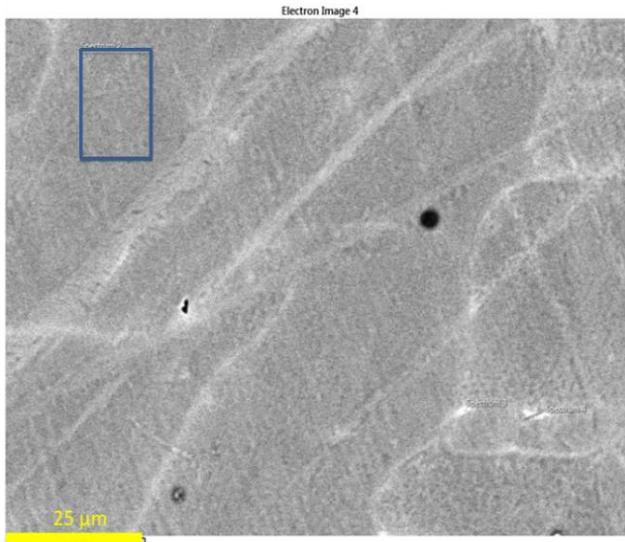


Figura 30: BSE a 250 aumentos de las aleaciones Ti-2.5In (a), Ti-5In (b) y Ti-10In (c).

En estas figuras podemos apreciar otra vez la importancia de realizar un buen proceso de desbaste previo a la observación en microscopio. La muestra de Ti-10In se caracteriza por una gran presencia de rayas lo que hace que sea más difícil percibir los diferentes granos.

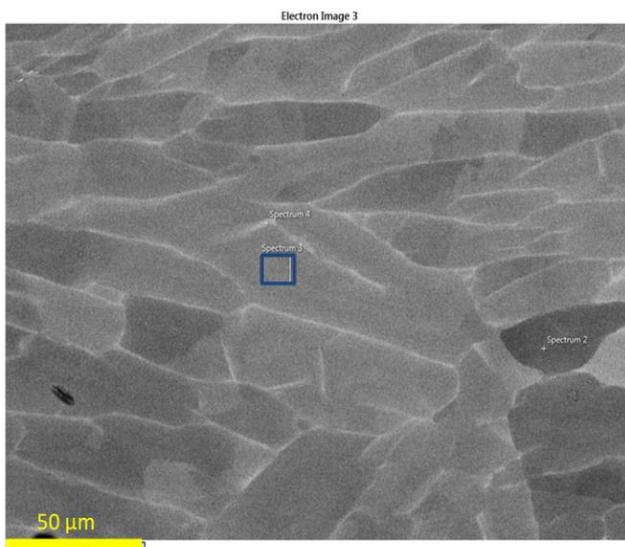
A la hora de usar las funcionalidades mencionadas hemos contemplado nuestras aleaciones Ti-In a 500 y 1000 aumentos. Los resultados obtenidos se ven representados en las siguientes

figuras donde se ha seleccionado zonas concretas de las muestras con la menor cantidad de impurezas posibles con el fin de analizar si la concentración de los elementos de la aleación es equivalente a la teórica.



Spectrum 2		Spectrum 2	
Element	Weight %	Element	Atomic %
Ti	94,4	Ti	88,4
O	3,9	O	11
In	1,7	In	0,7

Figura 31: Porcentaje atómico y en peso de los distintos elementos en la zona marcada. (Ti-2,5In, 1000x)



Spectrum 3		Spectrum 3	
Element	Weight %	Element	Atomic %
Ti	92,7	Ti	88,6
In	3,9	O	9,8
O	3,4	In	1,6

Figura 32: Porcentaje atómico y en peso de los distintos elementos en la zona marcada. (Ti-5In, 500x)

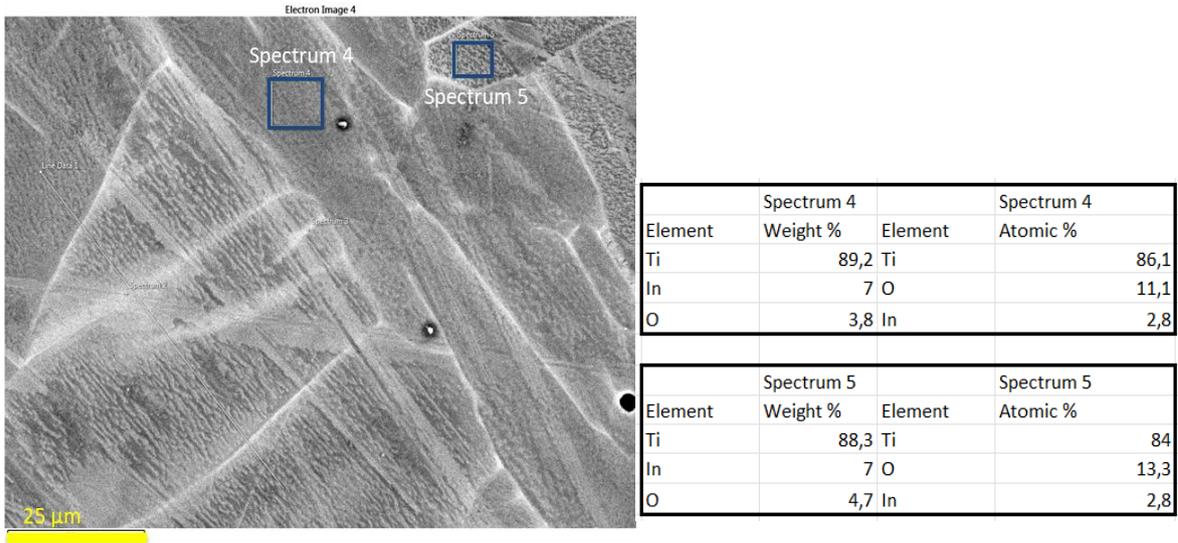


Figura 33: Porcentaje atómico y en peso de los distintos elementos en las zonas marcadas. (Ti-10In, 1000x)

Observamos que los porcentajes en peso de los elementos aleantes de cada una de las muestras coinciden aproximadamente con los teóricos. Esto puede ser debido a varios aspectos. El primero es que el análisis está teniendo en cuenta la concentración relativa de oxígeno, no obstante, si despreciamos esta concentración los resultados siguen siendo inferiores en las tres muestras. Un mal proceso de colada podría ser otra opción que explicaría la concentración de indio menor a la esperada.

Por otra parte, se ha realizado un estudio de las muestras mediante un análisis lineal mostrado en la siguiente figura.

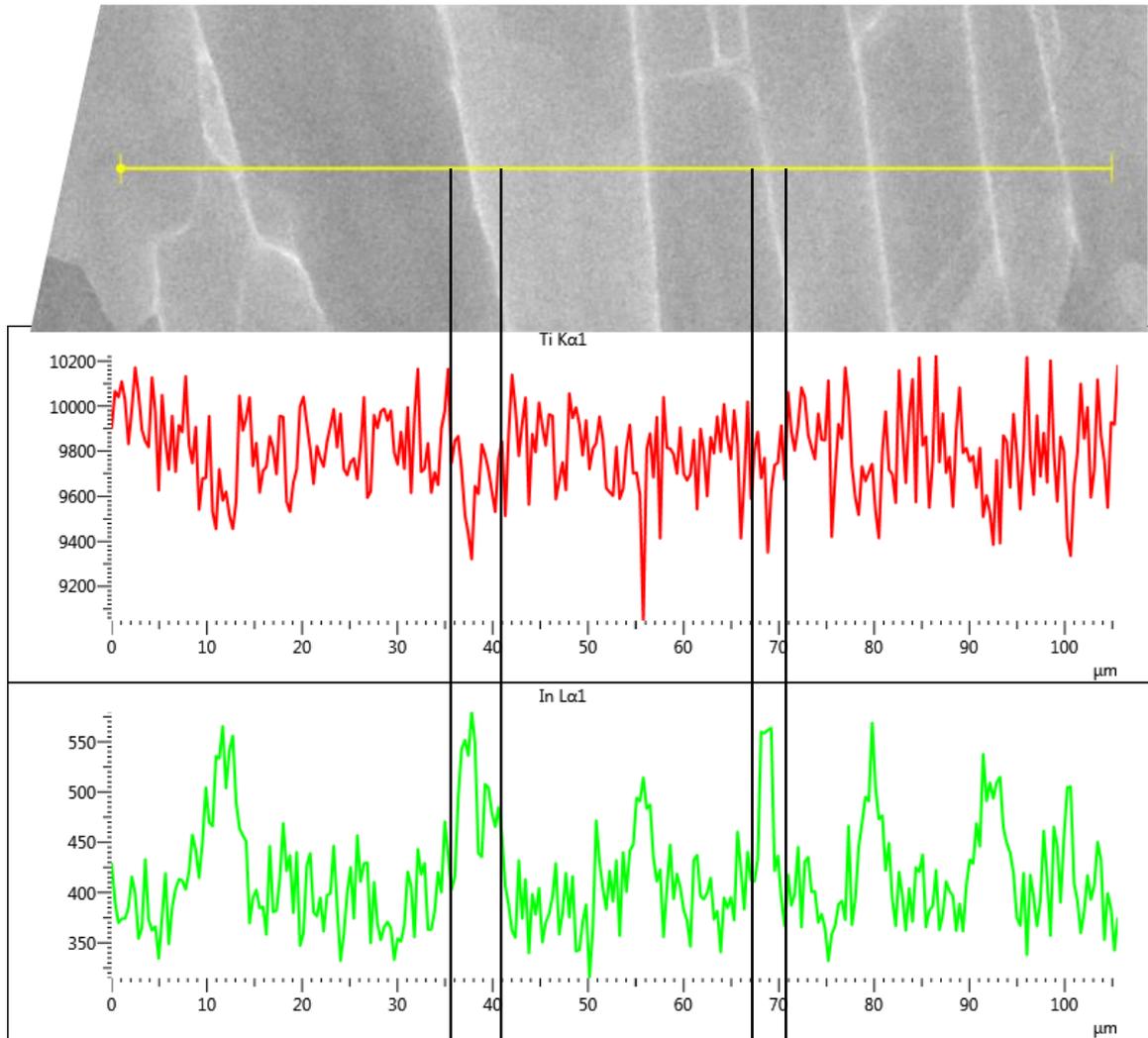
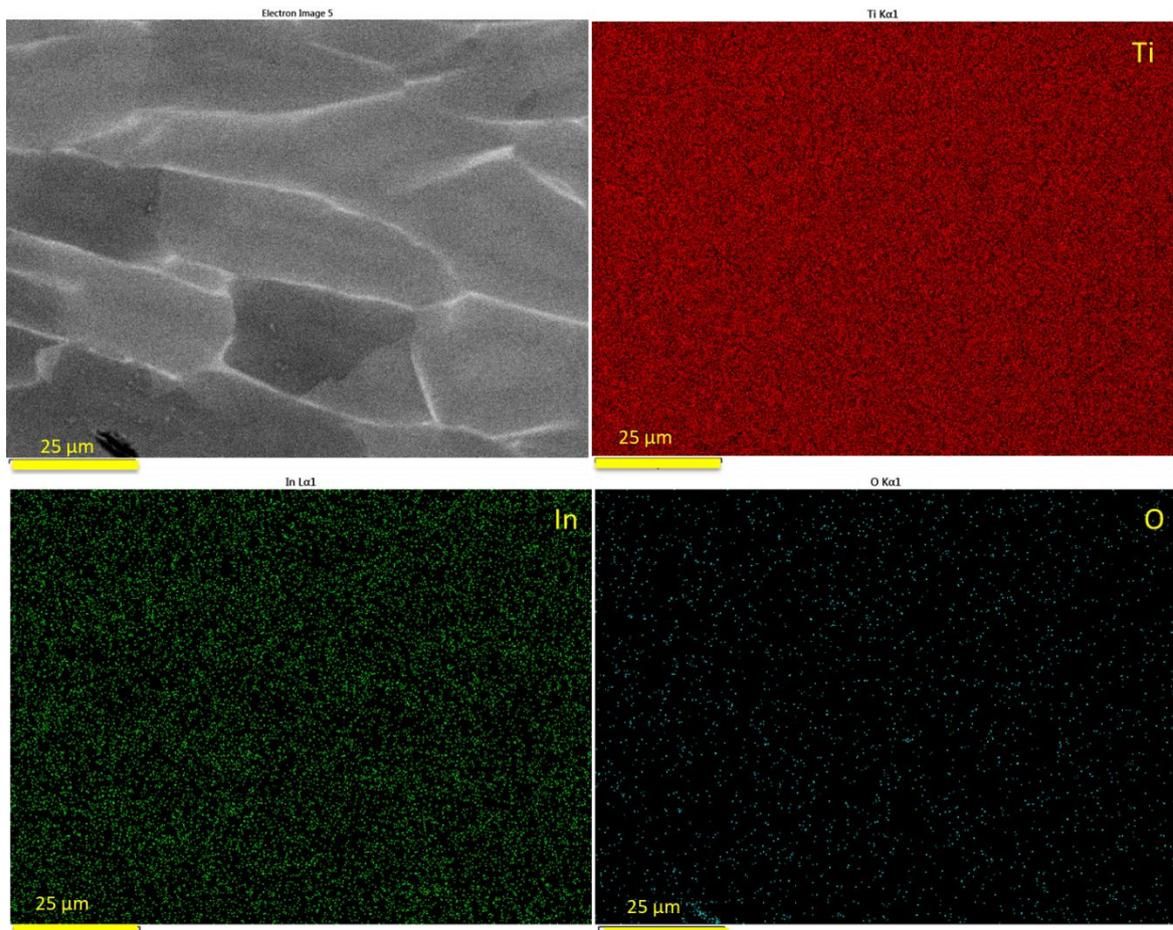


