

Índice de figuras

1.1. Efecto de la edad en la resistencia mecánica del hueso y en la probabilidad de fractura (adaptado de [1]).....	2
1.2. Incremento en la esperanza de vida en los Estados Unidos y Europa durante el siglo XX (adaptado de [1]).....	3
1.3. Estructura del hueso cortical [3].....	7
1.4. Evolución microestructural de la aleación Ti6Al4V en función de la temperatura máxima y la velocidad de enfriamiento [23].....	13
1.5. Microestructura típica de la aleación Ti6Al4V mill annealed de grado médico [23].....	14
1.6. Espectro de bioactividad para varios implantes biocerámicos [15]: A) Velocidad relativa de bioreactividad; B) Dependencia con el tiempo de la formación del enlace con el hueso en la intercara.....	22
1.7. Comparación del espesor interfacial (μm) de la capa de reacción en implantes bioactivos o tejido fibroso de biocerámicos inactivos [15].....	23
1.8. Fractura por impacto torsional de BGC (Bioglass [®] -ceramic) 45S5 utilizado en reemplazo de hueso de mono. Nótese la intercara enlazada (I) [1].....	24
1.9. Dependencia del enlace de los vidrios bioactivos con el hueso y con el tejido blando, con la composición química (% en peso). Todas las composiciones en la región A tienen un contenido fijo de 6% en peso de P_2O_5 [15].....	30

1.10. Secuencia de las reacciones interfaciales para formar el enlace entre el vidrio bioactivo y el hueso [15].....	32
1.11. Mapa de procesamiento del recubrimiento de vidrio 6P57 sobre Ti6Al4V [67].....	34
1.12. Sección transversal del recubrimiento de vidrio 6P57 sobre Ti6Al4V [67].....	35
1.13. Evolución de la intercara vidrio/metal durante la calcinación [71].....	36
1.14. Estructura de la capa interfacial de Ti_5Si_3 formada por la reacción entre el vidrio y el metal [71].....	37
1.15. Diagrama ternario de composición que muestra los rangos adecuados para recubrir satisfactoriamente el Ti c.p. y el Ti6Al4V. El contenido de P_2O_5 esta fijado en 6 % en peso [69].....	38
1.16. Esquema del recubrimiento bicapa con capa externa bioactiva (6P53B+5HA). La capa interna ($\uparrow SiO_2$) garantiza la estabilidad mecánica, mientras la capa externa ($\downarrow SiO_2$) permite la precipitación de HCA en presencia del fluido fisiológico, presentando fisuración por efecto de la corrosión bajo tensión.....	39
1.17. Micrografías de las secciones histológicas de los implantes utilizados en el estudio en el defecto de tibia de cerdo. Nótese que el implante recubierto ha promovido mayor formación de hueso laminar en la matriz ósea adyacente a la intercara después de 6 meses de implantado [74].....	40
1.18. Ejemplo de un implante dental de titanio diseñado por Brånemark y perteneciente a la empresa NobelBiocare [76].....	42
1.19. La intercara se encarga de soportar el implante a través de tensiones que se transmiten al tejido [77].....	43
1.20. Distribución de tensiones alrededor de un implante para una carga vertical pura de 100 N: a) Adhesión perfecta en la intercara implante-hueso; b) Contacto puro en la intercara [78].....	43
1.21. Comparación de las tensiones de tracción axiales máximas y mínimas en una prótesis de cadera en condiciones estática y dinámica [84].....	44
1.22. Ejemplos de elementos biomecánicos en los cuales predominan las tensiones por contacto [91].....	47
1.23. Ilustración del contacto Hertziano después de la deformación debida a una carga normal [97].....	48

