

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



Profesor Patrocinante:
D. Sc. Esteban J. Pino Q.

Profesor Co-Patrocinante:
Dr. Fredy C. Montoya D.

Informe de Memoria de Título
para optar al título de:
Ingeniero Civil Biomédico

**Desarrollo de un Simulador Anatómico de
Hombro de Bajo Costo para Entrenamiento
Quirúrgico Artroscópico**

Felipe Orlando Sepúlveda Mardones

Concepción, Marzo de 2017

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Eléctrica

Profesor Patrocinante:
D. Sc. Esteban J. Pino Q.
Profesor Co-Patrocinante:
Dr. Fredy C. Montoya D.

Desarrollo de un Simulador Anatómico de Hombro de Bajo Costo para Entrenamiento Quirúrgico Artroscópico



Felipe Orlando Sepúlveda Mardones

Informe de Memoria de Título
para optar al Título de

Ingeniero Civil Biomédico

Marzo de 2017

Resumen

En este documento se detalla el desarrollo de un simulador anatómico de hombro de bajo costo, cuyo objetivo es permitir el entrenamiento quirúrgico artroscópico.

Previo al desarrollo del modelo se revisa el estado del arte de la simulación clínica, haciendo énfasis en la artroscopia. Se estudian los fundamentos anatómicos, fisiológicos e histológicos más importantes de algunos de los tejidos presentes en el hombro, así como las principales patologías y lesiones que afectan el hombro y los aspectos más relevantes del procedimiento artroscópico de hombro. Se analiza el comportamiento mecánico de un grupo de polímeros, los elastómeros, destacando su comportamiento mecánico elástico y no lineal, semejante al que presentan los tendones y los ligamentos.

Se expone el desarrollo del simulador, detallando los modelos óseos del hombro como la clavícula, la escápula y la mitad superior del húmero. Se modelan los tejidos blandos de la articulación glenohumeral, como el labrum, el tendón de la cabeza larga del bíceps, los ligamentos del intervalo rotador y los tendones de los músculos del manguito rotador. Se desarrolla la articulación acromioclavicular en conjunto con un sistema de estabilización que permite mantener fijo el extremo interno de la clavícula. Se implementa la capa envolvente y el soporte del simulador.

Se muestran los resultados del simulador, como la reproducción de las articulaciones glenohumeral y acromioclavicular. Se describe la simulación clínica que realiza el Dr. Fredy Montoya en uno de los pabellones del Hospital Traumatólogo de Concepción, donde se determina la utilidad del modelo para el entrenamiento artroscópico.

Se concluye que el modelo es una herramienta útil para la formación en traumatología, permitiendo abordar de manera segura el manejo quirúrgico posterior de los pacientes. En particular, permite el entrenamiento de la triangulación, la percepción de profundidad en un plano bidimensional, la visualización y el reconocimiento de estructuras anatómicas durante la exploración de la articulación glenohumeral y el manejo de nudos quirúrgicos, asociados al anclaje de los tendones del manguito rotador.

Agradecimientos

A mi familia, en especial, a mi padre, mi madre y mi hermana quienes han confiado y apoyado de manera incondicional a través de todo el proceso universitario.

A mis profesores y tutores quienes me han entregado sus conocimientos y me han apoyado a lo largo de los años en la universidad. En especial, al Dr. Fredy Montoya, el Pr. Esteban Pino y a los becados de traumatología quienes me entregaron retroalimentación fundamental para el desarrollo de la memoria de título.

A mis amigos y compañeros de carrera con los que he vivido momentos satisfactorios y también difíciles durante mi formación académica.



Tabla de Contenidos

LISTA DE TABLAS	VII
LISTA DE FIGURAS	VIII
ABREVIACIONES	X
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1.2. ESTADO DEL ARTE	2
1.4. OBJETIVO GENERAL	4
1.5. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
1.6. ALCANCES Y LIMITACIONES	4
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	6
2.1. EL COMPLEJO ARTICULAR DEL HOMBRO	6
2.1.1 <i>Superficies Articulares de la Articulación Glenohumeral</i>	7
2.1.2 <i>El Aparato Capsulo-Ligamentoso y Músculo-Tendinoso de la Articulación Glenohumeral</i>	9
2.1.3 <i>El labrum y el Tendón de la Cabeza Larga del Bíceps Braquial</i>	12
2.1.4 <i>El Manguito Rotador</i>	12
2.1.5 <i>El Intervalo Rotador</i>	15
2.1.6 <i>La Articulación Acromioclavicular</i>	16
2.1.7 <i>Movimientos del Hombro</i>	17
2.2. PATOLOGÍAS COMUNES QUE AFECTAN EL HOMBRO	23
2.2.1 <i>Síndrome de Pinzamiento</i>	23
2.2.2 <i>Desgarros del Manguito Rotador</i>	23
2.2.3 <i>Desgarros de la Parte Superior del Labrum</i>	24
2.3. ARTROSCOPIA DE HOMBRO	26
2.3.1 <i>Procedimiento Quirúrgico</i>	26
2.4. CARACTERÍSTICAS HISTOLÓGICAS DE LOS TEJIDOS	28
2.4.1 <i>Tejido Conjuntivo</i>	28
2.4.2 <i>Características Histológicas del Hueso</i>	29
2.4.3 <i>Características Histológicas de los Tendones y los Ligamentos</i>	30
2.5. MECÁNICA DE LOS ELASTÓMEROS	32
CAPÍTULO 3. DESARROLLO DEL SIMULADOR ANATÓMICO	33
3.1. MATERIALES	33
3.3.1 <i>Validación de Materiales</i>	35
3.2. METODOLOGÍA DE DESARROLLO	35
3.3. MODELACIÓN DE LOS TEJIDOS BLANDOS DE LA ARTICULACIÓN GLENOHUMERAL Y ACROMIOCLAVICULAR	36
3.3.1 <i>Modelación del Labrum y el Tendón de la Cabeza Larga del Bíceps Braquial</i>	36
3.3.2 <i>Modelación de los Ligamentos del Intervalo Rotador</i>	37
3.3.3 <i>Modelación de los Músculos del Manguito Rotador</i>	39
3.3.4 <i>Modelación de la Articulación Acromioclavicular</i>	41
3.5. IMPLEMENTACIÓN DE LA CAPA ENVOLVENTE DEL MODELO ANATÓMICO	43
3.6. IMPLEMENTACIÓN DEL SOPORTE DEL SIMULADOR ANATÓMICO	44
CAPÍTULO 4. RESULTADOS	46
4.1. SIMULADOR ANATÓMICO	46
4.2. SIMULACIÓN CLÍNICA	47
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES	49
5.1. DISCUSIÓN	49
5.2. CONCLUSIONES	49

5.3. TRABAJO FUTURO.....50

BIBLIOGRAFÍA.....51



Lista de Tablas

TABLA 2.1: Dimensiones de las Entesis de los Tendones de los Músculos del MR.....	15
TABLA 2.2: Diferencias entre los Tendones y los Ligamentos.....	31
TABLA 3.1: Dimensiones Generales de los Modelos 3D de los Huesos del Hombro.....	34
TABLA 3.2: Dimensiones del Material utilizado en la Modelación del Labrum.....	36
TABLA 3.3: Dimensiones del Material utilizado en la Modelación del BT.....	36
TABLA 3.4: Dimensiones de los Materiales utilizados en la Modelación del IR.....	38
TABLA 3.5: Dimensiones de los Materiales utilizados en la Modelación del MR.....	40
TABLA 3.6: Dimensiones de los Materiales utilizados en la Modelación de la Articulación AC.....	42



