

## **INDICE DE FIGURAS**

|                                                                                                                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura I.1-1. Calidad de los huesos en función de la edad y el sexo del ser humano.....                                                                               | 14 |
| Figura I.1-2. Esperanza de vida y calidad de los tejidos (adaptado) .....                                                                                             | 15 |
| Figura I.1-3. Crecimiento de tejido fibroso .....                                                                                                                     | 16 |
| Figura I.1-4. Fallo por fatiga de un biomaterial.....                                                                                                                 | 17 |
| Figura I.1-5. Reabsorción ósea del hueso.....                                                                                                                         | 18 |
| Figura I.1-6. Porcentaje de supervivencia por tiempo de implantación .....                                                                                            | 18 |
| Figura I.1-7. Influencia del estado de carga en la degradación del tejido óseo.....                                                                                   | 19 |
| Figura I.2-1. Equilibrio mecánico y biofuncional.....                                                                                                                 | 22 |
| Figura II.1-1. Ejemplos de prótesis en el cuerpo humano.....                                                                                                          | 28 |
| Figura II.4-1. Composición ósea base.....                                                                                                                             | 40 |
| Figura II.4-2. Morfología del Hueso.....                                                                                                                              | 41 |
| Figura II.4-3. Ensayo real sobre una prótesis y esquema de la influencia de la dirección<br>de la aplicación de la carga en las curvas esfuerzo deformación [62]..... | 43 |
| Figura II.4-4. Curva tensión-deformación para distintas densidades óseas.....                                                                                         | 44 |
| Figura II.4-5. Influencia de la edad del hueso en el comportamiento mecánico del<br>mismo [62].....                                                                   | 44 |
| Figura II.4-6. Configuración de cargas en el hueso. ....                                                                                                              | 45 |
| Figura II.4-7. Semejanzas del hueso con estructuras ingenieriles .....                                                                                                | 45 |
| Figura II.5-1: Situación del elemento Titanio (Ti) en la tabla periódica de los elementos<br>.....                                                                    | 46 |
| Figura II.5-2: Martin Heinrich Klaproth.....                                                                                                                          | 47 |
| Figura II.5-3: Evolución del precio del Titanio en el año 2009.....                                                                                                   | 48 |
| Figura II.5-4: Estructuras cristalinas del Ti. Izquierda: $\alpha$ Ti (HC). Derecha: $\beta$ Ti (CC).....                                                             | 49 |
| Figura II.5-5: Ejemplo de microestructuras de aleaciones de Ti.....                                                                                                   | 49 |
| Figura II.5-6: Rangos de variación de los valores de límite elástico específico de distintas<br>familias de aleaciones en función de la temperatura.....              | 51 |
| Figura II.5-7: Esquema de obtención del titanio según el proceso Kroll.....                                                                                           | 54 |
| Figura II.5-8: Materia prima de Titanio .....                                                                                                                         | 55 |
| Figura II.5-9: Ejemplo de piezas moldeadas.....                                                                                                                       | 56 |
| Figura II.5-10: Ejemplo de piezas fabricadas por fundición.....                                                                                                       | 56 |
| Figura II.5-11: Titanio en polvo.....                                                                                                                                 | 57 |
| Figura II.5-12: Proceso de obtención de Titanio por pulvimetalurgia convencional. ....                                                                                | 58 |
| Figura II.5-13: Pieza de Titanio obtenida por forja .....                                                                                                             | 59 |
| Figura II.5-14: Soldado del titanio.....                                                                                                                              | 60 |
| Figura II.5-15: Recubrimiento con óxido de titanio.....                                                                                                               | 61 |
| Figura II.5-16: Tipo de aleación dependiendo de la temperatura y la cantidad de<br>estabilizador beta.....                                                            | 62 |