1.24.	Componentes del tensor de tensiones en coordenadas cilíndricas.....	53
1.25.	Distribución de las tensiones debido al contacto Hertziano: a) A lo largo del eje de carga; b) En la superficie [96].....	54
1.26.	Contornos del campo de tensiones Hertziano en unidades de p_0 para $n = 0.22$: a) Tensión normal principal, s_1 ; b) Tensión normal principal, s_3 ; c) Tensión de cizalladura principal, $t_{13} = 1/2 (s_1 - s_3)$. Las curvas punteadas en (a) corresponden a las trayectorias de la tensión s_3 [98].....	55
1.27.	Modos de daño posibles durante el contacto Hertziano monotónico de un sólido monolítico. Modos de daño frágil: fisura tipo anillo (A) y tipo cónica (C); modo de daño dúctil: daño cuasiplástico (Y).....	57
1.28.	Gráfica de P_{CC}/r vs. r para un vidrio de soda-cal pulido e indentado con esfera de acero. La curva inclinada corresponde a la predicción para un defecto sometido a una tensión uniforme s_m [98].....	61
1.29.	Esquema de los parámetros geométricos de la fisura cónica [98].....	61
1.30.	Curvas del factor de intensidad de tensiones para la fractura cónica normalizado, $K_a(c/a)/K_{Ic}^0$, para $b^* = 1$ y $n = 0.3$. Las flechas indican la evolución del defecto superficial hasta la fisura cónica completa [98].....	62
1.31.	Vista superior y transversal de la impresión residual debida al contacto con una esfera de WC-Co sobre un acero blando [112].....	64
1.32.	Esquema de la evolución de la zona deformada plásticamente al aumentar la carga en un ensayo Hertziano [97].....	65
1.33.	Vista superior y transversal del daño cuasiplástico generado en una vitrocerámica maquinable debido al contacto con una esfera de WC-Co [119].....	67
1.34.	Detalle del daño subsuperficial en la Fig. 1. 33 donde se pueden observar las microfisuras y su coalescencia debido al campo de tensión de cizalladura [119].....	67
1.35.	Modelo de un defecto por deslizamiento con las microfisuras (“alas”) asociadas [98].....	68
1.36.	Modos de daño posibles durante el contacto Hertziano monotónico en un recubrimiento monocapa: fisura tipo anillo (A), fisura cónica (C), fisura circular	

(C _i), fisura radial (R), daños plásticos ó cuasiplásticos (Y) (Adaptado de [97]).....	70
1.37. Vista superior (a) y transversal (b) de la fisura cónica formada durante el contacto Hertziano monotónico de un recubrimiento de vidrio erosionado en la superficie sobre sustrato de policarbonato [122].....	73
1.38. Fisura radial formada en un recubrimiento de vidrio (superficie inferior erosionada) sobre policarbonato durante el contacto Hertziano monotónico: Vista inferior (a) y lateral (b), ambas <i>in situ</i> [122].....	75
1.39. Daño cuasi-plástico en un recubrimiento de Al ₂ O ₃ -TiO ₂ (d = 450 μm) sobre acero durante el contacto Hertziano monotónico [130].....	76
1.40. Deformación plástica del sustrato de acero recubierto con Al ₂ O ₃ -TiO ₂ (d = 125 μm) durante el contacto Hertziano monotónico [130].....	77
1.41. Mapas de predicción del primer modo de daño interfacial: a) Fisuras radiales frente a la deformación plástica en el recubrimiento; b) Fisuras radiales frente a la deformación plástica del sustrato. Diagramas calculados para n _R = 0.22 y n _S = 0.3 [97].....	80
1.42. Mapas de predicción del primer modo de daño interfacial: deformación plástica en el recubrimiento frente a la deformación plástica en el sustrato. Diagramas calculados para n _R = 0.22 y n _S = 0.3 [97].....	82
1.43. Modos de daño posibles durante el contacto Hertziano monotónico en un recubrimiento bicapa: fisura tipo anillo (A), fisura cónica (C), fisura circular (C _i), fisura radial (R), daños plásticos ó cuasiplásticos (Y) (Adaptado de [97]).....	83
1.44. Modos de daño en un sistema bicapa vidrio/zafiro/policarbonato durante el contacto Hertziano monotónico: a) Predominio de la fisura cónica debido a la superficie exterior del vidrio erosionada; b) Predominio de la fisura radial ya que la superficie inferior del vidrio esta erosionada [97].....	85
2.1. Esquema del proceso de fabricación de los vidrios monolíticos (F = fundido y S = sinterizado) y del recubrimiento de vidrio (C).....	96
2.2. Esquema del proceso de fabricación de los recubrimientos de vidrio por inmersión.....	99