Figura 34: Análisis lineal de la muestra de Ti-5In a 1000x.

De esta podemos obtener poca información ya que el indio no afecta a la formación de fase beta, por lo que ambos elementos se mantienen bastante regulares a lo largo de la muestra. Parece ser que a medida que te acercas a los bordes de grano se acumula más el indio y el titanio reduce tímidamente su concentración.

Por último, el mapa de concentraciones nos ayuda a mostrar la concentración de cada uno de los elementos en una imagen.



Element	Map Sum Spectrum		Map Sum Spectrum	
	Weight %	Element	Atomic %	
Ti	91,9	Ti	87,3	
In	4,2	O	11,1	
O	3,9	In	1,7	

Figura 35: Mapa de concentraciones del Ti-5In a 1000x.

Este tipo de análisis es más útil cuando se estudian aleaciones con elementos que sí que influyen en la formación de otras fases. Si comparamos la imagen correspondiente a la concentración de oxígeno con la equivalente en el Ti-10In podemos observar una disminución de su concentración.

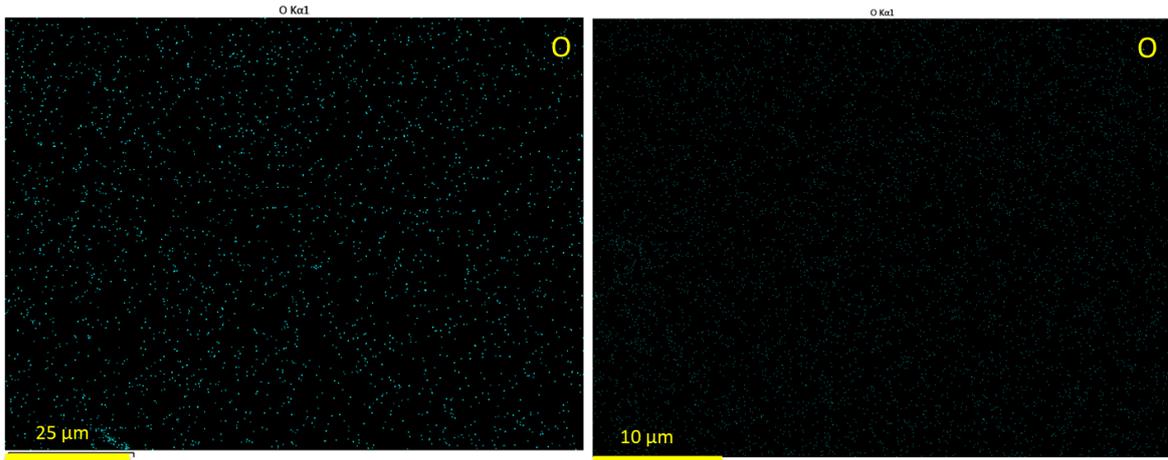


Figura 36: Comparativa entre concentraciones de oxígeno en dos aleaciones, Ti-5In (izquierda) y Ti-10In (derecha).

Esto es debido a la disminución en la porosidad que conlleva el incremento en la concentración de indio en la aleación. Por lo que se puede predecir que el indio ofrece un comportamiento más resistente frente a la corrosión y su adición implicará una mejora en las propiedades mecánicas del titanio.

Por otra parte, con las aleaciones que contienen hierro no vamos a encontrar lo mismo. Se ha procedido de la misma manera al análisis de estas muestras.

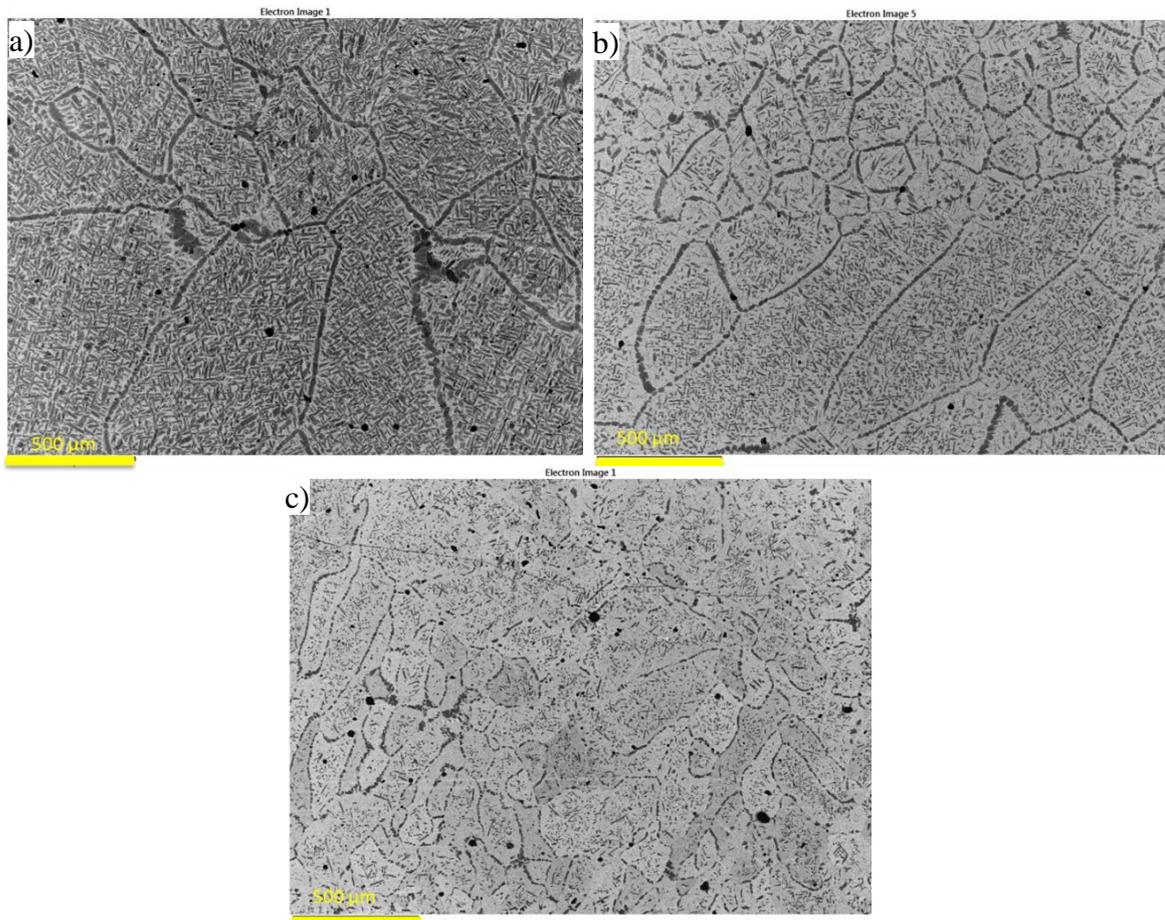


Figura 37: BSE a 50 aumentos de las aleaciones Ti-5Fe (a), Ti-10Fe (b) y Ti-17Fe (c).

