
Índice general

Resumen	I
Resum	III
Abstract	V
Índice general	VII
Índice de figuras	XV
Índice de tablas	XXIII
Nomenclatura	XXV
I Generalidades	1
1 Preliminares	3
1.1 Aproximación a la Biomecánica	3
1.1.1 Trasfondo histórico	4
1.1.2 La Biomecánica en la actualidad	9
1.2 Biomecánica médica de simulación.	10
1.2.1 Contribuciones a la Ortopedia	<u>11</u>
	VII

1.2.2 El método de los elementos finitos en Biomecánica	12
1.3 Motivación	15
1.3.1 Simulación de mamografías	15
1.3.2 Simulación de mamoplastias de aumento	16
1.4 Descripción, objetivos y alcance de la tesis	19
2 Aspectos médicos	23
2.1 Sistemas de referencia del cuerpo humano.	23
2.1.1 Ejes, direcciones y planos anatómicos	23
2.2 Anatomía fisiológica de la mama	26
2.3 Histología de la mama	27
2.3.1 Glándula mamaria	27
2.3.2 Tejido conectivo.	30
2.3.3 Tejido adiposo.	31
2.3.4 Piel	33
2.4 Biomecánica de la mama	36
2.5 Enfermedades de la mama	37
2.5.1 Cáncer de mama	38
2.6 Técnicas de diagnóstico mamario	39
2.6.1 Resonancia magnética	39
2.6.2 Ecografía	41
2.6.3 Biopsia mamaria	42
2.6.4 Tomografía axial computerizada	42
2.6.5 Mamografía	42
2.6.6 Técnicas multimodales de diagnóstico	44
2.7 Mamoplastia de aumento	45
2.7.1 El implante mamario.	46
2.7.2 Procedimiento quirúrgico	49
2.7.3 Complicaciones clínicas	51
3 Estado del arte	55
3.1 Perspectiva histórica	55
3.1.1 Desarrollo de las mamografías	55
3.1.2 Orígenes y evolución de las mamoplastias de aumento	57
3.2 Revisión bibliográfica	63
3.2.1 Propiedades mecánicas de los tejidos de la mama	63

3.2.2 Simulación de mamografías	68
3.2.3 Registro de imágenes.	75
3.2.4 Simulación de mamoplastias	84
3.2.5 Otras técnicas	87
4 Planteamiento numérico	89
4.1 Caracterización del medio mamario	89
4.1.1 Generalidades	90
4.1.2 Homogeneidad.	91
4.1.3 Continuidad	91
4.1.4 Incompresibilidad.	92
4.1.5 Isotropía	92
4.1.6 Régimen	93
4.2 Teoría de la Elasticidad en Grandes Deformaciones	93
4.2.1 Cinemática.	94
4.2.2 Cinética.	99
4.2.3 Leyes de conservación	101
4.2.4 Condiciones de contorno	110
4.3 Modelos constitutivos hiperelásticos.	111
4.3.1 Principios fundamentales de los modelos constitutivos	111
4.3.2 Función densidad de energía de deformación	112
4.3.3 Ecuaciones constitutivas.	116
4.3.4 Tensor elástico	117
4.3.5 Expresiones funcionales en hiperelasticidad	118
4.4 Implementación en el Método de los Elementos Finitos.	122
4.4.1 Principios variacionales	122
4.4.2 Implementación de la incompresibilidad	125
4.4.3 Linealización.	127
4.4.4 Discretización y formulación matricial	128
4.5 Enfoques de la simulación mamaria	133

II Simulación de mamografías	135
5 Modelo de cálculo para la simulación de mamografías	137
5.1 Descripción del caso clínico	137
5.2 Obtención de la geometría base.	139
5.2.1 Tratamiento de las tomografías	139
5.2.2 Reconstrucción tridimensional	143
5.3 Generación del modelo de elementos finitos.	143
5.3.1 Aspectos previos	143
5.3.2 Mallado de la geometría base.	144
5.4 Discretización de los mamogramas.	147
6 Rastreo de tumores en mamogramas	151
6.1 Planteamiento metodológico de las simulaciones	151
6.1.1 Mamografía en fase clínica	151
6.1.2 Metodología de simulación	152
6.2 Cinética de carga	154
6.2.1 Compresión CC	154
6.2.2 Compresión MLO.	156
6.3 Características del modelo	159
6.3.1 El problema de contacto	159
6.3.2 Condiciones de contorno	162
6.3.3 Parámetros de materiales	163
6.4 Análisis de sensibilidad de parámetros	167
6.4.1 Metodología de comparación	167
6.4.2 Indicadores.	168
6.4.3 Variaciones en el modelo	169
6.4.4 Test de convergencia de malla	176
6.5 Validación	176
6.5.1 Validación cualitativa	177
6.5.2 Validación cuantitativa	181
6.5.3 Factores sin validar.	185
6.6 Rastreo de la posición del tumor	187