2.3. Esquema del proceso de preparación de las muestras para su observación al microscopio óptico.....	101
2.4. Esquema de la metodología de ensayos por contacto Hertziano monotónico.....	109
2.5. Esquema de la metodología empleada para la determinación del tiempo para la formación de la fisura anillo bajo contacto Hertziano estático.....	111
2.6. Esquema de la metodología empleada para los ensayos de contacto Hertziano sobre el recubrimiento bicapa (6P64/6P53B+5HA) en presencia de SBF.....	116
2.7. Montaje para los ensayos de contacto Hertziano sobre el recubrimiento bicapa (6P64/6P53B+5HA) en presencia de SBF.....	117
2.8. Esquema de la formación de las fisuras media/radial y lateral debido a la indentación Vickers [86]: a) Evolución durante la fase de carga (+) y descarga (-); b) Parámetros geométricos de las fisuras.....	118
2.9. Fisuras cónicas debido al contacto Hertziano deslizante (izquierda a derecha) [138]: a) Vista superior; b) Vista transversal después de un ataque ácido.....	121
2.10. Esquema del ensayo de rayado representado como de tres contribuciones [140]: el campo debido a la indentación, la tensión residual en el recubrimiento y la tensión debida a la fricción.....	123
2.11. Estado de tensiones localizado debido al ensayo de rayado [141].....	123
2.12. Tipos de daño y sus mecanismos durante un ensayo de rayado [141].....	124
2.13. Equipamiento utilizado para los ensayos de rayado.....	125
2.14. Parámetros característicos que resultan de un ensayo de indentación instrumentalizada [143].....	126
2.15. Esquema del ciclo de carga tipo CSM [143].....	129
2.16. Equipo utilizado para los ensayos de nanoindentación instrumentada: Nanoindenter XP-MTS.....	130
3.1. Porosidad superficial de los recubrimientos monocapa 6P61C para diferentes tiempos de calcinación: a) 15 s; b) 20 s; c) 30 s.....	134
3.2. Microestructura revelada después del ataque ácido de la sección transversal del recubrimiento: a) 15 s; b) 20 s; c) 30 s.....	137

3.3. Perfiles elementales por análisis EDS de Ti y Si en la sección transversal de los recubrimientos con diferentes tiempos de calcinación.....	139
3.4. Mapping de Ti (en rojo) por EDS sobre las secciones transversales de los recubrimientos con diferentes tiempos de calcinación: a) 15 s; b) 20 s; c) 30 s.....	141
3.5. Fotografías de TEM de la intercara de los recubrimientos con diferentes tiempos de calcinación: a) 15 s; b) 20 s; c) 30 s.....	143
3.6. Perfil lineal asociado (EPMA) de la sección transversal del recubrimiento 6P61C-15.....	144
3.7. Patrones de difracción de rayos X de los recubrimientos con diferentes tiempos de calcinación.....	145
3.8. Patrón de difracción de rayos X del vidrio monolítico fundido 6P61.....	145
3.9. Secuencia de daños durante el contacto Hertziano monotónico de los recubrimientos con diferentes tiempos de calcinación.....	147
3.10. Secuencia del daño y condiciones críticas debido al contacto esférico deslizante (ensayo de rayado) sobre el recubrimiento 6P61C-20.....	149
3.11. Secuencia del daño y condiciones críticas debido al contacto uniaxial sobre el recubrimiento 6P61C-20, utilizando la misma punta esférica del ensayo de rayado.....	150
3.12. Evolución del coeficiente de fricción correspondiente al ensayo de rayado representado en la Fig. 3.10b.....	151
3.13. Carga crítica para el desprendimiento definitivo del recubrimiento, P_{dc4} , durante el ensayo de rayado de muestras con diferente tiempo de calcinación.....	152
3.14. Indentación Vickers ($P = 1.2$ kg) en la intercara entre un recubrimiento 6P57 y el sustrato de Ti6Al4V [67].....	153
3.15. Evolución de las indentaciones Vickers en la intercara de dos recubrimientos con diferentes tiempos de calcinación.....	154
3.16. Esquema del posible mecanismo asociado a la formación de las fisuras debido a la indentación Vickers en la intercara de la Fig. 3.15.....	155
3.17. Fisura de indentación Vickers ($P = 0.49$ N) realizada en el seno de recubrimiento.....	157
3.18. Mapa-resumen de la influencia del tiempo de calcinación en las características microestructurales y respuesta mecánica al contacto Hertziano.....	159