Lista de Figuras

Fig. 2.1: Articulaciones del Hombro.....	7
Fig. 2.2: Vista Anterior de la Cabeza Humeral.....	8
Fig. 2.3: Vista Anterior del Borde Externo de la Escápula.....	8
Fig. 2.4: Vista Interna de la Cabeza Humeral.....	9
Fig. 2.5: Vista Lateral de la Escápula.....	10
Fig. 2.6: Vista Anterior de la Articulación GH Abierta.....	11
Fig. 2.7: Vista Posterior de la Articulación GH Abierta.....	11
Fig. 2.8: Corte Frontal de la Articulación GH.....	12
Fig. 2.9: Vista Anterior de las Uniones Musculotendinosas del MR.....	13
Fig. 2.10: Huella de la Entesis de los Tendones de los Músculos del MR.....	13
Fig. 2.11: Vista Lateral de las Uniones Musculotendinosas del MR.....	14
Fig. 2.12: Huella de la Entesis de los Tendones de los Músculos del MR.....	14
Fig. 2.13: Unión Miotendinosa completa del MR.....	14
Fig. 2.14: Vista Externa del IR.....	15
Fig. 2.15: Vista Interna del IR.....	16
Fig. 2.16: Articulación Acromioclavicular.....	17
Fig. 2.17: Ejes Fisiológicos del Hombro.....	18
Fig. 2.18: Movimientos de Flexoextensión.....	19
Fig. 2.19: Movimientos de Aducción.....	19
Fig. 2.20: Etapas del Movimiento de Abducción.....	20
Fig. 2.21: Movimientos de Flexoextensión Horizontal.....	21
Fig. 2.22: Movimientos de Rotación.....	22
Fig. 2.23: Planos Anatómicos del Hombro.....	23
Fig. 2.24: Pinzamiento del Acromion sobre el MR y la Bursa.....	24
Fig. 2.25: Grados de Ruptura del Tendón del Supraespinoso.....	24
Fig. 2.26: Clasificación de Snyder para los Desgarros SLAP.....	25
Fig. 2.27: Portales Artroscópicos.....	27
Fig. 2.28: Imágenes Artroscópicas.....	27
Fig. 2.29: Sistema de Anclaje para el Tendón del Supraespinoso.....	28
Fig. 2.30: Curva Carga-Deformación del Hueso.....	30
Fig. 2.31: Curva de Esfuerzo-Deformación Típica del Tendón y el Ligamento.....	31
Fig. 2.32: Curva Esfuerzo-Deformación Típica de un Elastómero.....	32
Fig. 3.1: Modelo 3D de la Escápula Derecha.....	33
Fig. 3.2: Modelo 3D de la Mitad Superior del Húmero Derecho.....	34
Fig. 3.3: Modelo 3D de la Clavícula Derecha.....	34
Fig. 3.4: Proceso de Modelación del Labrum y el Tendón de la Cabeza Larga del Bíceps.....	37
Fig. 3.5: Modelo del Labrum y el Tendón de la Cabeza Larga del Bíceps.....	37
Fig. 3.6: Extremo Externo de los Modelos de los Ligamentos del IR.....	39
Fig. 3.7: Extremo Interno de los Modelos de los Ligamentos del IR.....	39
Fig. 3.8: Vista Anterior de los Modelos de la Articulación Glenohumeral.....	41
Fig. 3.9: Vista Posterior de los Modelos de los Tendones del MR.....	41
Fig. 3.10: Modelo de la Articulación AC.....	42
Fig. 3.11: Sistema Estabilizador de la Articulación AC.....	43
Fig. 3.12: Capa Envolvente del Modelo Anatómico.....	43

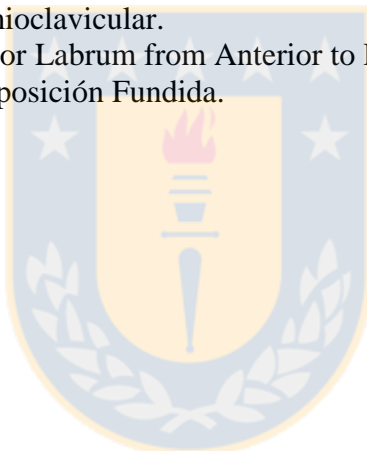
Fig. 3.13: Soporte del Modelo	45
Fig. 3.14: Sistema para el Anclaje del Soporte.....	45
Fig. 4.1: Simulador Anatómico.....	46
Fig. 4.2: Simulador Anatómico con Estructuras Expuestas.....	47
Fig. 4.3: Exploración de la Articulación Glenohumeral.....	48
Fig. 4.4: Palpación del Labrum.....	48
Fig. 4.5: Simulación de Ablación de Tejido.....	48



Abreviaciones

Mayúsculas

GH.	: Glenohumeral.
AC.	: Acromioclavicular.
MR.	: Manguito Rotador.
SSC.	: Subescapular
SSP.	: Supraespinoso.
ISP.	: Infraespinoso.
RM.	: Redondo Menor.
IR.	: Intervalo Rotador.
SGHL.	: Ligamento Glenohumeral Superior.
MGHL.	: Ligamento Glenohumeral Medio.
BT.	: Tendón de la Cabeza Larga del Bíceps Braquial.
CHL.	: Ligamento Coracohumeral.
LAC	: Ligamento Acromioclavicular.
SLAP.	: Del inglés, Superior Labrum from Anterior to Posterior.
MDF.	: Modelado por Deposición Fundida.
PLA.	: Ácido Poliláctico.
RF.	: Radiofrecuencia.



Capítulo 1. Introducción

1.1. Introducción General

El campo de la medicina ha experimentado cambios sustanciales debido a la incorporación de nuevas tecnologías en los procesos clínicos, permitiendo entregar una amplia gama de herramientas tanto para el diagnóstico como para el tratamiento de diversas patologías [1].

En la actualidad las técnicas quirúrgicas mínimamente invasivas han adquirido popularidad debido a que están asociadas a una mayor seguridad para el paciente, permitiendo la disminución de la morbilidad postoperatoria en comparación a las técnicas convencionales y la reducción de la agresión quirúrgica, traduciéndose en una recuperación más rápida del paciente y en una estancia menor dentro del hospital [2].

Dentro de los procedimientos quirúrgicos mínimamente invasivos se encuentra la artroscopia, un tipo de endoscopia en donde los cirujanos utilizan una pequeña cámara de video llamada artroscopio introducida a través de una pequeña incisión en la piel, permitiendo así, inspeccionar diagnosticar o reparar lesiones dentro o alrededor de una articulación [2] [3].

El modelo convencional utilizado para el aprendizaje quirúrgico “see one, do one, teach one” es cuestionable en relación a la seguridad del paciente y a los costos asociados. Debido a este y otros factores se han incorporado herramientas basadas en la simulación de experiencias clínicas, las que ofrecen una alternativa segura para el paciente y útil para la formación médica [4].

En este trabajo se describen los aspectos más importantes relacionados al hombro, los que permitieron sentar las bases para el desarrollo de un simulador anatómico de esta región, cuyo fin es permitir el entrenamiento de habilidades quirúrgico artroscópicas.

1.2. Estado del Arte

La simulación puede entenderse como la experimentación o ensayo, con la ayuda de un modelo que imita o representa ciertos aspectos, aproximándolos a la realidad, pero evitando el riesgo sobre personas, máquinas o sistemas [5].

La simulación como herramienta de formación nació como concepto moderno en 1929 con la presentación del primer simulador de vuelo, el “*Link Trainer*” desarrollado por Edwin A. Link, que ofreció una alternativa innovadora y segura para el entrenamiento de pilotos de guerra [6]. Años después, y debido a sus beneficios, fueron incorporados en otras áreas como la medicina. El primer modelo desarrollado en este campo se conoció con el nombre de “*Resusci Anne*”, un simulador de reanimación cardiopulmonar construido por Laerdal en la década de los sesenta [7] [8]. Posteriormente, el desarrollo de la simulación clínica se vio influenciado por cuatro factores:

- El desarrollo de la bioética.
- El aumento de la exigencia en la formación clínica.
- La seguridad del paciente dentro del ambiente clínico.
- Los avances tecnológico en computación, electrónica, materiales, háptica y realidad virtual.