III Simulación de mamoplastias de aumento 189

7 Modelo de cálculo para la simulación de mamoplastias de aumento	191
7.1 Medidas antropométricas del seno	191
7.2 Descripción del caso clínico	194
7.3 Obtención de la geometría base.	196
7.3.1 Segmentación	196
7.3.2 Reconstrucción tridimensional	198
7.3.3 Localización de la pared torácica	200
7.4 Generación del modelo de elementos finitos.	201
8 Predicción del aspecto final de la mama	205
8.1 Planteamiento metodológico de la simulación	205
8.1.1 Parametrización.	207
8.1.2 Datos clínicos relevantes.	208
8.2 Condiciones de contorno	209
8.2.1 Superficies de carga	209
8.2.2 Restricciones cinemáticas	214
8.3 Modelos y parámetros de materiales	215
8.3.1 Piel	215
8.3.2 Complejo grasa-parénquima mamario	216
8.3.3 Silicona	216
8.4 Cinética de carga	216
8.4.1 Descomposición del gradiente de deformación.	218
8.4.2 Presión aplicada	220
8.4.3 Remallado	221
8.5 Análisis de sensibilidad de parámetros	222
8.5.1 Metodología de comparación	223
8.5.2 Variaciones en el modelo	225
8.5.3 Test de convergencia de malla	237
8.6 Validación	237
8.6.1 Validación cualitativa	238
8.6.2 Desviación entre superficies.	240
8.6.3 Marcadores anatómicos	242

8.6.4 Factores sin validar 244

IV Revisión de la tesis 247

9 Conclusiones y futuros desarrollos 249

- 9.1 Breve resumen del trabajo realizado 249
- 9.2 Aportaciones originales 250
- 9.3 Conclusiones 251
 - 9.3.1 Relativas a la metodología empleada 251
 - 9.3.2 Relativas a la aplicación clínica 253
- 9.4 Futuras líneas de investigación 254
- 9.5 Publicaciones 256
 - 9.5.1 Artículos 256
 - 9.5.2 Capítulos de libro 256
 - 9.5.3 Publicaciones en congresos 256

Anexos 257

A Modelos constitutivos y constantes elásticas 259

- A.1 Propiedades físicas 259
- A.2 Piel 260
- A.3 Tejidos mamarios internos 262
 - A.3.1 Parénquima mamario y tejido adiposo 262
 - A.3.2 Tumores 265
- A.4 Silicona 265

B Algoritmo de rastreo del tumor 267

- B.1 Introducción 267
- B.2 Descripción del algoritmo 269
 - B.2.1 Datos de entrada 269
 - B.2.2 Subrutinas principales 269

B.2.3 Subrutinas secundarias	270
B.2.4 Cálculo de la similitud entre mamogramas	272
B.2.5 Salidas	273
C Cálculo de volúmenes huecos en modelos deformados de elementos finitos	275
C.1 Planteamiento del problema.	275
C.2 Formulación	277
C.2.1 Regla de Simpson	278
C.3 Implementación en MATLAB	279
C.4 Conclusiones	280
Bibliografía	283
Índice alfabético	303

Índice de figuras

1.1. La Biomecánica desde la perspectiva de una ciencia.	5
1.2. Leonardo da Vinci y su hombre de Vitrubio. Galileo Galilei	6
1.3. Giovanni Alfonso Borelli y su obra <i>De Motu Animalium</i>	6
1.4. Hermann von Helmholtz, considerado el <i>padre de la Bioingeniería</i> .	8
1.5. A. V. Hill. M. Mooney. R. Rivlin	8
1.6. Líneas de investigación en Biomecánica en la actualidad.	9
1.7. Ejemplos de modelos de elementos finitos en Biomecánica.	14
1.8. Tasas de incidencia, supervivencia y mortalidad del cáncer de mama en algunos países de la Unión Europea en 2006.	16
1.9. Caso clínico de una paciente antes y después de someterse a una mamoplastia de aumento.	18
1.10. Número de intervenciones mamarias realizadas en Estados Unidos en el año 2000 y en el periodo 2005-2011.	18
2.1. Sistema de referencia y direcciones anatómicas del cuerpo humano.	24
2.2. Planos anatómicos	25
2.3. Sir Astley Paston Cooper. Aspecto externo de la mama femenina. .	26
2.4. Disección anterolateral y sección sagital de la mama.	28
2.5. La mama y su relación con el sistema de vasos linfáticos.	29
2.6. Histología de la glándula mamaria	29