3.19. Porosidad superficial del recubrimiento monocapa 6P64C (a) y de los correspondientes vidrios sinterizado 6P64S (b) y fundido 6P64F (c).....	162
3.20. Mapping de Ti sobre la sección transversal del recubrimiento 6P64C.....	163
3.21. Características microestructurales del recubrimiento monocapa y de los vidrios monolíticos.....	164
3.22. Patrón de difracción de rayos X del recubrimiento 6P64C.....	165
3.23. Límites de referencia para la estimación del porcentaje volumétrico de la fase cristalina $2.4\text{CaO}\cdot 0.6\text{Na}_2\text{O}\cdot \text{P}_2\text{O}_5$	166
3.24. Mapa de secuencia de daños durante el contacto Hertziano monotónico con diferentes radios de esfera.....	167
3.25. Morfología de los daños que aparecen en el recubrimiento 6P64C durante un ensayo Hertziano monotónico con un radio de esfera de WC-Co $R_e = 1.25$ mm.....	170
3.26. Morfología de los daños que aparecen en el vidrio sinterizado 6P64S durante un ensayo Hertziano monotónico con un radio de esfera de WC-Co $R = 1.25$ mm.....	172
3.27. Morfología de los daños que aparecen en el vidrio fundido 6P64F durante un ensayo Hertziano monotónico con un radio de esfera de WC-Co $R_e = 1.25$ mm.....	174
3.28. Distribución de la tensión principal de cizalladura, t_{13} , con diferentes radios de esfera y cargas de contacto, para valores del modulo de Young entre el del vidrio y el del Ti6Al4V.....	175
3.29. Esquema del procedimiento de flexión elástica de una barra para verificar la presencia de huella residual en el sustrato.....	177
3.30. Microfisuración superficial del recubrimiento 6P64C observada mediante microscopía electrónica de barrido ambiental.....	178
3.31. Superficie de fractura debajo de la zona de contacto de una muestra de vidrio sinterizado 6P64S con fisuras radiales.....	179
3.32. Evolución del patrón de interferencia debido a la delaminación del recubrimiento 6P64C durante cargas Hertzianas monotónicas.....	180
3.33. Demostración experimental clásica de los anillos de Newton mediante el contacto de una lente convexa sobre un vidrio plano.....	181