La interacción de estos elementos ha potenciado el desarrollo de diferentes modelos con distintos niveles de complejidad y sofisticación [5]. Existen múltiples clasificaciones para los simuladores clínicos. Una de ellas agrupa a estas herramientas en cinco categorías:

- **Simuladores de uso específico (*part task trainers*):** Son modelos físicos diseñados para imitar solo una parte del ambiente clínico o de una región anatómica del cuerpo. Generalmente son utilizados para el entrenamiento de habilidades psicomotoras básicas [5] [7].
- **Pacientes estandarizados:** Son personas entrenadas para actuar como pacientes. Se utilizan para el entrenamiento de habilidades en anamnesis, realización de exámenes físicos y comunicación [5] [7] [9].
- **Simuladores virtuales en pantalla:** Son programas computacionales interactivos que permiten emular distintas condiciones fisiológicas. Permiten el entrenamiento de habilidades en la toma de decisiones y el fortalecimiento del trabajo en equipo [5] [7] [8].

- **Simuladores de tareas complejas:** Combinan modelos del tipo “*part task trainers*” con dispositivos electrónicos y computacionales para representar con precisión espacios anatómicos en 3D y una amplia gama de procedimientos clínicos. Permiten el desarrollo de habilidades psicomotoras, mejorar el trabajo en equipo y la toma de decisiones frente a situaciones complejas [5] [7] [8].
- **Simuladores de paciente completo:** Integran la bioingeniería y la ciencia conductual con modelos computacionales para el desarrollo de maniqués interactivos a tamaño real. Permiten simular una gran variedad de aspectos anatómicos y fisiológicos. Se utilizan para el desarrollo de habilidades en el manejo de situaciones clínicas complejas y el fortalecimiento del trabajo en equipo [5] [7] [8].

En el área ortopédica, y en particular para el entrenamiento de la técnica artroscópica se distingue el uso de cuatro tipos de simuladores:

- **Cadáveres:** Corresponden al mejor sustituto para el entrenamiento de procedimientos artroscópicos complejos, ya que proveen un alto realismo. Sin embargo, son costosos, su disponibilidad está limitada y existen restricciones éticas que limitan su uso en este tipo de aplicaciones [10] [11].
- **Animales:** Proporcionan un alto grado de realismo (menor que los cadáveres y mayor que los modelos de plástico o las cajas de entrenamiento). Sin embargo, son costosos, su disponibilidad está limitada y no son reutilizables [10] [11].
- **Realidad virtual:** Permiten el entrenamiento de habilidades cognitivas, mejorar la toma de decisiones y además, proporcionan retroalimentación háptica. Sin embargo, son costosos, su disponibilidad es baja (en términos generales), y el realismo que entregan es inferior a los cadáveres o animales [10] [11] [15] [16] [17].
- **Modelos de plástico:** Emulan las estructuras óseas y blandas de la articulación en un sistema que permite el aprendizaje de las habilidades básicas en artroscopia como la triangulación, la percepción de profundidad en un plano bidimensional, la visualización y el reconocimiento de estructuras, entre otras. Sin embargo, carecen de realismo (limitado a la capacidad de reproducción fisiológica y anatómica del modelo), necesitan reparación y mantención continua [10] [11] [12].

- **Cajas de entrenamiento:** Son simples, reutilizables y presentan una buena relación costo-efectividad. Sin embargo, carecen de realismo, necesitan la supervisión de un especialista, no proporcionan retroalimentación y no permiten la manipulación de la articulación [11] [13] [14].

1.3. Objetivo General

Desarrollar un modelo anatómico de hombro de bajo costo para el entrenamiento de habilidades quirúrgico artroscópicas.

1.4. Objetivos Específicos

- Modelar la articulación glenohumeral y acromioclavicular.
- Realizar pruebas de simulación clínica.

1.5. Alcances y Limitaciones

En relación a los alcances del proyecto, este contempla el desarrollo de un simulador anatómico de hombro a escala real con las siguientes estructuras:

- Complejo óseo del hombro: húmero, escápula y clavícula.
- Articulación glenohumeral: Con tres grados de libertad.
- Labrum y el tendón de la cabeza larga del bíceps
- Músculos del manguito rotador a nivel de tendón.
- Ligamentos del intervalo rotador: Coracohumeral, glenohumeral superior y medio.
- Articulación acromioclavicular.
- Capa envolvente del modelo.
- Soporte.

En cuanto a las limitaciones, estas contemplan el uso de materiales de bajo costo comercial tales como cauchos u otros materiales con propiedades elásticas similares a los tendones y a los

ligamentos presentes en las articulaciones.



Capítulo 2. Marco Teórico

2.1. El Complejo Articular del Hombro

Desde el punto de vista anatómico el hombro está formado por tres articulaciones (Fig. 2.1):

- Articulación glenohumeral (GH, 1): Permite la unión entre la escapula y el húmero. Pertenece al grupo de las enartrosis o articulaciones de superficie semiesférica, con una parte cóncava y otra convexa. Posee un amplio rango de movimiento en los tres ejes espaciales [18] [19].
- Articulación acromioclavicular (AC, 4): Permite la unión entre el acromion y la clavícula. Pertenece al grupo de las artrodias o articulaciones planas. Permite realizar simples movimientos de deslizamiento con tres grados de libertad [18] [19].
- Articulación esternoclavicular (5): Permite la unión entre el esternón y la clavícula. Pertenece al grupo de articulaciones por encaje recíproco. Posee tres grados de movimientos, aunque con un rango limitado [18] [19].

Desde el punto de vista fisiológico aparecen dos articulaciones:

- Articulación subdeltoidea (2): Está compuesta por dos superficies que se deslizan entre sí. Dichas superficies corresponden a la cara profunda del deltoides y el manguito rotador. Se encuentra mecánicamente unida a la articulación glenohumeral, y en consecuencia, cualquier movimiento en esta última produce un movimiento en la articulación subdeltoidea [18].
- Articulación escapulotorácica (3): Corresponde al plano de deslizamiento entre la escápula y la parrilla costal. Se encuentra mecánicamente unida a las articulaciones acromioclavicular y esternoclavicular [18].

Este conjunto de articulaciones se conoce como el complejo articular del hombro. En la práctica, dichas articulaciones funcionan simultáneamente y en proporciones variables.

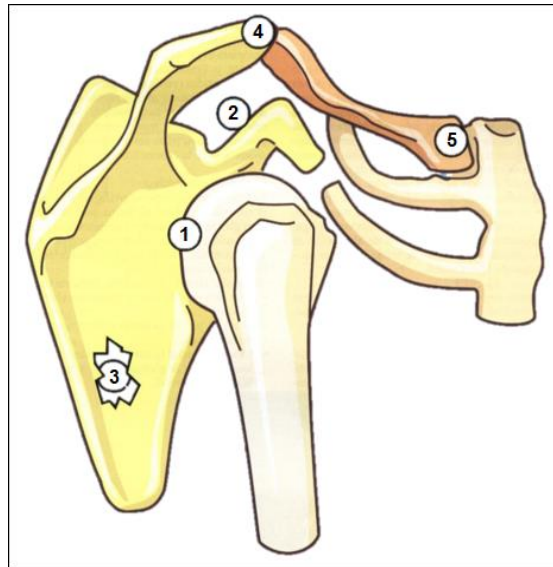


Fig. 2.1: Articulaciones del Hombro. 1) Glenohumeral, 2) Subdeltoidea, 3) Escapulotorácica, 4) Acromioclavicular, 5) Esternoclavicular

2.1.1 Superficies Articulares de la Articulación Glenohumeral

- **Cabeza Humeral:** Orientada hacia arriba, hacia adentro y atrás (Fig. 2.2), puede compararse con una esfera de 30 [mm] de radio. Sin embargo, esta esfera es irregular, con un diámetro vertical 3-4 [mm] mayor al diámetro anteroposterior. Su radio de curva decrece ligeramente de arriba abajo. Por lo tanto, cuando la parte superior de la cabeza humeral conecta con la glenoide, la zona de apoyo es mayor y la articulación más estable. La epífisis superior del húmero está separada por el cuello anatómico, cuyo plano está inclinado 45° con respecto a la horizontal [18] [20]. Contiene dos prominencias:
 - Tuberosidad menor o troquín, anterior
 - Tuberosidad mayor o troquíter, externa.