En las imágenes anteriores se aprecia perfectamente la presencia de las dos fases de titanio, la fase α y la fase β . A medida que se aumentó la concentración de hierro observamos una disminución en el contenido de fase alfa. Esto era de esperar ya que el hierro es un elemento β -estabilizante.

Además, observamos que los niveles de porosidad son menores en las aleaciones Ti-10Fe y Ti-17Fe. Observando el diagrama de fases podemos concluir que esto se trata a estas dos concentraciones se acercan al eutectoide.

Si analizamos como en el caso del Ti-XIn las concentraciones de cada uno de los elementos en diversas zonas obtenemos los siguientes resultados.

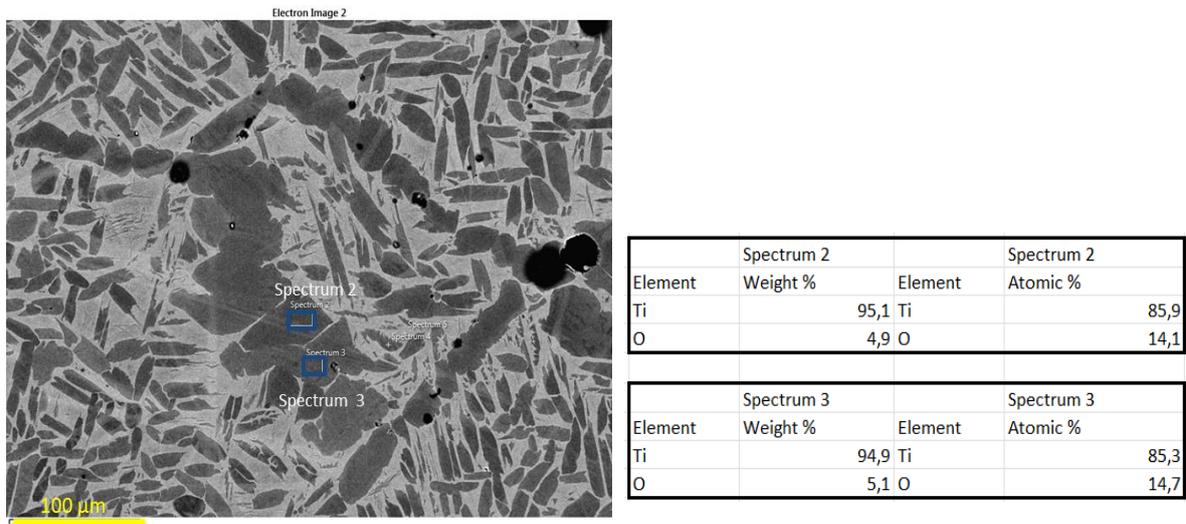


Figura 38: Porcentaje atómico y en peso de los distintos elementos en la zona marcada. (Ti-5Fe, 250x).

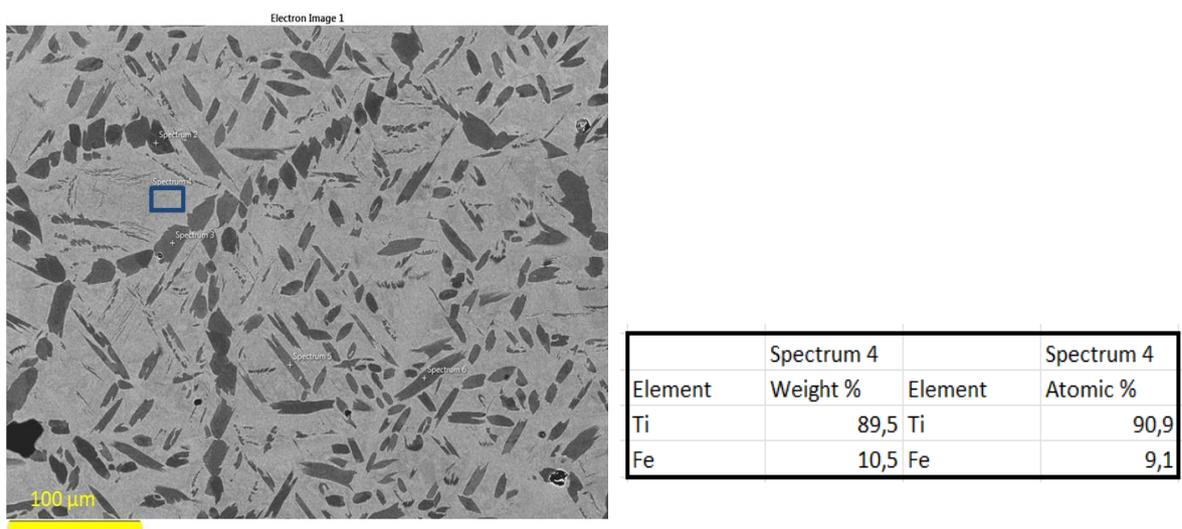


Figura 39: Porcentaje atómico y en peso de los distintos elementos en la zona marcada. (Ti-10Fe, 250x).

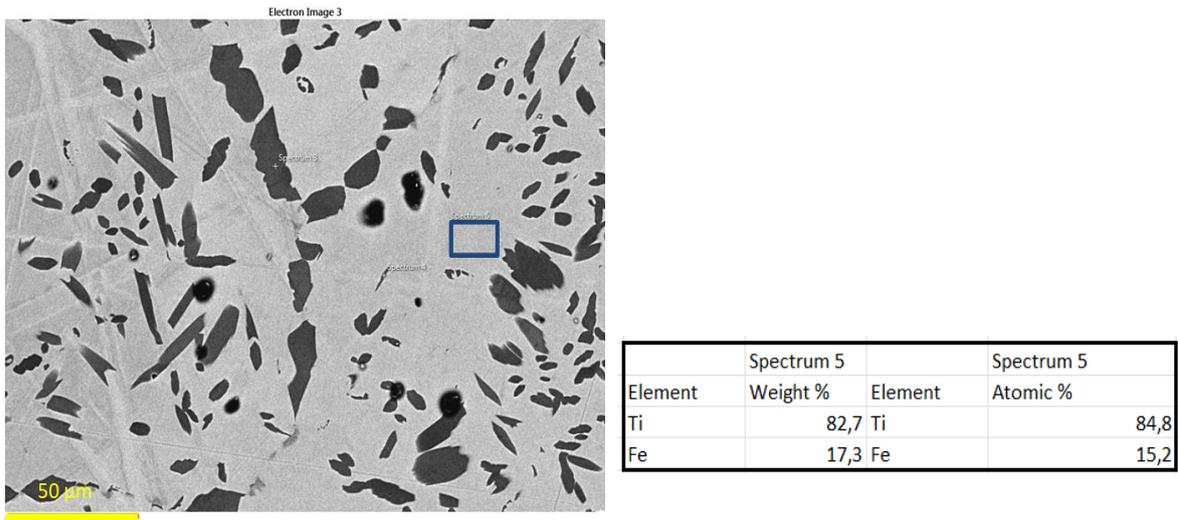


Figura 40: Porcentaje atómico y en peso de los distintos elementos en la zona marcada. (Ti-17Fe, 500x).

En estas imágenes observamos bien que las partes oscuras se corresponden a la fase alfa ya que son prácticamente todo titanio y la presencia del hierro es prácticamente nula, mientras que las partes más claras corresponden a la fase beta del titanio. En esta fase habrá una gran concentración de hierro.

Si comparamos los porcentajes en peso con los teóricos en estas zonas de fase beta observamos que son incluso superiores, esto se debe a que la mayor parte del hierro está ahí. Además, en las muestras como el Ti-17Fe estamos trabajando con concentraciones de hierro en las que se producen ya intermetálicos.

Esto se ve mejor a través del análisis lineal y el mapa de concentraciones mostrados a continuación.

