

# ÍNDICE

<b>SIMBOLOS Y ABREVIATURAS.....</b>	<b>XV</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Antecedentes.....</b>	<b>3</b>
<b>1.2. Justificación.....</b>	<b>5</b>
<b>1.3. Objetivos.....</b>	<b>5</b>
1.3.1. Objetivo General.....	5
1.3.2. Objetivos Particulares.....	6
<b>1.4. Aportaciones De La Tesis.....</b>	<b>7</b>
<b>1.5. Limitaciones.....</b>	<b>8</b>
<b>2. PANORAMA CIENTÍFICO.....</b>	<b>11</b>
<b>2.1. El Titanio y sus Aleaciones.....</b>	<b>13</b>
2.1.1. Titanio CP.....	16
2.1.2. Aleaciones $\alpha$ .....	18
2.1.3. Aleaciones $\beta$ .....	19
2.1.4. Aleaciones $\alpha + \beta$ .....	20
<b>2.2. Métodos de obtención de polvo de titanio.....</b>	<b>22</b>
2.2.1. Proceso De Electrodo Rotatorio De Plasma.....	23
2.2.2. Proceso De Hidruración – Deshidruración.....	25
<b>2.3. Características exigibles a los implantes.....</b>	<b>26</b>
<b>2.4. Materiales comúnmente utilizados como implantes.....</b>	<b>31</b>
<b>2.5. Porosidad y tamaño de poro a desarrollar.....</b>	<b>40</b>
<b>2.6. Propiedades mecánicas a obtener.....</b>	<b>43</b>
<b>2.7. Particularidades de los metales porosos.....</b>	<b>44</b>

<b>2.8. Tratamientos térmicos aplicables sobre aleaciones de titanio.....</b>	<b>48</b>
<b>2.9. Métodos de modificación de la rigidez empleados en titanio.....</b>	<b>58</b>
<b>2.10. Tratamientos superficiales aplicables al titanio.....</b>	<b>66</b>
<b>3. PLANIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>77</b>
<b>3.1. Estudios Previos.....</b>	<b>80</b>
<b>3.2. Sinterización de Microesferas.....</b>	<b>85</b>
<b>3.3. Método de Espaciadores.....</b>	<b>87</b>
<b>4. DESARROLLO EXPERIMENTAL.....</b>	<b>91</b>
<b>4.1. Material de partida.....</b>	<b>93</b>
4.1.1. Descripción del material de partida.....	93
4.1.2. Caracterización del material de partida.....	95
4.1.2.1. Composición química y análisis granulométrico...	95
4.1.2.2. Fluidez, densidad aparente ( $\rho_a$ ) y densidad vibrada ( $\rho_{tap}$ ).....	98
4.1.2.3. Preparación metalográfica.....	102
4.1.2.4. Microscopia óptica (MO) y electrónica de barrido (MEB).....	103
4.1.2.5. Microdureza.....	105
<b>4.2. Obtención de piezas porosas por sinterización de microesferas y estudio de reactividad.....</b>	<b>109</b>
4.2.1. Desarrollo de piezas porosas por sinterización de microesferas.....	109
<b>4.3. Obtención de piezas porosas por el método de espaciadores.....</b>	<b>115</b>
4.3.1. Desarrollo de la investigación realizada.....	115
4.3.2. Proceso de obtención de piezas porosas por el método de espaciadores.....	119

<b>4.4. Caracterización de la pieza porosa.....</b>	<b>126</b>
4.4.1. Caracterización microestructural.....	126
4.4.1.1. Microscopía óptica (MO) y estereomicroscopía....	126
4.4.1.2. Microscopía electrónica de barrido (MEB).....	127
4.4.1.3. Microdureza.....	127
4.4.2. Densidad, porosidad y tamaño de poro.....	128
4.4.2.1. Densidad, y porosidad del sinterizado.....	128
4.4.2.2. Tamaño de poro y tamaño de poro teórico.....	132
4.4.3. Dimensiones de los cuellos de unión.....	132
4.4.4. Caracterización mecánica.....	134
4.4.4.1. Resistencia a flexión.....	135
4.4.4.2. Resistencia a compresión.....	137
4.4.4.3. Rigidez.....	139
4.4.5. Análisis de elementos.....	141
4.4.5.1. Análisis de carbono.....	141
4.4.5.2. Análisis de N y O <sub>2</sub> .....	142
4.4.6. Tratamientos térmicos.....	143
4.4.6.1. Tratamientos térmicos realizados en dilatómetro..	144
4.4.6.2. Tratamientos térmicos realizados en horno.....	145
4.4.7. Corrosión.....	147
<b>5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>153</b>
<b>5.1. Introducción.....</b>	<b>155</b>
<b>5.2. Estudios Previos.....</b>	<b>155</b>
5.2.1. Análisis de la reactividad con el molde.....	156
5.2.1.1 Reactividad con los moldes de gres.....	157
5.2.1.2 Reactividad con los moldes de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	182
5.2.1.3 Reactividad con los moldes de circona.....	171
5.2.1.4 Reactividad con los moldes de Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	175