- **Cavidad glenoidea:** Se encuentra ubicada en el ángulo superoexterno del cuerpo de la escápula (a, Fig. 2.3), está orientada hacia fuera, hacia delante y ligeramente hacia arriba. Es cóncava en ambos sentidos (vertical y transversal), pero su concavidad es irregular y menos acentuada que la convexidad de la cabeza humeral. Está rodeada por el prominente reborde glenoideo. Su superficie es menor a la de la cabeza del húmero [18] [20].

- **Labrum:** Es un anillo fibrocartilaginoso (b, Fig. 2.3), localizado en el reborde glenoideo. Recubre la escotadura glenoidea y aumenta ligeramente la superficie de la glenoide, acentuando su concavidad y restableciendo la congruencia entre las superficies articulares [18] [20]. Triangular cuando se secciona, presenta tres caras:
 - Una interna, que se inserta en el contorno glenoideo.
 - Una periférica, donde se insertan algunas fibras de la cápsula.
 - Una central, cuyo cartílago es una prolongación de la glenoide ósea, y que contacta con la cabeza humeral.

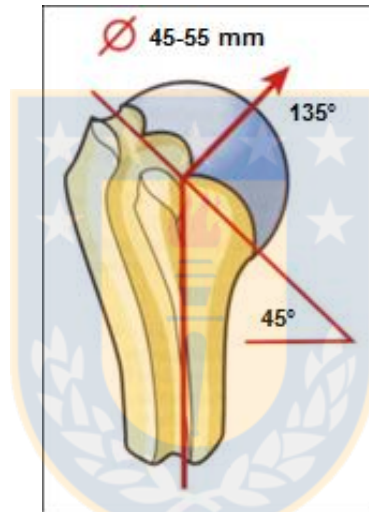


Fig. 2.2: Vista Anterior de la Cabeza Humeral

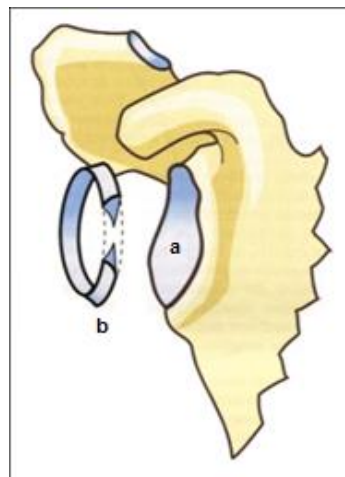


Fig. 2.3: Vista Anterior del Borde Externo de la Escápula

2.1.2 El Aparato Capsulo-Ligamentoso y Músculo-Tendinoso de la Articulación Glenohumeral

El aparato capsulo-ligamentoso de la articulación del hombro es lo suficientemente laxo para permitir su amplio rango de movilidad. Sin embargo, por sí solo, no es capaz de garantizar su coaptación [18]. Las Figs. 2.4, 2.5, 2.6 y 2.7, muestran la articulación glenohumeral abierta. La vista interna del extremo superior de la cabeza humeral (Fig. 2.4), muestra:

- La cabeza humeral, rodeada por la capsula (1 y 2), eleva pliegues sinoviales por debajo del polo inferior de la cabeza del húmero.
- El tendón seccionado de la cabeza larga del músculo bíceps braquial (3).
- El engrosamiento formado por el haz superior del ligamento glenohumeral (SGHL, 4).
- El tendón del músculo subescapular seccionado (SSC, 5), cerca de su inserción en el troquin.

La vista lateral de la escápula (Fig. 2.5), muestra:

- La cavidad glenoidea (1), rodeada del labrum que pasa formando un puente por arriba de la escotadura glenoidea.
- El tendón de la cabeza larga del músculo bíceps braquial (2, BT), que se inserta en el tubérculo supraglenoideo y que participa en la formación del labrum.
- La cápsula (3, 4), reforzada por el ligamento:
 - Coracohumeral (CHL, 5).

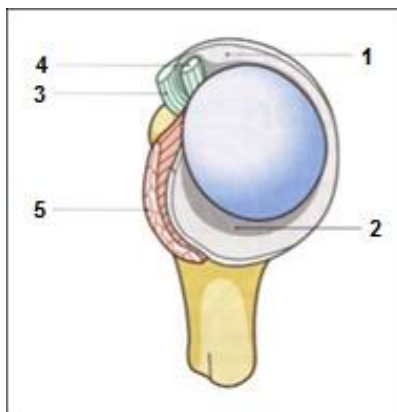


Fig. 2.4: Vista Interna de la Cabeza Humeral. 1 y 2) Cápsula, 3) Tendón de la Cabeza Larga del Bíceps, 4) SGHL, 5) SSC

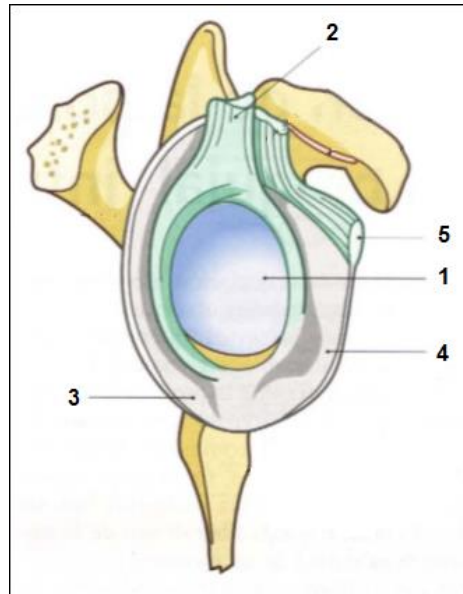


Fig. 2.5: Vista Lateral de la Escápula. 1) Cavidad Glenoidea, 2) BT, 3 y 4) Cápsula, 5) CHL

La vista anterior de la articulación glenohumeral abierta (Fig. 2.6), muestra:

- El ligamento coracohumeral (1) que se extiende desde la apófisis coracoides (COR, 2) hasta el troquíter. La separación de los dos haces del ligamento coracohumeral constituye, con la escotadura intertuberositaria, el orificio de entrada intra-articular del tendón de la cabeza larga del músculo bíceps braquial (3).
- El ligamento glenohumeral con sus tres haces: superior (4), medio (MGHL, 5) e inferior (IGHL, 6). El conjunto dibuja una Z expandida sobre la cara anterior de la cápsula.
- El tendón del subescapular (7, seccionado en la figura).

La vista posterior de la articulación glenohumeral abierta (Fig. 2.7), muestra:

- Los haces medio (1) e inferior (2) del ligamento glenohumeral.
- El ligamento coracohumeral (3).
- La parte intra-articular del tendón de la cabeza larga del músculo bíceps braquial (4).
- La cavidad glenoidea, reforzada por el labrum (5).
- Por fuera, en el troquíter, se muestra la inserción de los tres músculos periarticulares posteriores:

- Supraespinoso (SSP, 6).
- Infraespinoso (ISP, 7).
- Redondo menor (RM, 8).