2.7. Disección <i>post mortem</i> de conductos galactóforos mamarios inyectados con cera coloreada.	30
2.8. Sección de la glándula mamaria a través del pezón e imagen histológica del tejido conectivo.	31
2.9. Imagen obtenida por microscopía electrónica de barrido que muestra la disposición celular del tejido adiposo.	32
2.10. Sección esquemática de la piel.	34
2.11. Relación de la mama con el músculo pectoral mayor.	37
2.12. Distribución de los tipos histológicos de cáncer de mama (1997-1998).	38
2.13. Cuadrantes de la mama y porcentajes de frecuencia de aparición del cáncer.	39
2.14. Técnicas radiológicas de diagnóstico mamario.	40
2.15. Compresiones y mamogramas durante una mamografía.	43
2.16. Estructura de un implante mamario tipo.	46
2.17. Prótesis rellenas de suero salino.	47
2.18. Prótesis rellenas de gel de silicona.	48
2.19. Tablas de especificaciones de prótesis de silicona de la compañía EUROSILICONE.	48
2.20. Posiciones de la prótesis.	50
2.21. Tipos de incisiones en mamoplastias de aumento.	51
2.22. Inserción de la prótesis.	51
2.23. Contractura capsular adversa.	52
3.1. Primeros dispositivos mamográficos	57
3.2. Idealización de una amazona. <i>Pin-ups</i>	58
3.3. Primeras prótesis de silicona inventadas por Cronin y Gerow	61
3.4. Elastogramas obtenidos mediante ERM.	66
3.5. Una de las primeras simulaciones de mamografías mediante el MEF.	69

3.6. Tomografía RM y modelo de elementos finitos para la simulación de mamografías	71
3.7. Modelo de un <i>phantom</i> de gel de silicona para la simulación de compresiones mamográficas.	72
3.8. Obtención de la configuración indeformada y libre de tensiones de las mamas.	74
3.9. Obtención de un modelo de elementos finitos de la mama específico para una paciente.	74
3.10. Correspondencia multimodal entre imágenes.	78
3.11. Estrategia de registro de imágenes con apoyo del MEF.	79
3.12. Mamogramas virtuales obtenidos por simulación mediante el MEF.	80
3.13. Superposición de mamogramas CC reales y simulados en función de la caracterización del medio.	82
3.14. Simulación de una compresión mamográfica mediante un problema de contacto.	83
3.15. Modelo de elementos finitos de una mamoplastia de aumento.	85
3.16. Resultados de la simulación de una mamoplastia de aumento.	85
3.17. Diagrama de flujo que ilustra la generación de un modelo basado en Tensores de Masas para simular una mamoplastia de aumento.	86
3.18. Imágenes y modelo de elementos finitos de una paciente antes de someterse a una mamoplastia de reducción.	87
4.1. Respuesta tensión-deformación no lineal de un tejido blando genérico	90
4.2. Caracterización del movimiento en un sólido deformable.	95
4.3. Vectores tensión actuando sobre una partícula.	100
4.4. Relación entre la constante neo-Hookeana y la compresibilidad.	120
4.5. Correspondencia isoparamétrica de la deformación de un elemento finito.	130
5.1. Mamogramas de la paciente, en los que se aprecia el nódulo maligno.	138