3.34. Huella residual en el sustrato debido a la deformación plástica durante la delaminación por contacto Hertziano monotónico.....	182
3.35. Esquema del mecanismo de la delaminación durante el contacto Hertziano monotónico.....	183
3.36. Mapa comparativo de la secuencia de daños durante el contacto Hertziano monotónico sobre el recubrimiento y los vidrios monolíticos.....	185
3.37. Mapa comparativo de la secuencia de daños durante el contacto Hertziano monotónico sobre el recubrimiento y los vidrios monolíticos para un radio de esfera de diamante de 25 μm	186
3.38. Morfología de los daños durante el contacto Hertziano monotónico con punta esférica de diamante ($R = 25 \mu\text{m}$) en el recubrimiento y en los vidrios monolíticos.....	188
3.39. Curvas $P - h$ del recubrimiento y los vidrios monolíticos obtenidas por contacto con punta esférica de diamante con radio $R_e = 25 \mu\text{m}$	190
3.40. Distribución de la tensión principal de cizalladura, t_{13} , con un radio de esfera $R_e = 25 \mu\text{m}$ y diferentes cargas de contacto, para valores del modulo de Young entre el del vidrio y el del Ti6Al4V.....	191
3.41. Esquema del defecto semi-circular precursor de la formación de la fisura anillo durante el contacto Hertziano monotónico.....	194
3.42. Poros superficiales precursores de la fisura anillo observados experimentalmente en el recubrimiento.....	194
3.43. Distribución de la tensión radial en la dirección z , $S_r(z)$, evaluada para $x = r_c$ y para diferentes valores de carga, a partir de la ec. (1.17).....	195
3.44. Funciones geométricas de la elipticidad de la fisura semi-elíptica para el factor de intensidad de tensiones debido a la tensión radial de contacto Hertziano.....	197
3.45. Evaluación de los posibles valores de K_{Ic} en función del defecto crítico utilizando la ec. (3.12) para los valores de P_{ca} determinados experimentalmente.....	199
3.46. Tensión residual en el recubrimiento debida al desajuste en expansión térmica con respecto al sustrato.....	201
3.47. Variación de la distancia interplanar del plano difractante en la fase cristalina del recubrimiento en función del $\sin^2\psi$	202

3.48. Comportamiento de K_{Ic} del recubrimiento en función del factor de incremento de s_{rmax} debido a la deformación plástica del sustrato, F_{ys}	204
3.49. Valores del factor de intensidad de tensiones debido a las tensiones concentradas en la superficie de un implante dental roscado.....	206
3.50. Esquema del sistema de fisuras media/radial y lateral debido a la indentación Vickers en un recubrimiento frágil.....	207
3.51. Fisuras de indentación Vickers en el recubrimiento y en los vidrios monolíticos para diferentes cargas de indentación.....	208
3.52. Evolución de la longitud de la fisura de indentación Vickers, c , en el recubrimiento y los vidrios monolíticos.....	210
3.53. Tenacidad de fractura del recubrimiento y de los vidrios monolíticos en función de la carga de indentación.....	211
3.54. Gráfico de $c_r P/c^{3/2}$ vs. $y_0 c^{1/2}$ (ec. 2.9) para el recubrimiento y los vidrios monolíticos.....	212
3.55. Forma transversal de las fisuras de indentación Vickers en el recubrimiento para diferentes cargas de indentación.....	214
3.56. Comportamiento de la elipticidad de la fisura de indentación Vickers observada experimentalmente en el recubrimiento.....	216
3.57. Sistema de la fisura media-radial.....	217
3.58. Factor de corrección del factor de intensidad de tensiones debido al cambio en la elipticidad de la fisura de indentación Vickers [174].....	221
3.59. Factor geométrico del factor de intensidad de tensiones debido a la tensión residual en términos de la elipticidad de la fisura.....	223
3.60. Introducción de los factores de corrección de elipticidad en los factores de intensidad de tensiones de la ec. (2.9).....	225
3.61. Introducción de la modificación de los componentes del factor de intensidad de tensiones en la ec. (2.9) debido a la presencia de un material elásticamente diferente.....	226
4.1. Morfología de las fisuras anillo debidas al contacto Hertziano estático ($P_{max} = 35$ N) sobre el recubrimiento monocapa 6P64C.....	236