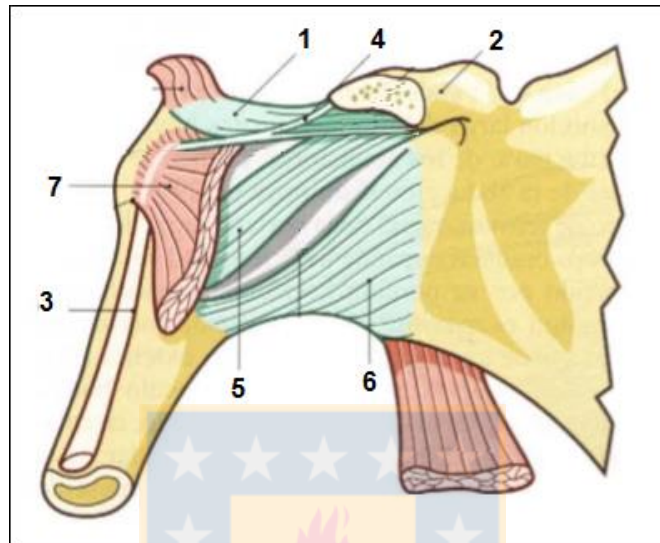


Fig. 2.6: Vista Anterior de la Articulación GH Abierta. 1) CHL, 2) COR, 3) BT, 4) SGHL, 5) MGHL, 6) IGHL, 7) SSC

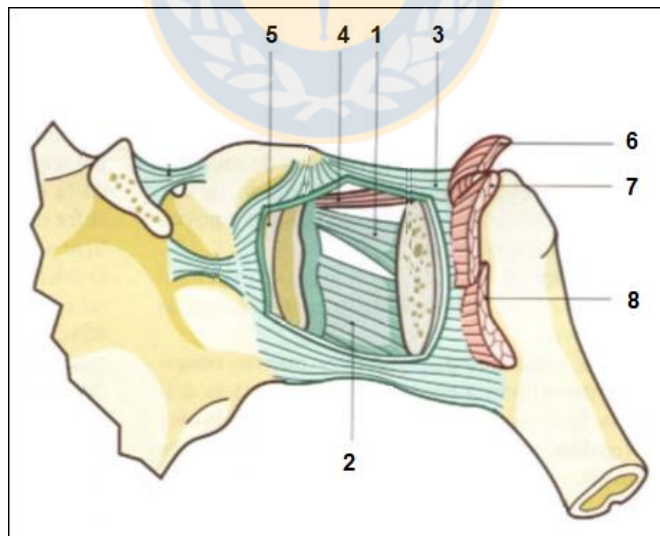


Fig. 2.7: Vista Posterior de la Articulación GH Abierta. 1) MGHL, 2) IGHL, 3) CHL, 4) BT, 5) Labrum, 6) SSP, 7) ISP, 8) RM

2.1.3 El labrum y el Tendón de la Cabeza Larga del Bíceps Braquial

El corte frontal de la articulación glenohumeral (Fig. 2.8), muestra:

- El labrum (1), que acentúa la profundidad de la cavidad glenoidea.
- El tendón de la porción larga del bíceps braquial (2), que se inserta en el tubérculo supraglenoideo y en el polo superior del rodete glenoideo de la escápula. Para salir de la articulación se desliza bajo la cápsula (3) a través de la escotadura intertuberositaria (4).

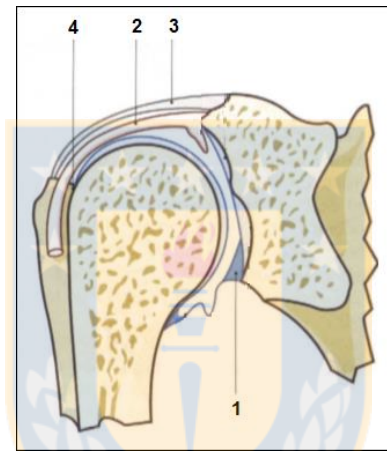


Fig. 2.8: Corte Frontal de la Articulación GH. 1) Labrum, 2) BT, 3) Cápsula, 4) Escotadura Intertuberositaria

2.1.4 El Manguito Rotador

El manguito rotador (MR) es un complejo muscular que contribuye a la estabilización dinámica de la articulación. Está formado por los músculos:

- **Subescapular:** Músculo ancho, grueso y triangular. Ocupa la fosa subescapular. Por dentro, se inserta en el borde espinal y en el borde axilar de la escápula, mientras que por fuera, en el troquín (Fig. 2.9) [21].
- **Supraespinoso:** Músculo piramidal y triangular. Se ubica en la fosa supraespinosa. Por dentro se inserta en esta cavidad, mientras que por fuera, en la carilla superior del troquiter (Figs. 2.9 y 2.11) [21].

- **Infraespinoso:** Músculo aplanado y triangular. Se ubica en la fosa infraespinosa. Por dentro se inserta en la fosa infraespinosa, mientras que por fuera se ancla a la carilla posterosuperior del troquíter (Fig. 2.11) [21].
- **Redondo menor:** Músculo con forma cilíndrica, rodea el borde externo del infraespinoso. Por dentro, se inserta en una carilla situada en el borde axilar de la escápula, mientras que por fuera, se inserta en la carilla posteroinferior del troquíter (Fig. 2.11) [21].

Las Figs. 2.9, 2.11 y 2.13, muestran en detalle la forma de los músculos y de las uniones musculotendinosas del manguito rotador, mientras que las Figs. 2.10 y 2.12, muestran las entesis (sitios de inserción), de los tendones de este grupo muscular [22] [23]. La tabla 2.1 expone en detalle sus dimensiones.

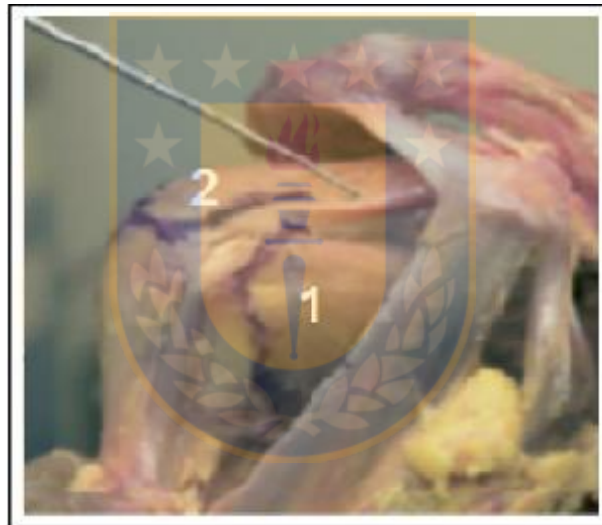


Fig. 2.9: Vista Anterior de las Uniones Musculotendinosas del MR. 1) SSC, 2) SSP

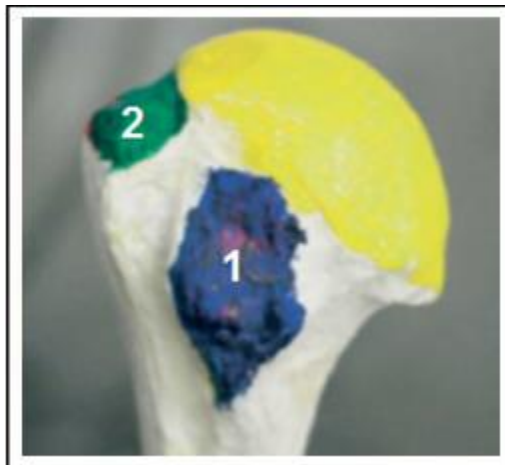


Fig. 2.10: Huella de la Entesis de los Tendones de los Músculos del MR. 1) SSC, 2) SSP

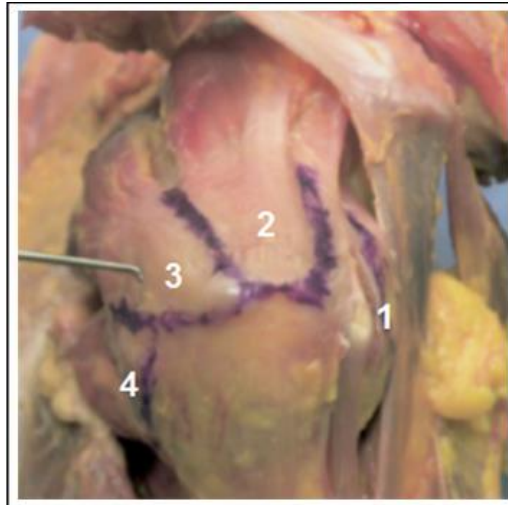


Fig. 2.11: Vista Lateral de las Uniones Musculotendinosas del MR. 1) SSC, 2) SSP, 3) ISP, 4) RM