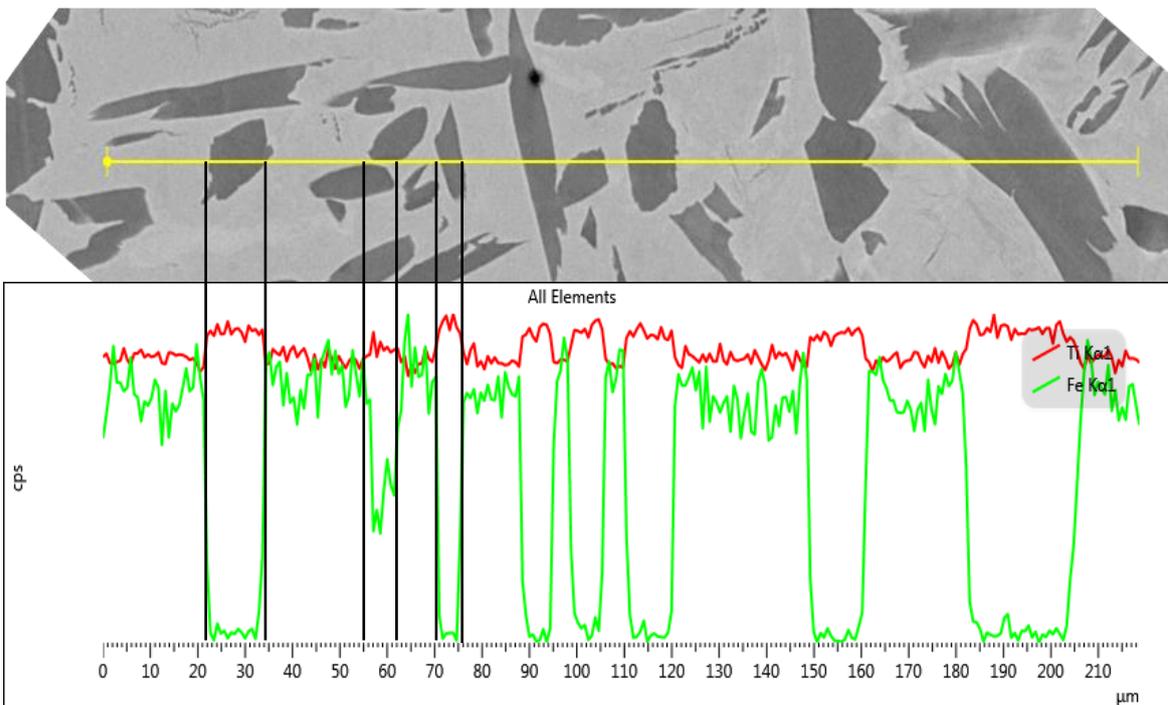
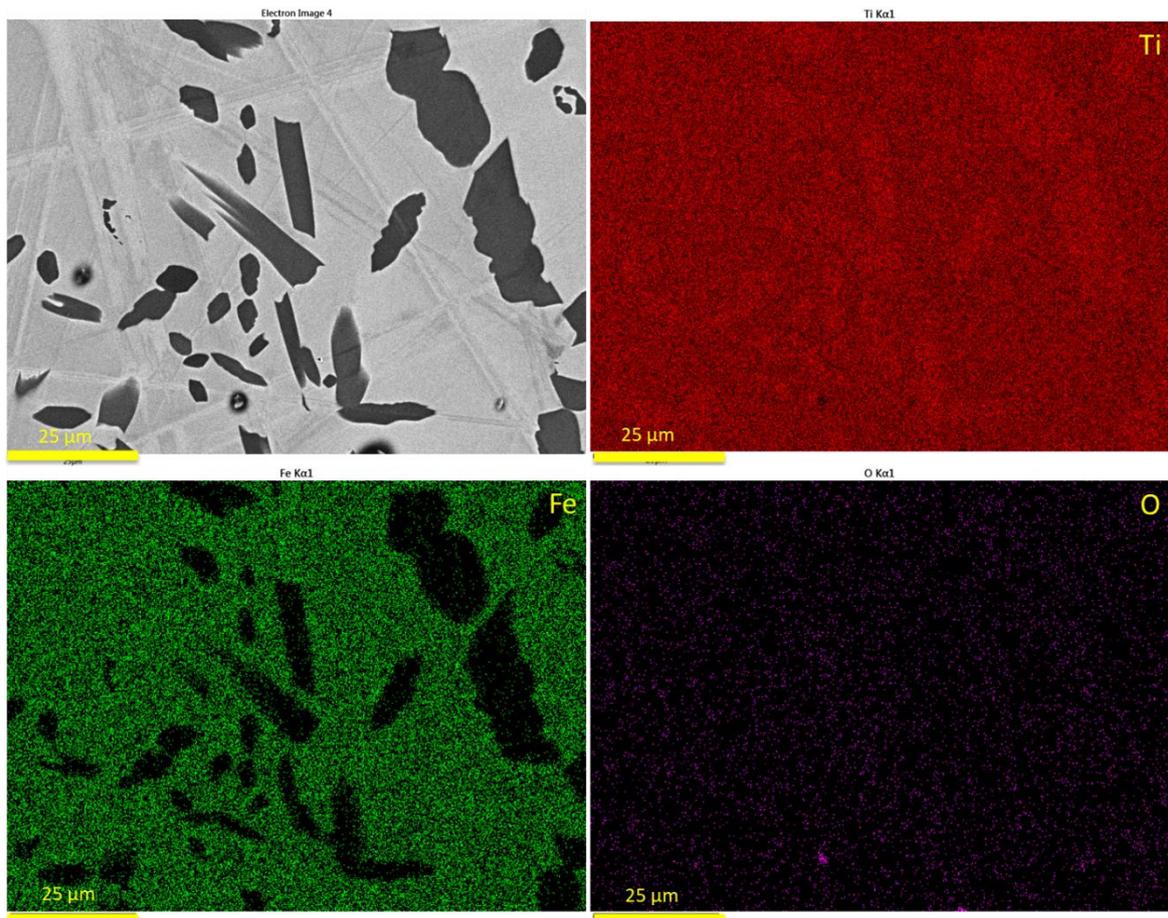


Figura 41: Análisis lineal de la muestra de Ti-10Fe a 500x.



Element	Map Sum Spectrum		Element	Map Sum Spectrum	
	Weight %			Atomic %	
Ti	84,9		Ti	86,7	
Fe	15,1		Fe	13,3	

Figura 42: Mapa de concentraciones del Ti-17Fe a 1000x.

En los análisis anteriores se puede observar claramente como los picos de concentración de hierro se encuentran en la fase beta, zona gris clara, mientras que en las zonas de fase alfa solo se encuentra el titanio.

Los picos con mayor cps de hierro que de titanio se pueden llegar a entender debido a que el hierro se encuentra en su mayoría en las zonas donde existe fase beta del titanio.

En este caso el hierro no parece tener gran influencia en la porosidad del material ya que la concentración de oxígeno es similar en todas las muestras.

En el mapa de concentraciones observamos que como pasaba en el caso del indio, aquí también tenemos menor concentración de hierro en la muestra que la teórica. Otra vez se debería a un mal proceso de sinterización.

6.3.3. Caracterización mediante difracción de rayos X

La finalidad de este ensayo es conocer las distintas fases que componen nuestras aleaciones Ti-XIn y Ti-XFe. Se han obtenido diversos difractogramas, uno para cada muestra, a las que se ha enfrentado a 2θ . Comparando los difractogramas obtenidos con bases de datos de ICDS se identifica la fase a la que pertenece cada pico y el plano cristalográfico.

Las siguientes figuras muestran algunos de los difractogramas obtenidos.

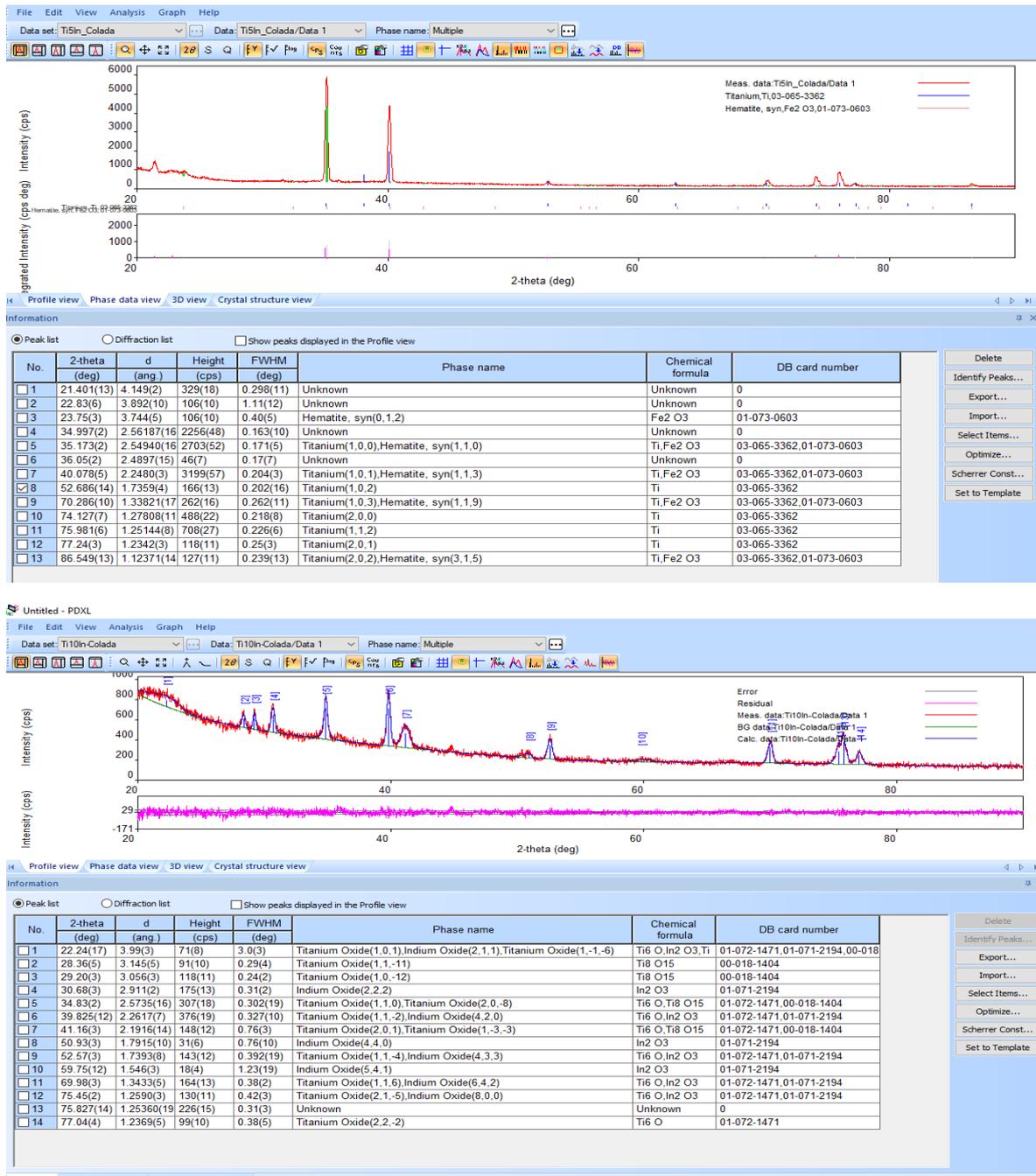


Figura 43: Difractogramas de las muestras de Ti-5In (arriba) y Ti-10In (abajo).

En las imágenes podemos observar en la parte superior el gráfico con los correspondientes picos y en la parte inferior observamos la fase a la que corresponde cada pico y su plano microestructural además de información adicional como el ángulo 2θ .

En este caso se trata de dos muestras de aleaciones con indio. Observamos que solo existe presencia de titanio en su fase alfa lo que confirma lo que se intuía al saber que el indio no afecta en la formación de fase beta.