4.2. Tiempo para la formación de la fisura anillo en el recubrimiento 6P64C, t_f , para diferentes valores de carga estática aplicada, P_{max}	237
4.3. Esquema del modelo de formación de la fisura anillo por coalescencia de fisuras pre-existentes durante un ensayo de contacto Hertziano estático.....	239
4.4. Imágenes de la fisura anillo formada en el recubrimiento 6P64C durante el contacto Hertziano estático: a) Fotografía de microscopía óptica; b) Fotografía de SEM.....	241
4.5. Factor de intensidad de tensiones en el punto superficial de una fisura pre-existente cerca del círculo de contacto.....	243
4.6. Imagen de AFM que muestra un detalle de la fisura anillo formada en el recubrimiento 6P64C debido al contacto Hertziano estático.....	244
4.7. Determinación de la relación de aspecto crítica para el inicio del crecimiento de la fisura en dirección de la profundidad [158].....	246
4.8. Comparación de la cinética de formación de la fisura anillo: a) Tiempo de formación de la fisura en aire bajo carga estática y cíclica, y predicción.....	249
4.9. Morfologías de las fisuras anillo debidas al contacto estático y cíclico.....	252
4.10. Observación detallada de las fisuras anillo mediante AFM: a) y b) Carga estática; c) y d) Carga cíclica.....	254
4.11. Imagen de AFM que muestra un detalle de la fisura anillo formada en el recubrimiento 6P64C debido al contacto Hertziano cíclico.....	255
4.12. Imagen de AFM que muestra un detalle de la fisura anillo formada monotónicamente. Nótese que la fisura está rodeada presumiblemente de la zona microfisurada.....	256
4.13. Esquema del crecimiento sub-crítico de una fisura precursora del anillo bajo carga cíclica.....	258
4.14. Huella residual por contacto cíclico sobre la aleación Ti6Al4V con carga máxima $P_{max} = 30$ N.....	261
4.15. Evolución del diámetro medio de la impresión residual sobre la aleación Ti6Al4V con el número de ciclos para diferentes valores de carga máxima.....	262
4.16. Evolución del perfil de la impresión residual por contacto cíclico ($P_{max} = 30$ N) sobre la aleación Ti6Al4V.....	263

4.17. Comparación del tiempo para fisura anillo en aire bajo contacto cíclico en el recubrimiento monocapa 6P64C y en los vidrios sinterizado (6P64S) y fundido (6P64F).....	264
4.18. Morfología de las fisuras anillo por contacto cíclico en aire de los vidrios monolíticos.....	265
4.19. Análisis de la dependencia del crecimiento de fisura para completar el anillo cíclico.....	270
4.20. Ejemplo de daño superficial del recubrimiento 6P64C por fretting debido a los micromovimientos horizontales permitidos por un sistema de sujeción inadecuado.....	273
4.21. Influencia de diferentes valores de módulo de elasticidad en la distribución de la tensión s_r calculada a partir de la ec.(1.17) para una carga $P_{max} = 20$ N.....	276
4.22. Ciclos para delaminar, N_{del} , para los diferentes valores de carga máxima, P_{max} , con una relación de carga constante $R = 0.2$	278
4.23. Aspecto general del daño asociado a la delaminación cíclica del recubrimiento.....	280
4.24. Comparación entre las curvas de fisura anillo y delaminación cíclica con una relación de carga $R = 0.2$	281
4.25. Esquema de las etapas involucradas en el mecanismo de la delaminación cíclica en el régimen de $P_{max} > P_{cr}$	282
4.26. Esquema de las etapas involucradas en el mecanismo de la delaminación cíclica en el régimen de $P_{max} < P_{cr}$	283
4.27. Evolución del daño cíclico para $R = 0.2$ y $P_{max} = 50$ N ($P_{max} > P_{cr}$): a) $N < N_{del}$ ($N = 1 \times 10^4$); b) $N > N_{del}$ ($N = 1.5 \times 10^5$); c) $N \gg N_{del}$ ($N = 8 \times 10^5$).....	286
4.28. Evolución del daño cíclico para $R = 0.2$ y $P_{max} = 32.5$ N ($P_{max} < P_{cr}$): a) $N < N_{del}$ ($N = 5 \times 10^4$); b) $N > N_{del}$ ($N = 1 \times 10^6$); c) $N \gg N_{del}$ ($N = 2 \times 10^6$).....	287
4.29. Influencia de la relación de carga, R , en el número de ciclos para delaminar, N_{del} : a) $\log P_{max}$ vs. $\log N_{del}$; b) $\log \Delta P$ vs. $\log N_{del}$	288
4.30. Morfología de la delaminación para diferentes valores de relación de carga R	290
4.31. Mapa general de daño en el recubrimiento monocapa 6P64C por contacto cíclico.....	293