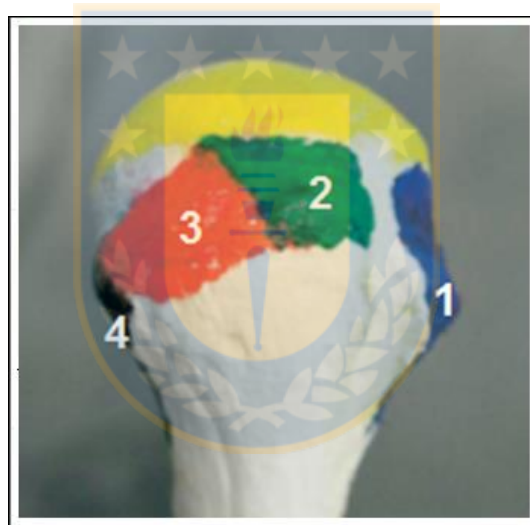


Fig. 2.12: Huella de la Entesis de los Tendones de los Músculos del MR. 1) SSC, 2) SSP, 3) ISP, 4) RM

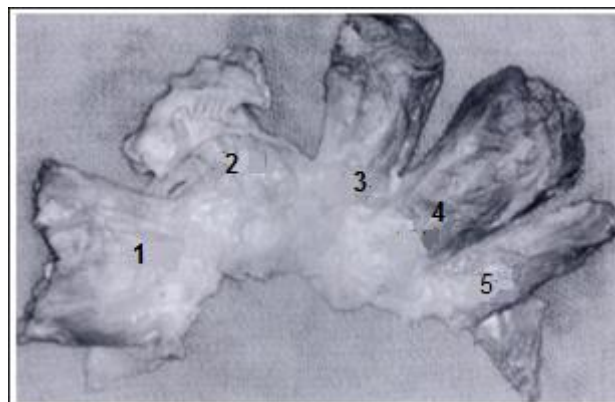


Fig. 2.13: Unión Miotendinosa Completa del MR. 1) SSC, 2) CHL, 3) SSP, 4) ISP, 5) RM

TABLA 2.1: Dimensiones de las Entesis de los Tendones de los Músculos del MR

Tendón	Dimensión (promedio largo x ancho) [mm]
Subescapular	24 x 18
Supraespinoso	16 x 12
Infraespinoso	16 x 13
Redondo Menor	20 x 11

2.1.5 El Intervalo Rotador

Desde el punto de vista anatómico, el intervalo rotador (IR) es un espacio triangular ubicado en la región anterosuperior del hombro. Los lados de este triángulo corresponden a la base de la apófisis coracoides, el borde superior del tendón del subescapular y el borde anterior del tendón del supraespinoso (Fig. 2.14). En este espacio se encuentra el ligamento coracohumeral, el haz superior y medio del ligamento glenohumeral, el tendón de la cabeza larga del bíceps braquial y una delgada capa que cubre las aperturas capsulares (RIC) en la región del intervalo (Fig. 2.15). Dichos tejidos contribuyen a la estabilización estática y al funcionamiento biomecánico correcto de la articulación [24].

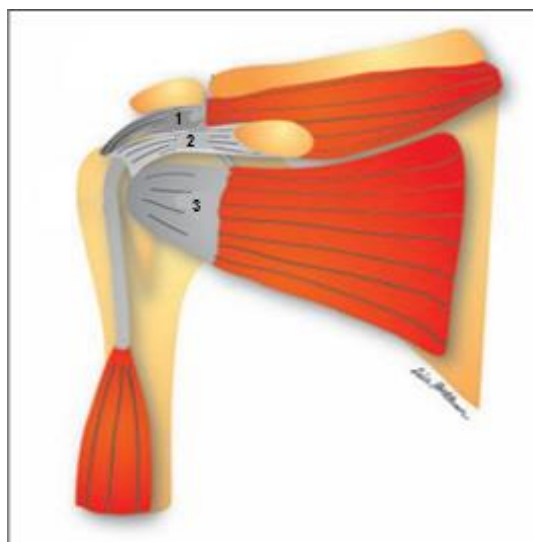


Fig. 2.14: Vista Externa del IR. 1) SSC, 2) CHL, 3) SSP

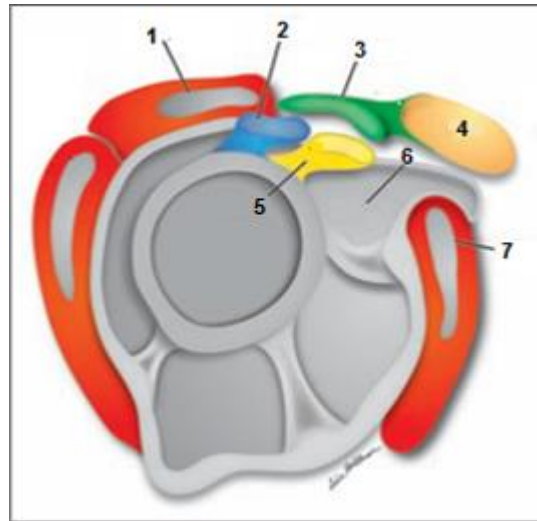


Fig. 2.15: Vista Interna del IR. 1) SSP, 2) BT, 3) CHL, 4) COR, 5) SGHL, 6) RIC, 7) SSC

2.1.6 La Articulación Acromioclavicular

La Fig. 2.16 muestra la articulación acromioclavicular. Puede observarse la existencia de un aparato ligamentoso débil que la deja vulnerable y expuesta a luxaciones [18]. Además, puede apreciarse:

- La espina de la escápula (1), prolongada por el acromion (2), la que se encuentra orientada hacia arriba, hacia delante y hacia dentro. Su carilla articular (3), plana y ligeramente convexa en el borde anterointero.
- El borde externo de la clavícula (4). Su carilla articular (5), idéntica a la anterior, orientada hacia abajo, hacia atrás y hacia afuera.

El corte frontal adjunto en la zona inferior derecha de la Fig. 2.16 da cuenta del grado de exposición de la articulación y de la inestabilidad del ligamento acromioclavicular (LAC, 6 y 7). Es por esto que la estabilidad de la articulación depende de dos ligamentos extra-articulares que nacen en la apófisis coracoides (8):

- El ligamento conoide (9), que nace en la curva de la apófisis coracoides y se inserta en la cara inferior de la clavícula en el tubérculo conoide.

- El ligamento trapezoide (10), que se inserta en la apófisis coracoides, por delante del anterior, desde donde se dirige hacia arriba y hacia afuera, se adhiere a una zona rugosa y triangular que prolonga el tubérculo conoide hacia delante y hacia afuera.

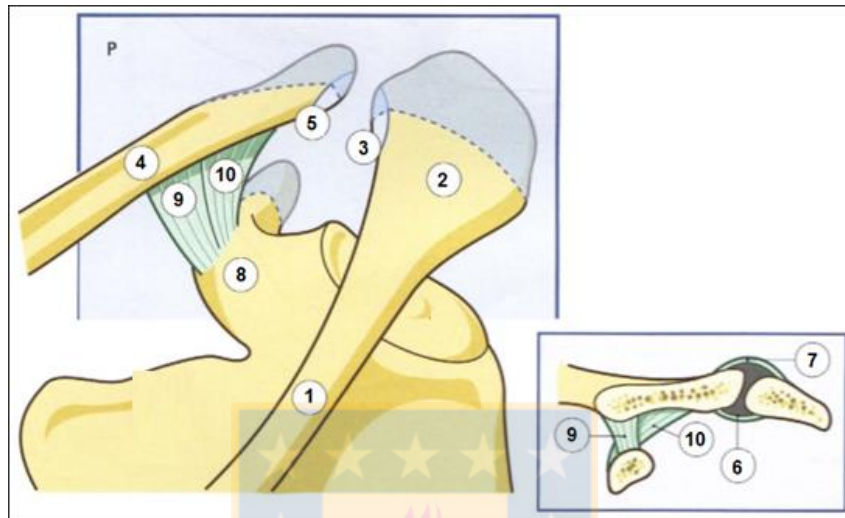


Fig. 2.16: Articulación Acromioclavicular. 1) Espina de la Escápula, 2) Acromion, 3) Carilla Articular del Acromion, 4) Borde Externo de la Clavícula, Carilla Articular de la Clavícula, 6 y 7) LAC, 8) COR, 9) Ligamento Conoide, 10) Ligamento Trapezoide