5.2. Tomografías RM de la paciente, en las que se aprecia por contraste el nódulo maligno.	138
5.3. Esquema de alineación y apilado de las tomografías.	140
5.4. Segmentación y generación de la geometría base de la mama a partir de tomografías RM.	142
5.5. Reconstrucción tridimensional de la geometría base.	143
5.6. Remallado de la geometría base y generación de la malla sólida. . .	145
5.7. Generación del mamograma real discretizado CC.	148
5.8. Generación del mamograma real discretizado MLO.	149
5.9. Mamograma discretizado MLO.	150
6.1. Mamógrafo (modelo de SIEMENS).	152
6.2. Esquema de la metodología propuesta para la simulación de una mamografía.	153
6.3. Modelo para la simulación de la compresión CC.	154
6.4. Esquema de la cinética de carga para la simulación de la mamografía en la dirección de compresión CC.	155
6.5. Modelo para la simulación de la compresión MLO.	157
6.6. Esquema de la cinética de carga para la simulación de la mamografía en la dirección de compresión MLO.	158
6.7. Condiciones de contorno aplicadas a la mama para la simulación de las compresiones mamográficas	162
6.8. Influencia de las constantes elásticas en CSM y CST.	171
6.9. Influencia de la compresibilidad del medio en CSM y CST.	172
6.10. Influencia de las constantes elásticas en GC.	172
6.11. Influencia del coeficiente de fricción en CSM y CST.	175
6.12. Influencia del coeficiente de fricción en GC.	175
6.13. Validación cualitativa del modelo numérico en la compresión CC: comparación del aspecto de los mamogramas.	178

6.14. Validación cualitativa del modelo numérico en la compresión MLO: comparación del aspecto de los mamogramas.	179
6.15. Mamogramas reales discretizados.	180
6.16. Superposición del mamograma real discretizado con el mamograma virtual para cada dirección de compresión.	182
6.17. Medidas para la obtención del porcentaje medio de reducción del espesor de la mama en la simulación de la compresión CC.	185
6.18. Distribuciones de tensiones principales en el modelo de la mama durante las simulaciones de las compresiones mamográficas.	186
6.19. Distancias entre los centroides de los contornos de la mama y del tumor.	187
7.1. Propuestas de marcadores de la anatomía de la mama.	192
7.2. Reconstrucción de la superficie mamaria mediante estereografía. . .	193
7.3. Cálculo del volumen mamario a partir de distintas técnicas.	194
7.4. Imágenes TAC de la región mamaria de la paciente.	195
7.5. Segmentación automática y reconstrucción VRML de los tejidos de la región torácica	196
7.6. Segmentación manual de tomografías TAC.	197
7.7. Reconstrucción inicial de la geometría base antes y después de la mamoplastia de aumento.	197
7.8. Generación y refinado de la geometría base.	199
7.9. Generación de la superficie de la pared torácica.	200
7.10. Mallado de la geometría base.	202
7.11. Malla recortada del modelo.	202
8.1. Simulación de una mamoplastia de aumento.	205
8.2. Esquema para el proceso de simulación propuesto.	206
8.3. Prótesis de gel silicona y sus características.	208
8.4. Condiciones de contorno de las entidades del modelo numérico. . .	209

8.5. Ubicación de las superficies de carga	210
8.6. Superposición de los contornos de las superficies de carga en el modelo numérico.	211
8.7. Generación de los elementos cuadriláteros de las superficies de carga	211
8.8. Separación entre la superficie de carga y la pared torácica.	212
8.9. Duplicado de las superficies de carga (vistas 2D y 3D).	213
8.10. Superficie de carga con los hexaedros adyacentes.	214
8.11. Restricciones cinemáticas aplicadas a grupos de nodos.	215
8.12. Esquema de la cinética de carga del modelo numérico	217
8.13. Descomposición del gradiente de deformación.	219
8.14. Compilación de la subrutina UMAT entre dos configuraciones i e $i + 1$	220
8.15. Introducción de la presión como una entrada en rampa.	221
8.16. Malla de la prótesis de silicona	222
8.17. Modelo de la paciente real para comparaciones	223
8.18. Diversas localizaciones de las superficies de carga.	225
8.19. Curvas de resultados P-V y $V-\overline{RSS}$ para distintos valores de c_1 . Superficies de carga en posición -3 y nodos restringidos posteriores en posición <i>Espalda</i>	227
8.20. Curvas de resultados P-V y $V-\overline{RSS}$ para distintos valores de c_1 . Superficies de carga en posición -3 y nodos restringidos posteriores en posición -4.	228
8.21. Superposición de las curvas P-V de las Figuras 8.19 y 8.20	229
8.22. Superposición de curvas P-V para $c_1 = 1$ kPa y diversas condiciones de contorno.	231
8.23. Presiones necesarias para alcanzar el volumen correspondiente al valor mínimo de \overline{RSS} para cada valor de c_1	232
8.24. Curvas de resultados P-V y $V-\overline{RSS}$ ($c_1 = 1$ kPa, superficies de carga en posición -3 y nodos restringidos posteriores en posición -4) para evaluar la influencia del tamaño de las superficies de carga.	234