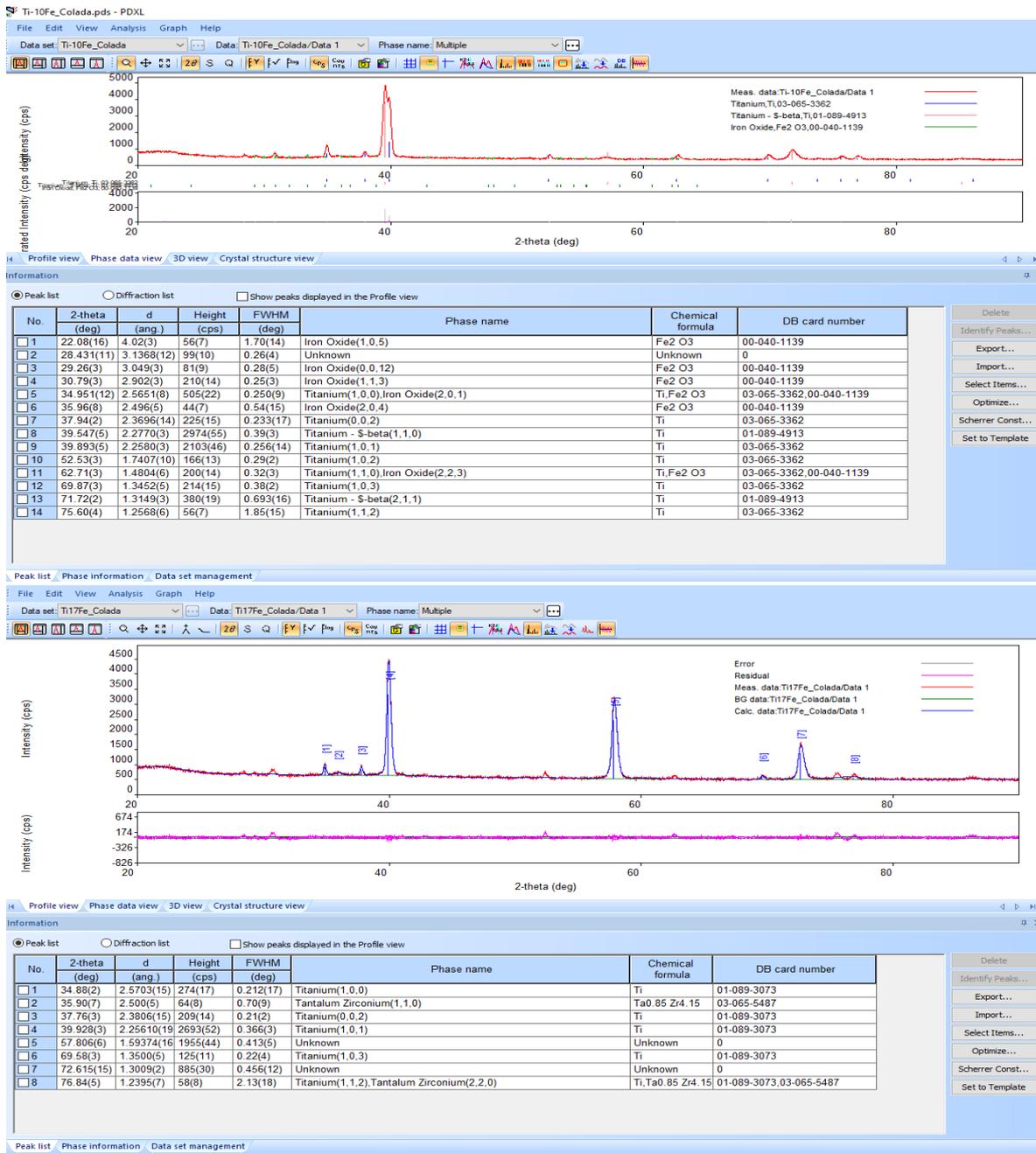


Figura 44: Difractogramas de las muestras de Ti-10Fe (arriba) y Ti-17Fe (abajo).

No obstante, si analizamos las aleaciones con hierro si que observamos picos que corresponden a la fase beta del titanio.

Algo muy interesante que se ve es que en el difractograma del Ti-17Fe no encontramos fase beta del titanio, esto es debido a que a partir de x cantidades de hierro, se empiezan a formar compuestos intermetálicos en vez de fase β como se puede observar en el diagrama de fases de esta aleación mostrado en la figura 7. Sin embargo, la aleación Ti-10Fe sí que contiene esta fase.

En algunos difractogramas se observan picos iniciales que no corresponden a ningún elemento o son desconocidos. Este fenómeno es debido a que las muestras se han introducido en el difractómetro dentro de una resina conductora que se ve afectada también por el ángulo de incidencia 2θ .

7. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Los procesos de colada es una de las técnicas más usadas en la formación de aleaciones, el caso del titanio no es distinto. Alguna de las ventajas de esta técnica es la rapidez para formar estas aleaciones y la baja porosidad de los materiales formados en comparación con otros procesos como la pulvimetalurgia.

La porosidad es un factor de gran interés ya que una porosidad alta es indicativa de unas propiedades mecánicas malas es por ello que el control de esta es de gran importancia a la hora de diseñar un material. No obstante, esta también ayuda en algunas aplicaciones biomédicas como es la proliferación de las células y permite que el fluido intercelular pase por los implantes.

Con el fin de observar las aleaciones y entender mejor si sus propiedades son buenas o no vamos a compararlas con las propiedades de la aleación más usada del titanio, el Ti-6Al-4V.

Para comenzar con la comparativa se ha consultado en la bibliografía los valores de las principales propiedades de esta aleación. Tras obtener estos datos empezamos la comparativa con el gráfico mostrado en la siguiente figura donde se visualiza la dureza Vickers de las muestras estudiadas frente a la del Ti-6Al-4V.

En un estudio realizado para comparar el Ti-6Al-4V con el titanio comercialmente puro, Ti cp, se observó unas durezas Vickers de 340,51 y 200,26 respectivamente (Rocha, Adabo, Henriques, & Nobilo, 2006). Observamos que la dureza del Ti-6Al-4V de este experimento es muy inferior a la nuestra, esto es debido a que la dureza depende de diversos factores como el proceso de sinterización, si se ha tratado con calor, la temperatura a la que se ha tratado y el periodo de tiempo. A mayor temperatura y mayor tiempo suele significar mayor dureza.

Haciendo una simple regla de tres podemos más o menos deducir la dureza del Ti cp en nuestras condiciones. Así obtenemos que poseería unos 380 HV.

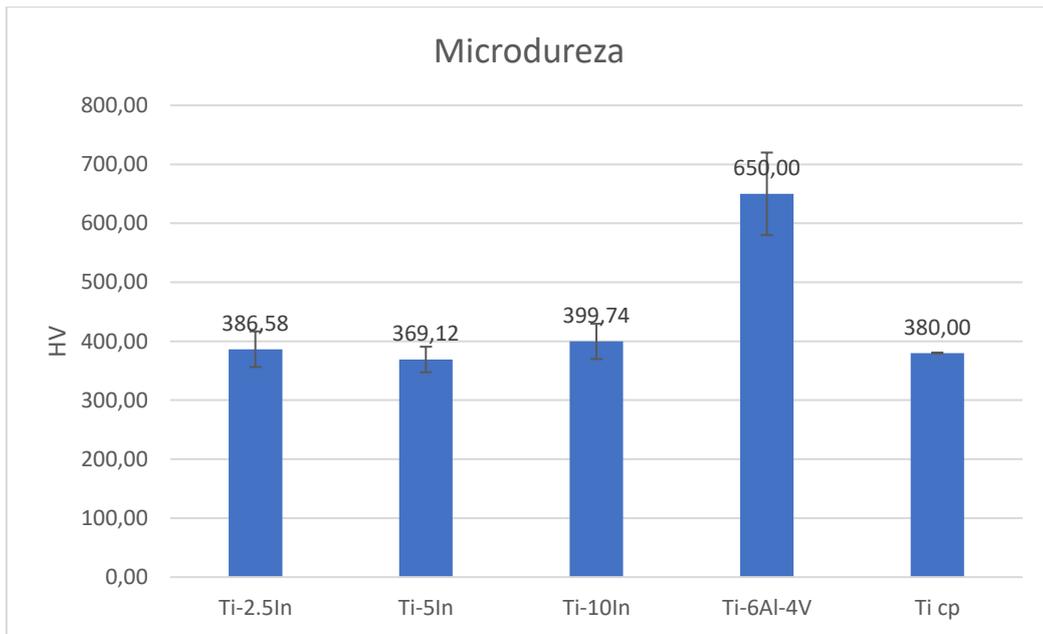


Figura 45: Comparativa de la dureza en HV de las aleaciones Ti-XIn analizadas, el Ti-6Al-4V y el Ti cp.

Observando la figura anterior se puede observar como la dureza de las aleaciones se incrementa a medida que la concentración del elemento aleante, en este caso el indio, aumenta. Esta mejora en la dureza es leve, no obstante, lo suficiente para mejorar muy levemente la dureza que ofrece el Ti cp. Sigue muy lejos de la aleación Ti-6Al-4V por lo que se debería valorar su sustitución o no según si la aplicación prevista requiere de una gran dureza o no.

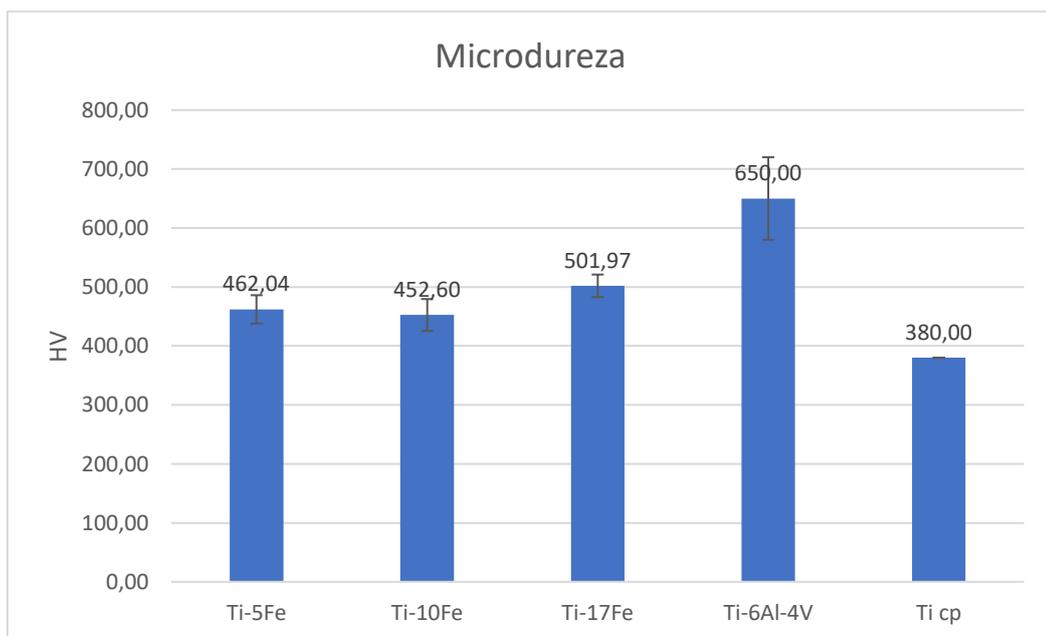


Figura 46: Comparativa de la dureza en HV de las aleaciones Ti-XFe analizadas, el Ti-6Al-4V y el Ti cp.