2.1.7 Movimientos del Hombro

El hombro es la articulación más móvil del cuerpo humano, posee tres grados de libertad, lo que permite el movimiento del miembro superior en un rango muy amplio, en los tres planos espaciales, sujeto a tres ejes principales (Fig. 2.17):

- Eje transversal (1): Permite realizar los movimientos de flexoextensión en el plano sagital.
- Eje anteroposterior (2): Permite realizar los movimientos de abducción y aducción en el plano frontal.
- Eje longitudinal (3): Permite realizar los movimientos de flexoextensión horizontal en el plano transversal.
- Eje longitudinal del húmero (4): Permite realizar la rotación externa e interna del brazo y del miembro superior de dos formas distintas:

- La rotación voluntaria que utiliza el tercer grado de libertad y que solo es posible en articulaciones del tipo enartrosis. Se debe a la contracción de los músculos rotadores.
- La rotación automática que aparece sin ninguna acción voluntaria.

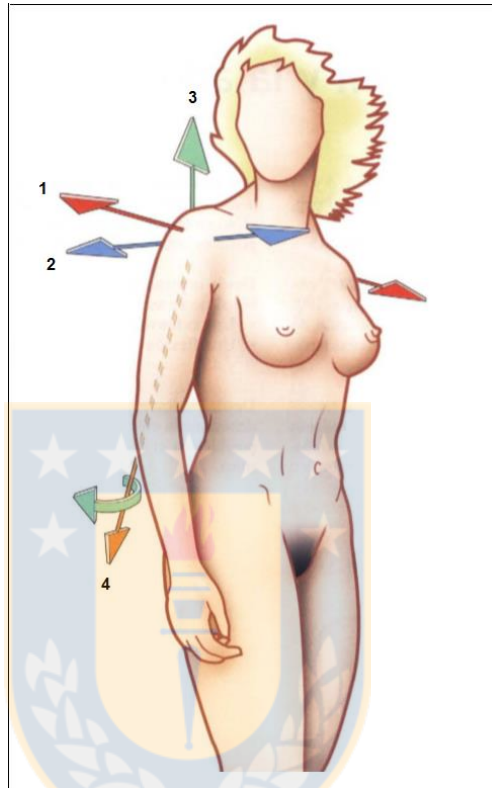


Fig. 2.17: Ejes Fisiológicos del Hombro. 1) Transversal, 2) Anteroposterior, 3) Longitudinal, 4) Longitudinal del Húmero

- **Flexoextensión:** Los movimientos de flexoextensión (Fig. 2.18), se realizan en el plano sagital, alrededor del eje transversal. Se dividen en dos movimientos:
 - Extensión (A): Movimiento de poca amplitud, 45-50°. Activa los músculos deltoides, dorsal ancho, redondo mayor y tríceps braquial.
 - Flexión (B): Movimiento de gran amplitud, 180°. Activa los músculos: deltoides, pectoral mayor, coracobraquial, bíceps braquial y braquial.

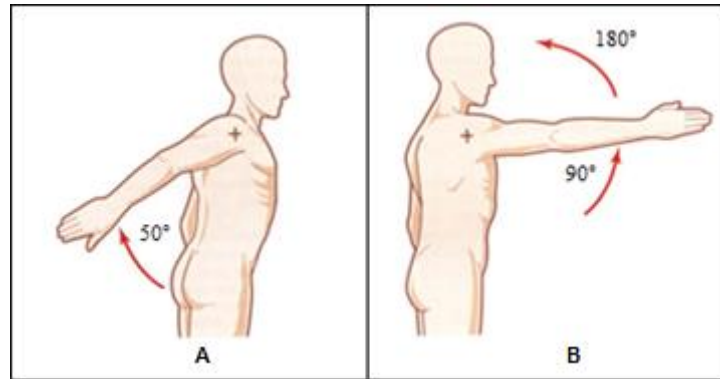


Fig. 2.18: Movimientos de Flexoextensión

- **Aducción:** Los movimientos de aducción (Fig. 2.19) se ejecutan desde la posición anatómica en el plano frontal, pero son mecánicamente imposibles debido a la existencia del tronco. Desde la posición anatómica, la aducción no es posible si no se asocia con:

- Una extensión: Una aducción muy leve (A). Activa los músculos: dorsal ancho y redondo mayor.
- Una flexión: La aducción alcanza entre 30 y 45° (B). Activa los músculos: pectoral mayor, subescapular y coracobraquial.

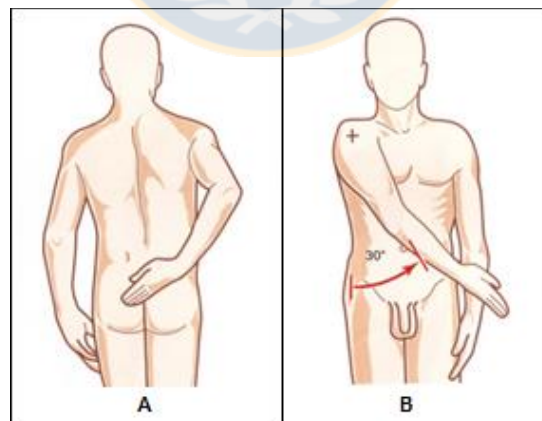


Fig. 2.19: Movimientos de Aducción

- **Abducción:** La abducción (Fig. 2.20), es el movimiento que aleja el miembro superior del tronco. Se realiza en el plano frontal, alrededor del eje anteroposterior. En cuanto a las acciones

musculares y el comportamiento articular, la abducción, desde la posición anatómica, pasa por tres etapas:

- Abducción de 0 a 60° (B), que puede realizarse únicamente en la articulación glenohumeral.
- Abducción de 60 a 120° (C), que necesita la participación de la articulación escapulotorácica.
- Abducción de 120 a 180° (D), que utiliza además de la articulación glenohumeral y la articulación escapulotorácica, la inclinación del lado opuesto del tronco.

Los músculos responsables de la abducción son: El deltoides, el supraespinoso, el serrato anterior, el trapecio, el subescapular, el infraespinoso, el redondo menor y el bíceps braquial a través del tendón de la cabeza larga.

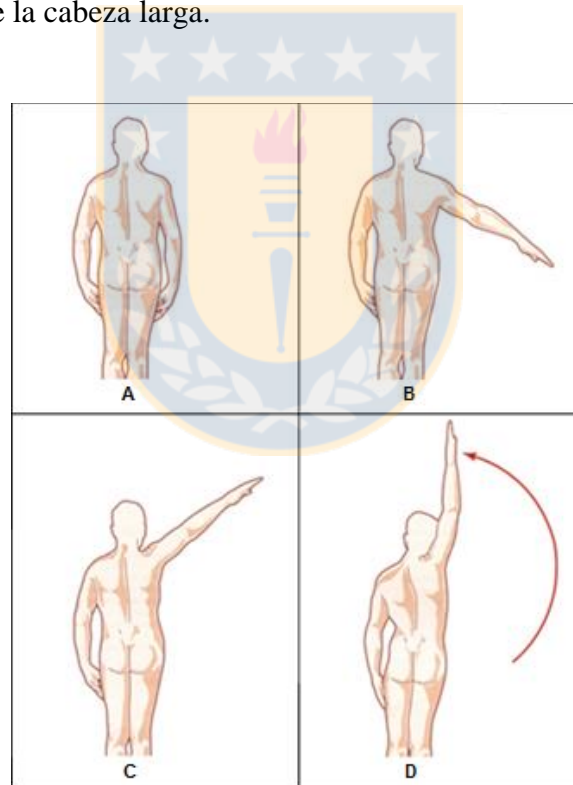


Fig. 2.20: Etapas del Movimiento de Abducción

- **Flexoextensión horizontal:** La flexoextensión horizontal (Fig. 2.21), corresponde al movimiento del miembro superior en el plano transversal en torno al eje vertical, o específicamente, en torno a una sucesión de ejes verticales, ya que el movimiento se realiza tanto en la articulación glenohumeral, como en la escapulotorácica. La posición anatómica se

define con el miembro superior en abducción de 90° en el plano frontal medio. Se divide en dos movimientos:

- Flexión horizontal (A): Movimiento que combina la flexión y la abducción. Posee un rango de movimiento de 140° de amplitud. Activa los músculos deltoides, subescapular, pectoral mayor y menor y serrato anterior.
- Extensión horizontal (B): Movimiento que combina la extensión y la aducción. Posee un rango de movimiento de $30-40^\circ$ de amplitud. Activa los músculos supraespinoso, infraespinoso, Redondos mayor y menor, romboides, trapecio y dorsal ancho.