5.2.1.5. Microdureza.....	177
5.2.1.6 Discusión y conclusiones parciales de la reactividad del titanio con los distintos moldes empleados.....	179
5.2.2. Pruebas previas realizadas por la tecnica de espaciadores.....	184
5.2.2.1 Porosidad y observaciones al proceso de obtención.....	184
5.2.2.2 Resistencia a flexión y rigidez de las piezas porosas obtenidas.....	187
<b>5.3. Piezas porosas obtenidas por sinterización de microesferas.....</b>	<b>193</b>
5.3.1. Caracterización microestructural.....	193
5.3.1.1. Microscopia óptica (MO), estereomicroscopía y microscopia electrónica de barrido (MEB).....	193
5.3.2. Densidad, porosidad y tamaño de poro.....	197
5.3.2.1. Tamaño de poro teórico.....	201
5.3.2.2. Conclusiones parciales de la porosidad, densidad y tamaño de poro de la pieza porosa.....	203
5.3.3. Dimensiones de los cuellos de unión.....	204
5.3.4. Caracterización mecánica.....	209
5.3.4.1. Resistencia a flexión.....	209
5.3.4.2. Rigidez a flexión.....	219
5.3.4.3 Discusión y conclusiones parciales de las propiedades mecánicas obtenidas por sinterización de microesferas.....	226
5.3.5. Análisis de elementos.....	229
5.3.5.1. Análisis de carbono .....	229
5.3.5.2. Análisis de N y O <sub>2</sub> .....	230

5.3.6. Tratamientos Térmicos.....	232
5.3.6.1. Tratamientos térmicos realizados en dilatómetro..	232
5.3.6.1.1. Transformaciones dilatométricas en los ciclos B y BT.....	235
5.3.6.1.2. Transformaciones dilatométricas en los ciclos S y ST.....	239
5.3.6.2. Tratamientos térmicos realizados en horno.....	241
5.3.6.2.1. Microestructura de las muestras tratadas térmicamente en horno.....	246
5.3.6.2.2. Propiedades mecánicas de las muestras tratadas térmicamente en horno.....	247
5.3.6.3. Conclusiones parciales de la aplicación de tratamientos térmicos.....	250
<b>5.4. Piezas Porosas Obtenidas Por El Método De Espaciadores.....</b>	<b>251</b>
5.4.1. Observaciones al proceso de obtención.....	251
5.4.2. Caracterización microestructural.....	255
5.4.3. Densidad, porosidad y tamaño de poro.....	260
5.4.3.1. Densidad, porosidad y tamaño de poro.....	260
5.4.3.2. Conclusiones parciales de densidad, porosidad y tamaño de poro de las piezas porosas de ti64 realizadas por el método de espaciadores.....	264
5.4.4. Caracterización mecánica.....	265
5.4.4.1. Influencia del tiempo de espera entre la compactación y la eliminación del espaciador.....	267
5.4.4.2. Resistencia a flexión de la las piezas porosas base de la investigación.....	270
5.4.4.3. Resistencia a compresión.....	279
5.4.4.4. Rigidez de las piezas porosas base de la presente investigación.....	285

5.4.4.5. Modelos matemáticos de correlación entre la densidad relativa y las propiedades mecánicas de las piezas porosas de $\text{Ti6Al4V}$ obtenidas mediante el método de espaciadores.....	287
5.4.4.6. Conclusiones parciales de la caracterización mecánica de las piezas porosas de $\text{Ti6Al4V}$ desarrolladas por el método de espaciadores.....	291
5.4.5. Análisis de elementos.....	295
5.4.5.1. Análisis de carbono .....	296
5.4.5.2. Análisis de N y $\text{O}_2$ .....	297
5.4.6. Corrosión.....	299
5.4.6.1. Resultados de corrosión y discusión.....	300
5.4.6.2. Conclusiones parciales de la corrosión en piezas obtenidas por el método de espaciadores.....	306
<b>6. CONCLUSIONES.....</b>	<b>307</b>
<b>7. INVESTIGACIONES FUTURAS.....</b>	<b>317</b>
<b>8. BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>323</b>
8.1. Bibliografía.....	325
8.2. Webs Consultadas.....	339
<b>ANEXOS</b>	
ANEXO 1. Microestructura de las piezas porosas desarrolladas por sinterización de microesferas y tras los tratamientos térmicos realizados.....	341
ANEXO 2. Publicaciones derivadas de la presente tesis.....	353