En el caso de las aleaciones Ti-XFe mostradas en la figura 46 se observa una variación más notoria en la dureza a medida que varía la concentración del elemento aleante. No obstante, el patrón se mantiene, a medida que aumenta la concentración la dureza hace lo mismo. Estas aleaciones sí que nos ofrecen unas prestaciones muy superiores a las del Ti cp, sin embargo, siguen manteniéndose lejos de la dureza ofrecida por el Ti-6Al-4V por lo que habría que valorar su uso y la adición de algún elemento aleante con el fin de mejorar la dureza del material según la aplicación prevista.

Por otro lado, en el ensayo Small Punch se ha obtenido valores tanto del límite elástico del material como de la fuerza máxima soportada en el ensayo.

En la figura 47 se muestra la fuerza máxima soportada por cada una de las aleaciones en comparación con la del Ti-6Al-4V, consultada en la bibliografía. (Lucon E. , Benzing, Derimow, & Hrabec, 2021)

En la tabla 6 se mostraba la UTS del Ti cp y del Ti-6Al-4V en ciertas condiciones, con estos podemos obtener el valor correspondiente al Ti cp en nuestras condiciones, siendo este 429,5 N.

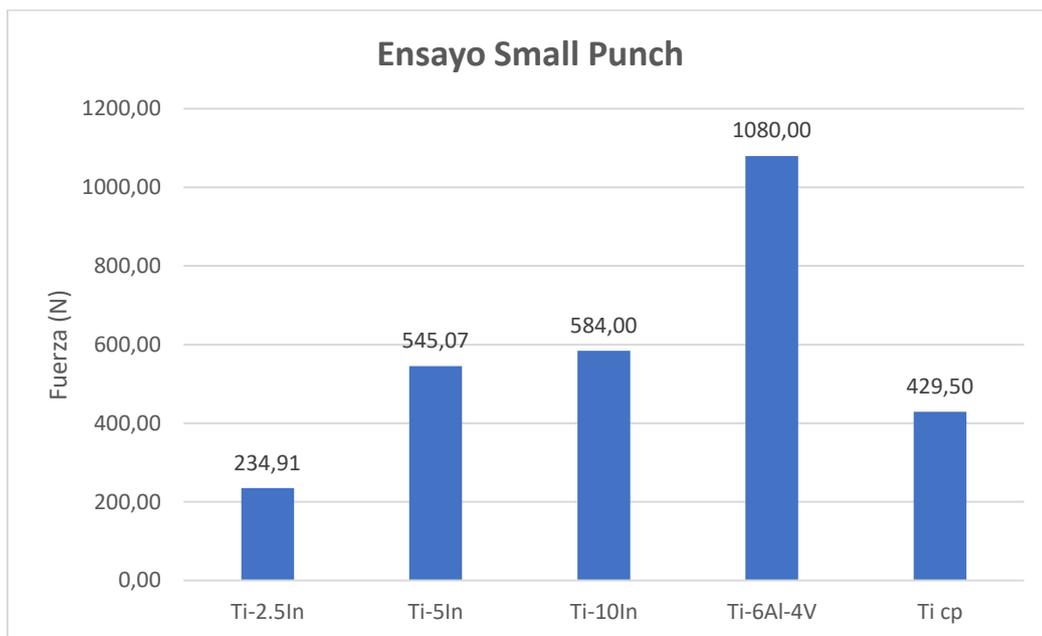


Figura 47: Comparativa de la fuerza máxima soportada en el ensayo de Small Punch de las aleaciones de Ti-XIn analizadas, el Ti-6Al-4V y el Ti cp.

En la figura anterior se muestran los resultados obtenidos en el ensayo de Small Punch de las aleaciones Ti-XIn frente a Ti-6Al-4V. Se observa como claramente el indio tiene un efecto positivo en la ductilidad de la aleación haciendo que la carga máxima soportada antes de la rotura sea superior a medida que aumenta la concentración de éste.

Se observa además una evolución logarítmica. La carga soportada del Ti-5In aumenta en un 132% respecto a la soportada por el Ti-2,5In. Sin embargo, la soportada por el Ti-10In solo se ve aumentada en un 7,14% respecto a la aleación con 5% de concentración en indio. Se

puede concluir que la concentración de indio afecta positivamente hasta un valor límite lejos de Ti-6Al-4V. No obstante, tanto el Ti-5In como el Ti-10In sí que mejoran la resistencia proporcionada por el Ti cp. En el caso del último, se obtiene una mejora de casi un 36% respecto al titanio puro.

Lejos de esta aleación se encuentran también las aleaciones ensayadas con hierro que se muestran en la siguiente figura.

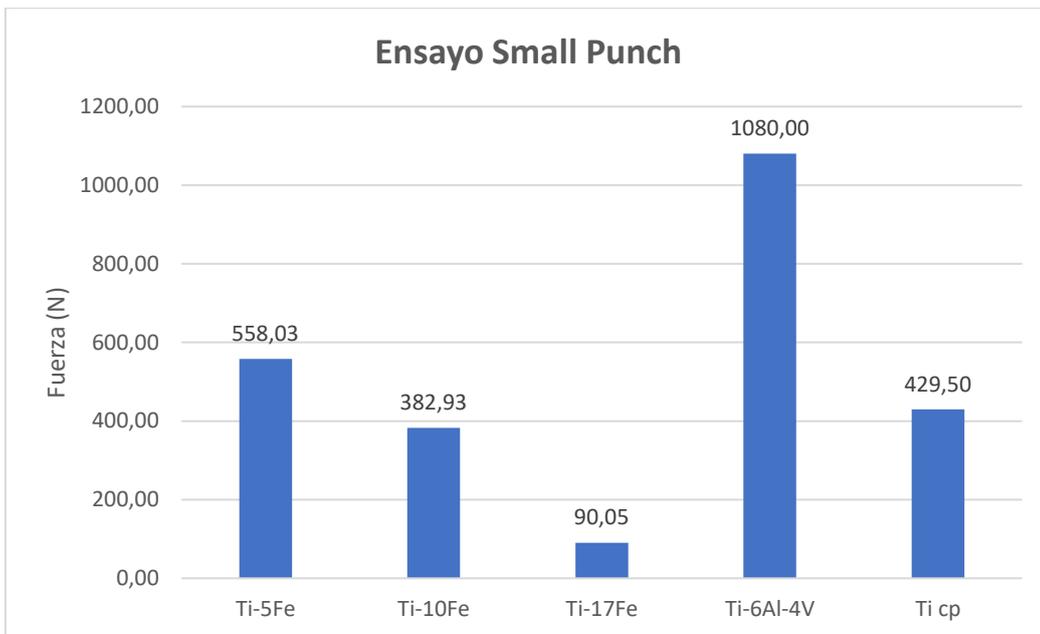


Figura 48: Comparativa de la fuerza máxima soportada en el ensayo de Small Punch de las aleaciones de Ti-XFe analizadas, el Ti-6Al-4V y el Ti cp.

En este caso observamos que, a contrario que en el caso del indio, el hierro tiene una influencia negativa en la ductilidad del material. Esto se debe a la formación de intermetálicos.

Como se ve en el caso del Ti-5Fe, a concentraciones bajas sí que mejora la resistencia ofrecida por el Ti cp en un 30%. A medida que aumentamos la concentración esta resistencia cae por debajo de la del Ti cp.

Como hemos mencionado previamente hay un rango en el que, a partir del cual, la concentración en hierro empieza a ser contraproducente en la aleación con el titanio ya que se empiezan a formar compuestos intermetálicos que aumentan la fragilidad de esta. Además, al ser más duro es más difícil deformar el material lo que hace que se acumule más energía en la muestra y llegue a la rotura explosiva que comentamos previamente en vez de ir liberando esa energía poco a poco mediante la deformación.

8. CONCLUSIONES

Se han escogido unas aleaciones formadas mediante colada y se le han realizado una serie de estudios y ensayos mecánicos y microestructurales consiguiendo datos e información sobre los efectos de la adición de hierro e indio en distintas cantidades al titanio.

Partimos de unas piezas ya formadas por lo que se intuye que el proceso de obtención ha sido el adecuado. Al ver la homogeneidad del material y la poca porosidad de este podemos concluir que efectivamente el proceso ha sido correcto. Sin embargo, los contenidos de los elementos aleantes en nuestras muestras son inferiores a los teóricos debido a la posible pérdida por volatilidad. Esto podría mejorarse mediante procesos a menor temperatura que faciliten la solubilidad entre los elementos utilizados en el estudio.

Se ha observado que la dureza de las muestras con contenido en indio es equivalente a la del Ti cp, mientras que las que contienen hierro presentan una dureza un 23% superior. No obstante, comparando las durezas con la del Ti-6Al-4V se observa que hay una gran diferencia entre estas siendo la de esta última aleación muy superior a las estudiadas.

Por otro lado, en el ensayo Small Punch se ha obtenido que el hierro es perjudicial para la ductilidad del material a partir de ciertas concentraciones. El Ti-5Fe sí que presenta una resistencia un 30% superior a la del Ti cp pero al aumentar la cantidad de hierro ésta cae radicalmente. Lo ideal sería usar concentraciones muy escasas de hierro y hacer pruebas aleando el titanio además de con hierro con otros elementos que mejoren estas propiedades mecánicas.

Sin embargo, la adición de indio ha mostrado una mejora en el carácter dúctil del material. Esta mejora es limitada, lo que lo hace un elemento interesante para realizar más estudios sobre el pero no suficiente para reemplazar a las aleaciones presentes actualmente en el mercado. No obstante, las aleaciones Ti-5In y Ti-10In sí que mejoran la resistencia ofrecida por el Ti cp en un 36%.

Las aleaciones con presencia de indio se caracterizan por presencia de titanio en fase α y una clara diferenciación de los bordes de grano donde la concentración de indio es mayor. Además, se observa como a medida que aumenta la concentración del indio el tamaño de los granos va disminuyendo al igual que la porosidad.