8.25. Curvas de resultados P-V y $V-\overline{RSS}$ ($c_1 = 1$ kPa, superficies de carga en posición -3 y nodos restringidos posteriores en posición -4) para evaluar la influencia de la posición de las superficies de carga.	236
8.26. Superposición de la configuración inicial del modelo numérico con el modelo real tras la mamoplastia de aumento.	239
8.27. Superposición de la deformada de la configuración deformada del modelo numérico con el modelo real tras la mamoplastia de aumento.	240
8.28. Desviaciones nodales en X y en Y de la configuración deformada del modelo numérico con el modelo real.	241
8.29. Desviaciones nodales en Z de la configuración deformada del modelo numérico con el modelo real.	242
8.30. Marcadores anatómicos propuestos por Catherwood et al.	243
8.31. Marcadores en la paciente en posición decúbito supino.	244
8.32. Distribuciones de tensiones principales en el modelo durante la generación del hueco.	245
8.33. Configuración deformada del modelo numérico bajo la acción de la gravedad.	246
A.1. Curva tensión-deformación de la piel, linealizada en tres tramos.	262
B.1. Esquema de las rutinas MATLAB para el rastreo del tumor.	268
B.2. Aplicación del método del ratio de oro al cálculo de CSM y CST.	273
C.1. Mallas de las superficies de carga de una de las mamas.	276
C.2. Generación de elementos hexaédricos en el volumen comprendido entre dos mallas topológicamente equivalentes.	276
C.3. Descomposición de un <i>hexaedro virtual</i> para calcular su volumen.	278
C.4. Esquema del código implementado en MATLAB.	280

Índice de tablas

1.1. Modelos de análisis en Biomecánica	10
1.2. Variables que caracterizan un biomaterial.	12
2.1. Espesores de las capas de la piel.	35
2.2. Escala de Baker para medir el grado de contractura capsular adversa.	53
3.1. Propiedades mecánicas de algunos biomateriales.	60
5.1. Resumen del modelo numérico para la simulación de la mamografía.	146
5.2. Resumen de los mamogramas discretizados.	150
6.1. Entidades de las placas compresoras del modelo.	159
6.2. Propiedades de los materiales de las placas compresoras.	160
6.3. Rangos de valores de la constante c_1 para tejidos mamarios.	166
6.4. Valores definitivos de los parámetros del modelo.	181
6.5. Valores de los indicadores para los resultados de las simulaciones.	181
6.6. Valores de compresiones mamográficas reales reportadas en trabajos previos.	184
6.7. Valores de compresiones mamográficas alcanzados en simulaciones, según diversos autores.	184
6.8. Distancias entre los centroides de los contornos de los mamogramas real y virtual para cada dirección de compresión.	188

7.1. Resumen del modelo de elementos finitos de la paciente antes de la mamoplastia de aumento.	203
8.1. Características de las superficies de carga en el modelo numérico. .	212
8.2. Casos considerados para estudiar la influencia en el modelo del tamaño de las superficies de carga.	233
8.3. Casos considerados para estudiar la influencia en el modelo del desplazamiento de las superficies de carga.	235
A.1. Densidades de diversos tejidos del cuerpo humano.	259
A.2. Valores del módulo de elasticidad de la piel obtenidos mediante ensayos <i>in vivo</i> o <i>in vitro</i>	261
A.3. Caracterización de la piel en las simulaciones numéricas sobre la mama (diversos autores).	261
A.4. Valores del módulo de elasticidad longitudinal de los tejidos mamaros en régimen elástico y lineal, obtenidos mediante elastografía. .	262
A.5. Modelos constitutivos y constantes elásticas empleadas para simular la grasa y el parénquima mamario (diversos autores).	263
A.6. Modelos constitutivos y constantes elásticas empleadas para simular la grasa y el parénquima mamario (diversos autores, continuación). .	264
A.7. Valores de constantes elásticas de tumores.	265
A.8. Valores constantes hiperelásticas consideradas para la silicona. . .	266