|                                                                                                                                                                                               |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura II.5-17: Influencia de la temperatura de conformado sobre las propiedades mecánicas y el tamaño de grano de las aleaciones alfa .....                                                  | 64  |
| Figura II.5-18: Esquema del diagrama de equilibrio pseudo-binario del sistema titanio-estabilizadores beta con la curva Ms y los rangos de formación de la fase alfa y beta superpuestas..... | 66  |
| Figura II.5-19: Influencia de la presencia de aluminio en la propiedades a tracción a elevada temperatura en las aleaciones alfa-beta .....                                                   | 68  |
| Figura II.5-20: Influencia de la temperatura de conformado sobre las propiedades mecánicas y el tamaño de grano de las aleaciones alfa-beta.....                                              | 68  |
| Figura II.5-21: Efecto de los elementos de aleación en la microestructura de las propiedades del titanio.....                                                                                 | 70  |
| Figura II.6-1: Clasificación de tratamientos empleados en el Ti c.p. para implantes dentales .....                                                                                            | 76  |
| Figura III.1-1. Diagramas de fases en equilibrio: (a) sistema Ti-O, (b) sistema Ti-N, (c) sistema Ti-Fe y (d) sistema Ti-Si .....                                                             | 82  |
| Figura III.1-2: Distribución granulométrica del polvo .....                                                                                                                                   | 82  |
| Figura III.1-3: Morfología de los polvos de Titanio SE-JONG 4 obtenida mediante microscopía electrónica de barrido (SEM).....                                                                 | 83  |
| Figura III.1-4: Microscopía óptica de los polvos de Titanio SE-JONG 4. Ataque Kroll.....                                                                                                      | 83  |
| Figura III.1-5. (a) Montaje, (b) Fluidímetro de Hall .....                                                                                                                                    | 84  |
| Figura III.1-6. Curva de compresibilidad del polvo del titanio .....                                                                                                                          | 85  |
| Figura III.1-7: Composición granulométrica del 'Space Holder' .....                                                                                                                           | 87  |
| Figura III.2-1. Túrbula T2C .....                                                                                                                                                             | 88  |
| Figura III.2-2 Curvas de compresibilidad. Variación de la densidad relativa con la presión y % de espaciador.....                                                                             | 89  |
| Figura III.2-3 Variación de la porosidad en verde con la presión y % de espaciador.....                                                                                                       | 90  |
| Figura III.2-4 Esquema de las probetas y nomenclatura utilizada .....                                                                                                                         | 90  |
| Figura III.2-5. SUZPECAR 600 kN .....                                                                                                                                                         | 92  |
| Figura III.2-6. MALICET ET BLIN U-30.....                                                                                                                                                     | 92  |
| Figura III.2-7: Extracción del agua destilada.....                                                                                                                                            | 94  |
| Figura III.2-8: Recisplac P SELECTA .....                                                                                                                                                     | 94  |
| Figura III.2-9: Estufa CARBOLITE .....                                                                                                                                                        | 95  |
| Figura III.3-1: Horno de sinterización CARBOLYTE STF con sistema de vacío .....                                                                                                               | 96  |
| Figura III.3-2 Rampa de Calentamiento .....                                                                                                                                                   | 96  |
| Figura III.3-3: Colocación de las probetas dentro del horno de sinterización.....                                                                                                             | 97  |
| Figura III.4-1. Balanza OHAUS EXPLORER PRO .....                                                                                                                                              | 99  |
| Figura III.5-1 Equipo de ultrasonidos KRAUTKRAMER USM 35 .....                                                                                                                                | 101 |
| Figura III.5-2 (a) Palpador PANAMERIC S-NDT PF4R-10; (b) Palpador PANAMETRIC S V153 .....                                                                                                     | 101 |
| Figura III.6-1: Ilustración del proceso de corte.....                                                                                                                                         | 103 |
| Figura III.6-2 Cortadora STRUERS SECOTOM-10.....                                                                                                                                              | 103 |

|                                                                                                                                                                                                                                                     |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura III.6-3. Empastilladora BUEHLER/METASERV PNEUMET.....                                                                                                                                                                                        | 104 |
| Figura III.6-4: Lijadora STRUERS KNUTH-ROTOR-3.....                                                                                                                                                                                                 | 105 |
| Figura III.6-5: Microscopio NIKON EPIPHOT 20.....                                                                                                                                                                                                   | 106 |
| Figura IV.1-1: Esquema de las muestras y nomenclatura utilizada.....                                                                                                                                                                                | 109 |
| Figura IV.2-1: Resumen de gráficas para evaluación de la reproducibilidad del protocolo de eliminación de NaCl planteado.....                                                                                                                       | 110 |
| Figura IV.2-2: Influencia de la presión de compactación en la eliminación del NaCl.....                                                                                                                                                             | 112 |
| Figura IV.2-3: Influencia del diseño de las muestras en la eliminación del espaciador.....                                                                                                                                                          | 114 |
| Figura IV.2-4: Resumen de la influencia del diseño de las muestras.....                                                                                                                                                                             | 115 |
| Figura IV.2-5: Estado de las muestras en cada paso de los ciclos.....                                                                                                                                                                               | 116 |
| Figura IV.3-1 Porosidad Total (PT) y Porosidad interconectada encontrada en las probetas comparadas con la porosidad teórica.....                                                                                                                   | 118 |
| Figura IV.3-2: a) Comparación de la PT y PI de de las probetas de combinaciones de 30 y 50%, b) Comparación de la PT y PI de de las probetas de combinaciones de 50 y 70%, c) Comparación de la porosidad total frente al diseño de la muestra..... | 119 |
| Figura IV.4-1 Fotografías a vista de microscopio (5X) de las muestras cortadas longitudinalmente.....                                                                                                                                               | 121 |
| Figura IV.4-2: Detalle del aspecto de las muestras a vista de microscopio.....                                                                                                                                                                      | 122 |
| Figura IV.5-1: Resultados ensayo a compresión.....                                                                                                                                                                                                  | 124 |
| Figura IV.5-2: Efecto de la presión de compactación de las muestras en los ensayos a compresión.....                                                                                                                                                | 125 |
| Figura IV.5-3: Influencia de los diseños en el ensayo a compresión.....                                                                                                                                                                             | 126 |
| Figura IV.5-4 Tensión de fluencia en función de la combinación de capas frente a la porosidad total calculado por Arquímedes.....                                                                                                                   | 128 |
| Figura IV.6-1 Valores del modulo de Young dinámico en términos de porosidad de las muestras.....                                                                                                                                                    | 129 |
| Figura IV.6-2: Diagrama de comparación del módulo de <i>Young</i> de los valores obtenidos a través de la metalurgia de polvos convencionales y por la técnica de espaciadores.....                                                                 | 130 |
| Figura IV.7-1 Relación entre el módulo de Young dinámico y el obtenido mediante ensayos de compresión.....                                                                                                                                          | 131 |
| Figura IV.7-2: Diagrama de comparación del módulo de <i>Young</i> dinámico de los valores obtenidos a través de la metalurgia de polvos convencionales y por la técnica de espaciadores.....                                                        | 132 |