En las aleaciones con hierro se obtiene una mezcla entre titanio en fase β y titanio en fase α . Se ven claramente diferenciadas estas dos fases en las imágenes obtenidas en microscopio. Se trabaja con concentraciones de hierro cercanas a la zona eutectoide donde las muestras con mayor concentración presentan materiales intermetálicos que afectan negativamente a las propiedades mecánicas.

9. BIBLIOGRAFÍA

- Alimov, A., Sizova, I., Biba, N., & Bambach, M. (2020). Prediction of Mechanical Properties of Ti-6Al-4V Forgings Based on Simulation of Microstructure Evolution. *Procedia Manufacturing*, 1468-1475.
- Askeland, D. R. (2010). *Essentials of materials science and engineering*. Stamford.
- Ávila, D. S. (2019). *Análisis y mejora de la caracterización mecánica mediante ensayos miniaturizados de aleaciones procesadas por fabricación aditiva*. Madrid.
- Ayad, A., Astuty, A., Muhammad, S., & Hanim, M. A. (2017). Iron as a Promising Alloying Element for the Cost Reduction of Titanium Alloys: A Review. *Applied Mechanics and Materials*, 147-153.
- Azo Materials. (s.f.). D2 PHASER 2nd Generation Benchtop X-Ray Diffractometer from Bruker.
- Baek-Hee, L., Young Do, K., & Kyu Hwan, L. (2003). XPS study of bioactive graded layer in Ti-In-Nb-Ta alloy prepared by alkali and heat treatments. *Biomaterials*, 2257-2266.
- Body Cult. (s.f.). Elmasonic S 30 H.
- Bolzoni, L., Ruiz-Navas, E., & Gordo, E. (2016). Understanding the properties of low-cost iron-containing powder metallurgy titanium alloys. *Materials & Design*, 317-323.
- Boyer, R., Welsch, G., & Collings, E. (1994). *Material Properties Handbook: Titanium Alloys*.
- Budapest University of Technology and Economics. (s.f.). Polishing Machine - STRUERS LABOPOL-5.
- BV, T. F.-W. (2020). *Different Types of SEM Imaging – BSE and Secondary Electron Imaging*.
- El-Hadad, S., Nady, M., Khalifa, W., & Shash, A. (2017). Influence of heat treatment conditions on the mechanical properties of Ti-6Al-4V alloy. *Canadian Metallurgical Quarterly*.
- Elias, C. N., Lima, J. H., Valiev, R., & Meyers, M. A. (2008). Biomedical applications of titanium and its alloys. *JOM*, 46-49.
- Encyclopaedia, T. E. (11 de Agosto de 2023). *titanium*. *Encyclopedia Britannica*. Obtenido de <https://www.britannica.com/science/titanium>
- Froes, F., & Whittaker, M. (2022). Titanium and Its Alloys. En F. Froes, & M. Whittaker, *Encyclopedia of Materials: Metals and Alloys* (págs. 287-293). Oxford.
- García, P. (2009). *UC3M*. Obtenido de Diseño y procesado por vía pulvimetalúrgica convencional de aleaciones de Ti de bajo coste: <https://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/5618>

- Gulay, L., & Schuster, J. (2003). Investigation of the titanium–indium system. *Journal of Alloys and Compounds*, 137-142.
- Gussone, J., Bugelnig, K., Barriobero-Vila, P., Silva, J. C., Hecht, U., Dresbach, C., . . . Requena, G. (2020). Ultrafine eutectic Ti-Fe-based alloys processed by additive manufacturing – A new candidate for high temperature applications. *Applied Materials Today*.
- Han, Im, M.-K. a., Hwang, J.-B. a., Kim, M.-J. a., Kim, B.-J. a., Park, H.-Y. a., & Yeong-Joon. (2015). Effect of Indium Content on the Microstructure, Mechanical Properties and Corrosion Behavior of Titanium Alloys. *Metals*, 850-862.
- Hashmi, S., Batalha, G. F., Tyne, C. J., & Yilbas, B. (2014). Superplastic Forming. En K. Zhang, & S. Jiang, *Comprehensive Materials Processing* (págs. 371-392). Oxford.
- Hebei Metals Industrial Limited. (s.f.). *The Crystal Structure of Titanium*. Obtenido de <http://www.metalspiping.com/the-crystal-structure-of-titanium.html>
- Holt, J. M. (1996). *Structural Alloys Handbook*.
- Ian Polmear, D. S.-F. (2017). Titanium Alloys. En I. Polmear, D. StJohn, J.-F. Nie, & M. Qian, *Light Alloys: Metallurgy of the Light Metals* (págs. 369-460).
- Jackson, M. (2011). Superplastic forming and diffusion bonding of titanium alloys. *Superplastic Forming of Advanced Metallic Materials*, 227-246.
- Leyens, C., & Peters, M. (2003). *Titanium and Titanium Alloys: Fundamentals and Applications*.
- Lifeder. (30 de Julio de 2019). *Titanio: historia, estructura, propiedades, reacciones, usos*. Obtenido de <https://www.lifeder.com/titanio/>
- Lucon, E., Benzing, J. T., Derimow, N., & Hrabe, N. (21 de Marzo de 2021). *Journal of Materials Engineering and Performance*, 5039–5049. Obtenido de https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=931638
- Lucon, E., Benzing, J. T., Derimow, N., & Hrabe, N. (2021). Small Punch Testing to Estimate the Tensile and Fracture Properties of Additively Manufactured Ti-6Al-4V. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 5039-5049.
- Metalinspec. (s.f.). Cortadora metalográfica Accutom-10/100.
- Metalinspec. (s.f.). Montadora Citopress-5.
- Murray, J. (1987). The Al-Ti (Aluminum-Titanium) System. En P. D. Alloys, *Murray, J.L.* (págs. 12-24).
- Nicol scales. (s.f.). Shimadzu AG-X Plus.
- Phuong, D., Duong, V., Luan, V., Anh, N., & Trinh, V. (2019). Microstructure and Mechanical Properties of Ti6Al4V Alloy Consolidated by Different Sintering Techniques. *Metals*.
- Pinterest. (s.f.). Newage Shimadzu Full Automatic Micro Vickers Hardness Tester Hmv-2t Series.

- Rack, H., & Qazi, J. (2006). Titanium alloys for biomedical applications. *Materials Science and Engineering*, 1269-1277.
- Rapiddirect. (18 de Julio de 2022). *17 types of casting defects: Understanding their causes and solutions*. . Obtenido de Rapiddirect: <https://www.rapiddirect.com/blog/17-types-of-casting-defects/>
- Rocha, S., Adabo, G., Henriques, G., & Nobilo, M. (2006). Vickers hardness of cast commercially pure titanium and Ti-6Al-4V alloy submitted to heat treatments. *Brazilian dental journal*, 126-129.
- Scales Measuring Instruments. (s.f.). Balanza Analítica KERN ABJ 320-4NM.
- Sinha, A., Sanyal, S., & Bandyopadhyay, N. (2017). 2.11 Thermal Treatment for Strengthening Titanium Alloys. En A. Sinha, S. Sanyal, & N. Bandyopadhyay, *Comprehensive Materials Finishing* (págs. 288-336). Oxford: Elsevier.
- Sui, Y.-w., Li, B.-s., Liu, A.-h., Nan, H., Guo, J.-j., & Fu, H.-z. (2008). Microstructures and hardness of Ti-6Al-4V alloy staging castings under centrifugal field. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 291-296.
- ULMA. (20 de Mayo de 2020). *Usos y propiedades del titanio*. Obtenido de ULMA Forged Solutions: <https://www.ulmaforge.com/noticia/usos-y-propiedades-del-titanio/>
- Universitat Politècnica de València. (s.f.). Servicio de Microscopía Electrónica. *Microscopio Electrónico de Barrido de Emisión de Campo (FESEM)*.
- Veiga, C., Davim, J., & Loureiro, A. (2012). Properties and Applications of Titanium Alloys: *Red. Adv. Mater. Sci.*, 133-148.

DOCUMENTO 2: PRESUPUESTO

ÍNDICE DE PRESUPUESTO

1. PRESUPUESTO.....	74
1.1. Cuadro de precio unitario del personal.....	74
1.2. Cuadro de materiales y equipo.....	74
1.3. Cuadro de maquinaria.....	74
1.4. Precios descompuestos.....	75
1.5. Presupuesto de ejecución material.....	78
1.6. Presupuesto de ejecución por contrata.....	78

ÍNDICE DE TABLAS DE PRESUPUESTO

Tabla 1.1:	Precios unitarios por mano de obra.....	74
Tabla 1.2:	Precios unitarios de materiales.....	74
Tabla 1.3:	Precio unitario de maquinaria.....	75
Tabla 1.4:	Planificación del proyecto y revisión bibliográfica.....	75
Tabla 1.5:	Caracterización de las aleaciones y preparación metalográfica.....	76
Tabla 1.6:	Caracterización mecánica de las aleaciones.....	77
Tabla 1.7:	Caracterización microestructural de las aleaciones.....	77
Tabla 1.8:	Redacción del TFG.....	77
Tabla 1.9:	Presupuesto de ejecución material.....	78
Tabla 1.10:	Presupuesto de ejecución por contrata.....	78

ÍNDICE DE ECUACIONES DE PRESUPUESTO

Ecuación 1.1: Amortización anual.....	74
--	----

1. PRESUPUESTO

1.1. Cuadro de precio unitario del personal

Tabla 1.1: Precios unitarios de mano de obra

PRECIOS UNITARIOS DE MANO DE OBRA	
CONCEPTO	PRECIO UNITARIO
Catedrático (Tutor)	31,25 €/h
Titular de Escuela (Ingeniero)	22,25 €/h
Técnico de laboratorio	12,50 €/h

1.2. Cuadro de materiales y equipo

Tabla 1.2: Precios unitarios de materiales

PRECIOS UNITARIOS DE MATERIALES	
CONCEPTO	PRECIO UNITARIO
Titanio	110,50 €/kg
Indio	850,35 €/kg
Hierro	11,75 €/kg
Montaje de Arquímedes	15,50 €/und
Disco de corte de diamante	985,00 €/und
Estearato de zinc	2,50 €/kg
Resina conductora	46,85 €/kg
Lijas de SIC Sturers	3,30 €/und
Paño MD Largo Struers	20,45 €/und
Paño MD Chem Struers	25,95 €/und
Suspensión de diamante	5035,00 €/kg
Suspensión de sílice coloidal	450,50 €/L
Etanol	10,75 €/L