5.1. Aspecto de la sección transversal del recubrimiento bicapa bioactivo 6P64/6P53B+5HA: a) Pulida; b) Pulida y atacada con reactivo ácido.....	303
5.2. Características microestructurales superficiales del recubrimiento bicapa bioactivo 6P64/6P53B+5HA.....	305
5.3. Patrón de difracción de rayos X correspondiente al recubrimiento bicapa bioactivo.....	306
5.4. Aspectos microestructurales en la superficie del recubrimiento bicapa bioactivo 6P64/6P53B+5HA.....	308
5.5. Mapa de daños producidos en el recubrimiento bicapa 6P64/6P53B+5HA durante el contacto Hertziano monotónico con diferentes radios de esferas de WC-Co.....	309
5.6. Morfología de los daños producidos durante el contacto monotónico con esfera de WC-Co ($R_e = 0.8$ mm) en el recubrimiento bicapa 6P64/6P53B+5HA.....	310
5.7. Comparación entre la respuesta al contacto Hertziano monotónico de los recubrimientos monocapa 6P64C y bicapa 6P64/6P53B+5HA.....	311
5.8. Distribución de la tensión principal de cizalladura, t_{13} , con diferentes radios de esfera y cargas de contacto.....	314
5.9. Módulo de elasticidad medido mediante nanoindentación Berkovich en la superficie de los recubrimientos monocapa (6P64C) y bicapa (6P64/6P53B+5HA).....	316
5.10. Morfología de los daños producidos en la intercara externa del recubrimiento bicapa 6P64/6P53B+5HA para un radio de esfera de mayor tamaño, $R_e = 2.5$ mm.....	317
5.11. Fisura lateral producida en el recubrimiento bicapa 6P64/6P53B+5HA durante el contacto monotónico con esfera de radio $R_e = 0.5$ mm y $P_{max} = 140$ N.....	318
5.12. Mapa de daños producidos en el recubrimiento bicapa 6P64/6P53B+5HA durante el contacto monotónico instrumentalizado con punta esférica de diamante.....	319
5.13. Curvas $P - h$ de los recubrimientos monocapa (6P64C) y bicapa (6P64/6P53B+5HA) obtenidas por contacto con punta esférica de diamante.....	321
5.14. Morfología de los daños durante el contacto Hertziano monotónico con punta esférica de diamante ($R_e = 25$ μ m) en el recubrimiento bicapa 6P64/6P53B+5HA.....	322