## **INDICE DE TABLAS**

|                                                                                                                                                              |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabla II.1-1. Propiedades y aplicaciones de los biomateriales .....                                                                                          | 31  |
| Tabla II.1-2. Propiedades mecánicas de los biomateriales comúnmente más utilizados [54].....                                                                 | 32  |
| Tabla II.2-1. Estadística sobre la cantidad de aparatos biomédicos consumidos en E.E.U.U. en al año 1997 según el national Institutes of Health (NIH) [55].. | 34  |
| Tabla II.2-2. Estadística sobre el mercado de los biomateriales y de la salud en general en E.E.U.U. [53]. .....                                             | 35  |
| Tabla II.4-1. Propiedades Mecánicas del hueso cortical [62]. .....                                                                                           | 41  |
| Tabla II.4-2 Propiedades Mecánicas del hueso trabecular [62].....                                                                                            | 42  |
| Tabla II.5-1: Propiedades físicas del titanio .....                                                                                                          | 50  |
| Tabla II.5-2: Características mecánicas del titanio puro y de algunas de sus aleaciones [65].....                                                            | 52  |
| Tabla II.5-3: Clasificación del Titanio según la norma ASTM F67 .....                                                                                        | 53  |
| Tabla II.5-4: Resumen y comparación de las principales propiedades de las aleaciones de titanio .....                                                        | 69  |
| Tabla II.5-5: Composición química del Ti-6Al-4V .....                                                                                                        | 71  |
| Tabla II.5-6: Principales propiedades de la aleación Ti-6Al-4V .....                                                                                         | 72  |
| Tabla III.1-1. Composición en tanto por ciento (%p/p) de los polvos de titanio .....                                                                         | 79  |
| Tabla III.1-2. Composición química (% en peso) de los cuatro grados de Ti c.p. para aplicaciones biomédicas.....                                             | 80  |
| Tabla III.1-3. Propiedades mecánicas requeridas a los cuatro grados de Ti c.p. para aplicaciones médicas .....                                               | 80  |
| Tabla III.1-4. Propiedades de los polvos .....                                                                                                               | 85  |
| Tabla III.1-5. Composición en tanto por ciento (%p/p) del NaCl utilizado.....                                                                                | 86  |
| Tabla III.1-6. Propiedades físicas del NaCl .....                                                                                                            | 86  |
| Tabla III.2-1. Masa de Ti y NaCl según sus porcentajes .....                                                                                                 | 87  |
| Tabla III.2-2: Densidad relativa y porosidad en verde estimada a partir de las curvas de compresibilidad de Ti+NaCl .....                                    | 89  |
| Tabla III.2-3: Masa de la Mezcla .....                                                                                                                       | 91  |
| Tabla III.2-4 Parámetros utilizados en la eliminación de espaciador .....                                                                                    | 93  |
| Tabla IV.2-1: Porosidades teóricas de las muestras.....                                                                                                      | 113 |
| Tabla IV.3-1: Resultados de porosidad obtenidos mediante Arquímedes .....                                                                                    | 117 |
| Tabla IV.5-1 Porosidad total, módulo de Young corregido y sin corregir calculada a partir del ensayo a compresión .....                                      | 127 |
| Tabla IV.5-2 Porosidad total y tensión de fluencia calculada a partir del ensayo a compresión.....                                                           | 128 |
| Tabla IV.6-1 Valores de Módulo de Young y porosidad total.....                                                                                               | 129 |