1.3. Cuadro de maquinaria

Para calcular la amortización se ha usado la siguiente ecuación:

Ecuación 4.1: Amortización anual

$$\text{amortización anual} = \frac{\text{valor de mercado (€)}}{\text{vida útil (años)} \times \text{tiempo de uso al año} \left(\frac{h}{\text{año}}\right)}$$

Tabla 1.3: Precio unitario de maquinaria

PRECIO UNITARIO DE MAQUINARIA				
CONCEPTO	PRECIO	TIEMPO DE USO	VIDA ÚTIL	PRECIO UNITARIO
Balanza Kern modelo ABJ-NM/ABS-N	1.100,00 €	1270 h	4 años	0,217 €/h
Multiherramienta DREMEL	107,00 €	670 h	5 años	0,032 €/h
Cortadora Struers modelo Accutom-10	43.500,00 €	1845 h	5 años	4,715 €/h
Máquina de prueba universal Shimadzu modelo AG-X plus	55.000,00 €	760 h	11 años	6,579 €/h
Prensa Struers modelo CitoPress-1	15.350,00 €	1225 h	5 años	2,506 €/h
Lijadora LaboPol-25 de Struers	16.400,00 €	2420 h	4 años	1,694 €/h
Pulidora LaboPol-5 de Struers	21.500,00 €	1560 h	4 años	3,446 €/h
Maquina ultasonidos Elmasonic S 30H de ELMA	2.250,00 €	675 h	3 años	1,111 €/h
Durómetro modelo HMV-2T del fabricante Shimadzu	3.500,00 €	980 h	5 años	0,714 €/h
Microscopio óptico LV100 del fabricante NIKON	75.000,00 €	1250 h	8 años	7,500 €/h
Microscopio estereostópico Leica modelo M125	32.000,00 €	530 h	7 años	8,625 €/h
Microscopio de barrido electrónico modelo ULTRA 55 del fabricante Zeiss	570.000,00 €	1060 h	13 años	41,364 €/h
Difractómetro D2 PHASER del fabricante BRUKER	135.000,00 €	1010 h	10 años	13,367 €/h
Secador de pelo	20,00 €	410 h	3 años	0,016 €/h

1.4. Precios descompuestos

Tabla 1.4: Planificación del proyecto y revisión bibliográfica

PLANIFICACIÓN DE PROYECTO Y REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA				
FASE	CONCEPTO	PRECIO UNITARIO	CANTIDAD	COSTE TOTAL
PLANIFICACIÓN DE PROYECTO	Personal			
	Tutor	31,25 €/h	6 h	187,50 €
	COSTE FASE :			187,50 €
REVISIÓN DE BIBLIOGRAFÍA	Personal			
	Ingeniero	22,25 €/h	16 h	356,00 €
	COSTE FASE :			356,00 €
SELECCIÓN ELEMENTOS ALEANTES Y COMPOSICIÓN	Personal			
	Tutor	31,25 €/h	2,5 h	78,13 €
	COSTE FASE :			78,13 €
TOTAL :				621,63 €

Tabla 1.5: Caracterización de las aleaciones y preparación metalográfica

CARACTERIZACIÓN DE LAS ALEACIONES Y PREPARACIÓN METALOGRÁFICA				
FASE	CONCEPTO	PRECIO UNITARIO	CANTIDAD	COSTE TOTAL
Caracterización de cada aleación	Personal Técnico de laboratorio	12,50 €/h	1,5 h	18,75 €
	Material Montaje de Arquímedes	15,50 €/und	1 und	15,50 €
	Maquinaria Balanza Kern modelo ABJ-NM/ABS-N	0,217 €/h	1,5 h	0,33 €
	COSTE FASE :			34,58 €
Obtención muestra de cada aleación	Personal Técnico de laboratorio	12,50 €/h	4 h	50,00 €
	Material Disco de diamante	985,00 €/und	1 und	985,00 €
	Maquinaria Multiherramienta DREMEL	0,032 €/h	1,5 h	0,05 €
	Cortadora Struers modelo Accutel-10	4,715 €/h	2,5 h	11,79 €
COSTE FASE :			1.046,84 €	
Embutición en resina	Personal Técnico de laboratorio	12,50 €/h	1,5 h	18,75 €
	Material Resina conductora	46,85 €/kg	0,1 kg	4,69 €
	Estearato de zinc	2,50 €/kg	0,03 kg	0,08 €
	Maquinaria Prensa Struers modelo CitoPress-1	2,506 €/h	1 h	2,51 €
COSTE FASE :			26,02 €	
Proceso de desbaste	Personal Técnico de laboratorio	12,50 €/h	2 h	25,00 €
	Material Lijas de SIC Struers	3,30 €/und	8 und	26,40 €
	Maquinaria Lijadora LaboPol-25 de Struers	1,694 €/h	1,75 h	2,96 €
	COSTE FASE :			54,36 €
Pulido	Personal Técnico de laboratorio	12,50 €/h	3,50 h	43,75 €
	Material Paño MD Largo Struers	20,45 €/und	1 und	20,45 €
	Paño MD Chem Struers	25,95 €/und	1 und	25,95 €
	Suspensión de diamante	5035,00 €/kg	0,025 kg	125,88 €
	Suspensión de sílice coloidal	450,50 €/L	0,25 L	112,63 €
	Etanol	10,75 €/L	0,4 L	4,30 €
	Maquinaria Pulidora LaboPol-5 de Struers	3,446 €/h	2 h	6,89 €
	Maquina ultrasonidos Elmasonic S 30H de ELMA	1,111 €/h	0,5 h	0,56 €
	Secador de pelo	0,016 €/h	0,33 h	0,01 €
COSTE FASE :			340,40 €	
TOTAL :			1.502,19 €	

Tabla 1.6: Caracterización mecánica de las aleaciones

CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE LAS ALEACIONES				
FASE	CONCEPTO	PRECIO UNITARIO	CANTIDAD	COSTE TOTAL
Ensayo de microdureza	Personal			
	Técnico de laboratorio	12,50 €/h	2 h	25,00 €
	Maquinaria			
	Durómetro modelo HMV-2T del fabricante Shimadzu	0,714 €/h	2 h	1,43 €
COSTE FASE :				26,43 €
Ensayo de micropunzonado	Personal			
	Técnico de laboratorio	12,50 €/h	10,50 h	131,25 €
	Material			
	Disco de corte de diamante	985,00 €/und	1 und	985,00 €
	Maquinaria			
	Cortadora Struers modelo Accutom-10	4,715 €/h	6 h	28,29 €
Máquina de prueba universal Shimadzu modelo AG-X plus	6,579 €/h	3 h	19,74 €	
Microscopio estereostópico Leica modelo M125	8,625 €/h	1,50 h	12,94 €	
COSTE FASE :				1.177,21 €
TOTAL :				1.203,64 €

Tabla 1.7: Caracterización microestructural de las aleaciones

CARACTERIZACIÓN MICROESTRUCTURAL DE LAS ALEACIONES				
FASE	CONCEPTO	PRECIO UNITARIO	CANTIDAD	COSTE TOTAL
Observación en microscopio óptico	Personal			
	Técnico de laboratorio	12,50 €/h	4 h	50,00 €
	Maquinaria			
	Microscopio óptico LV100 del fabricante NIKON	7,500 €/h	4 h	30,00 €
COSTE FASE :				80,00 €
Observación en microscopio electrónico de barrido	Personal			
	Técnico de laboratorio	12,50 €/h	9 h	112,50 €
	Maquinaria			
	Microscopio de barrido electrónico modelo ULTRA 55 del fabricante Zeiss	41,364 €/h	9 h	372,28 €
COSTE FASE :				484,78 €
Análisis DRX	Personal			
	Técnico de laboratorio	12,50 €/h	3 h	37,50 €
	Maquinaria			
	Difractómetro D2 PHASER del fabricante BRUKER	13,367 €/h	96 h	1.283,23 €
COSTE FASE :				1.320,73 €
TOTAL :				1.885,51 €

Tabla 1.8: Redacción del TFG

REDACCIÓN DEL TFG				
FASE	CONCEPTO	PRECIO UNITARIO	CANTIDAD	COSTE TOTAL
Redacción de la memoria	Personal			
	Ingeniero	22,25 €/h	220 h	4.895,00 €
COSTE FASE :				4.895,00 €
Revisión y corrección de errores	Personal			
	Tutor	31,25 €/h	12 h	375,00 €
COSTE FASE :				375,00 €
TOTAL :				5.270,00 €

1.5. Presupuesto de ejecución material

En la tabla 1.9 se muestra el un resumen del presupuesto. Por un lado, tenemos el presupuesto de ejecución material (PEM) que es la suma de los costes totales de cada fase.

Tabla 1.9: Presupuesto de ejecución material

CONCEPTO	IMPORTE
PLANIFICACIÓN DE PROYECTO Y REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	621,63 €
CARACTERIZACIÓN DE LAS ALEACIONES Y PREPARACIÓN METALOGRÁFICA	1.502,19 €
CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE LAS ALEACIONES	1.203,64 €
CARACTERIZACIÓN MICROESTRUCTURAL DE LAS ALEACIONES	1.885,51 €
REDACCIÓN DEL TFG	5.270,00 €
PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN MATERIAL	10.482,97 €

El presupuesto de ejecución material asciende a **10482,97 €**.

1.6. Presupuesto de ejecución por contrata

Por otro lado, tenemos el presupuesto de ejecución por contrata (PEC). Este se obtiene añadiendo al PEM un 13% por gastos generales y un 6% por beneficio industrial. A esta suma hay que añadirle el IVA (21%) y obtendríamos el PEC.

Tabla 1.10: Presupuesto de ejecución por contrata

PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN MATERIAL	10.482,97 €
Gastos generales (13%)	1.362,79 €
Beneficio industrial (6%)	628,98 €
Total	12.474,73 €
IVA (21%)	2.619,69 €
PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN POR CONTRATA	15.094,43 €

El presupuesto de ejecución por contrata asciende a la cantidad de **15094,43 €**.