5.15. Comparación entre las curvas del tiempo para la fisuración anillo del recubrimiento bicapa 6P64/6P53B+5HA bajo cargas estáticas y cíclicas en aire.....	326
5.16. Detalle de la fisura anillo producida en el recubrimiento bicapa 6P64/6P53B+5HA ensayado en aire: a) Carga estática; b) Carga cíclica.....	327
5.17. Análisis mediante AFM de las fisuras anillo en el recubrimiento bicapa 6P64/6P53B+5HA ensayado en aire: a) Carga estática; b) Carga cíclica.....	330
5.18. Comparación entre las curvas de fisuración tipo anillo en los recubrimientos monocapa (6P64C, $R_e = 1.25$ mm) y bicapa (6P64/6P53B+5HA, $R = 0.8$ mm).....	332
5.19. Imagen de AFM mostrando un detalle de la fisura anillo cíclica cortando en su camino un cristal en el recubrimiento bicapa 6P64/6P53B+5HA.....	333
5.20. Curva del tiempo de formación de la fisura anillo en el recubrimiento bicapa 6P64/6P53B+5HA bajo carga estática en aire.....	335
5.21. Curva del número de ciclos para la formación de la fisura anillo en el recubrimiento bicapa 6P64/6P53B+5HA en aire.....	337
5.22. Evolución del proceso de precipitación de HCA sobre la superficie del recubrimiento bicapa 6P64/6P53B+5HA en presencia de SBF a 37°C: a) $t = 0$; b) $t = 1$ día; c) $t = 3$ días; d) $t = 2$ semanas; e) $t = 1$ mes; f) $t = 2$ meses.....	341
5.23. Evolución del análisis por EDS de la superficie del recubrimiento bicapa 6P64/6P53B+5HA en presencia de SBF a 37°C.....	342
5.24. Patrón de difracción de rayos X del recubrimiento bicapa 6P64/6P53B+5HA después de 2 meses de inmersión en SBF a 37°C.....	343
5.25. Morfología de la capa precipitada de HCA sobre el recubrimiento bicapa 6P64/6P53B+5HA después de 2 meses de inmersión en SBF a 37°C.....	344
5.26. Evolución de la capa precipitada de HCA con el tiempo de inmersión en SBF a 37°C.....	345
5.27. Aspecto de la sección transversal de recubrimiento bicapa 6P64/6P53B+5HA después de 2 meses de inmersión en SBF a 37°C y perfil EDS.....	346
5.28. Evolución del pH de la solución de SBF con el tiempo de contacto con la superficie del vidrio bioactivo.....	348

5.29. Morfología de los daños producidos durante el contacto Hertziano monotónico ($R_e = 0.8$ mm) del recubrimiento bicapa 6P64/6P53B+5HA después de 2 meses de inmersión en SBF a 37°C.....	349
5.30. Impresión residual producida sobre Si_3N_4 poroso durante el contacto Hertziano monotónico con una esfera de WC-Co con radio $R_e = 1.67$ mm y $P_{max} = 1000$ N.....	350
5.31. Evolución de la proyección del área dañada (PDA) en el recubrimiento bicapa 6P64/6P53B+5HA debido al contacto monotónico después de 2 meses de inmersión y en presencia de SBF a 37°C.....	351
5.32. Superficies de valores de la proyección del área dañada (PAD) durante el contacto estático y cíclico del recubrimiento bicapa 6P64/6P53B+5HA después de 2 meses de inmersión y en presencia de SBF a 37°C.....	352
5.33. Evolución de los valores de la proyección del área dañada (PAD) durante el contacto estático del recubrimiento bicapa 6P64/6P53B+5HA después de 2 meses de inmersión y en presencia de SBF a 37°C.....	353
5.34. Evolución de los valores de la proyección del área dañada (PAD) durante el contacto cíclico del recubrimiento bicapa 6P64/6P53B+5HA después de 2 meses de inmersión y en presencia de SBF a 37°C.....	354
5.35. Aspecto del centro de la zona dañada en el recubrimiento bicapa debido al contacto estático y cíclico en presencia de SBF.....	356
5.36. Análisis EDS en el centro de la zona de daño debido al contacto estático y cíclico en el recubrimiento bicapa en presencia del SBF.....	357
5.37. Perfiles de los daños en el recubrimiento bicapa debido al contacto estático y cíclico en presencia del SBF.....	358
A-1. Parámetros geométricos de una fisura elíptica embebida en un sólido infinito y sometida a una carga puntual.....	398