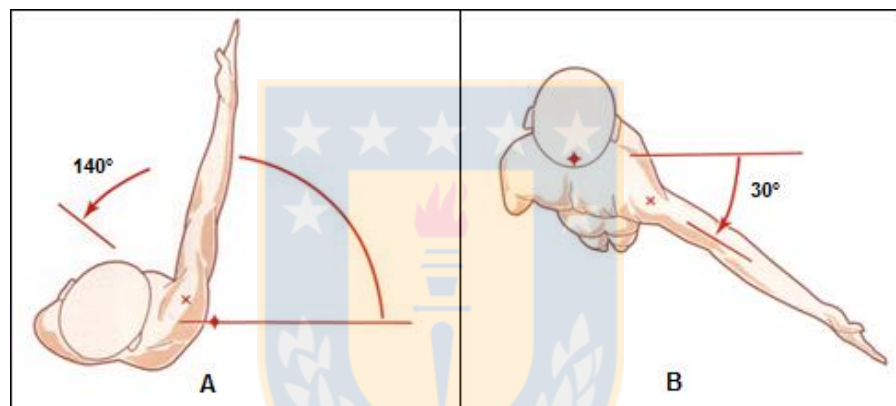


Fig. 2.21: Movimientos de Flexoextensión Horizontal

- **Rotación del brazo sobre el eje longitudinal:** La rotación del brazo sobre el eje longitudinal (Fig. 2.22), puede realizarse en cualquier posición del hombro. Se trata de la rotación voluntaria de las articulaciones con tres ejes y tres grados de libertad. Se divide en dos movimientos:
 - Rotación externa: Su amplitud es de 80° (A). Activa los músculos infraespinoso y Redondo menor.
 - Rotación interna. Su amplitud es de $100-110^\circ$ (B). Para alcanzarla, se requiere necesariamente que el antebrazo pase por detrás del tronco, lo que se asocia a un cierto grado de extensión del hombro. Activa los músculos supraespinoso, subescapular, pectoral mayor, dorsal ancho y redondo mayor.

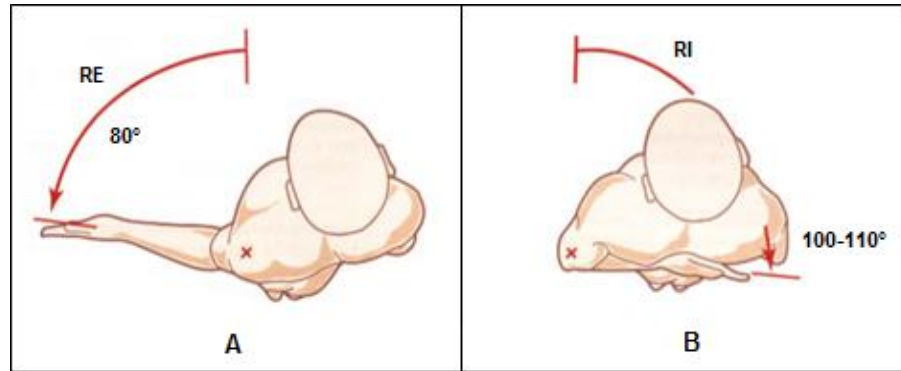


Fig. 2.22: Movimientos de Rotación

- **Circunducción:** El movimiento de circunducción (Fig. 2.23), combina los movimientos fundamentales en los tres ejes espaciales. En dicha imagen se muestra en rojo la trayectoria de las puntas de los dedos que representan la base del cono de circunducción. Los tres planos ortogonales de referencia se cruzan en un punto localizado en el centro del hombro y se denominan:
 - Plano sagital (A): O más bien para-sagital, ya que el verdadero sagital pasa por el eje longitudinal del cuerpo. Corresponde al plano de flexoextensión.
 - Plano frontal (B): Paralelo al plano de apoyo dorsal. Corresponde al plano de aducción-abducción.
 - Plano transversal (C): Perpendicular al eje del cuerpo. Corresponde al plano de flexoextensión horizontal.

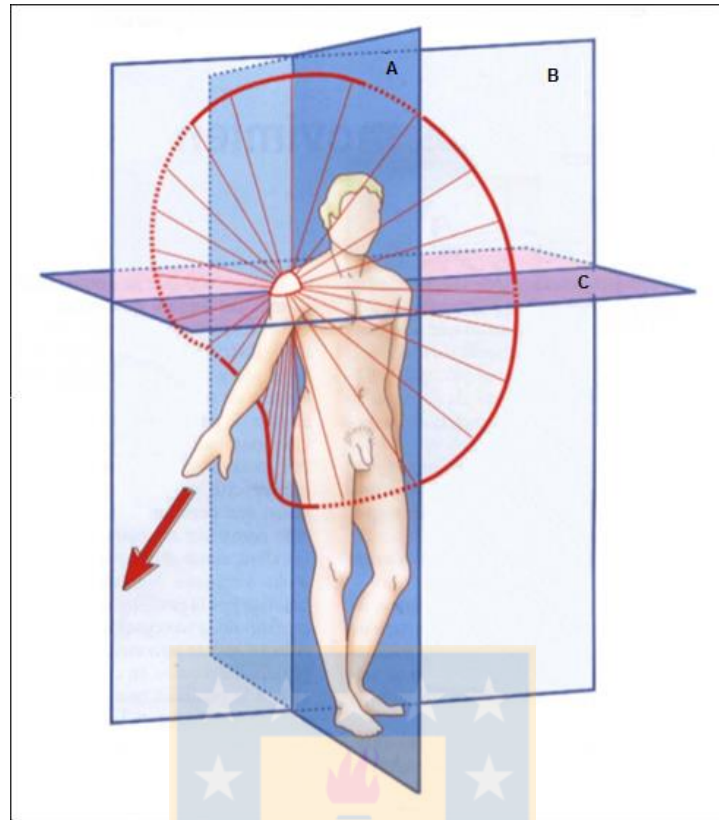


Fig. 2.23: Planos Anatómicos del Hombro. A) Sagital, B) Frontal, C) Transversal. Cono de Circunducción (Delineado en Rojo)

2.2. Patologías Comunes que Afectan el Hombro

2.2.1 Síndrome de Pinzamiento

El síndrome de pinzamientos produce cuando se realiza el movimiento de abducción y se reduce el espacio entre el acromion y el manguito rotador. De esta manera, el acromion puede comprimir el tendón del supraespinoso y la bursa subacromial, causando inflamación y dolor (Fig. 2.24) [25].



Fig. 2.24: Pinzamiento del Acromion sobre el MR y la Bursa

2.2.2 Desgarros del Manguito Rotador

El desgarro del manguito rotador es una condición patológica común del hombro [26]. Generalmente afecta a los tendones que están debilitados producto de la combinación de factores como: la edad, traumatismos agudos recurrentes, pinzamiento subacromial, entre otras. Los desgarros más frecuentes se originan en el tendón del supraespinoso y pueden variar desde pequeñas lesiones hasta desgarros masivos o completos (Fig. 2.25).

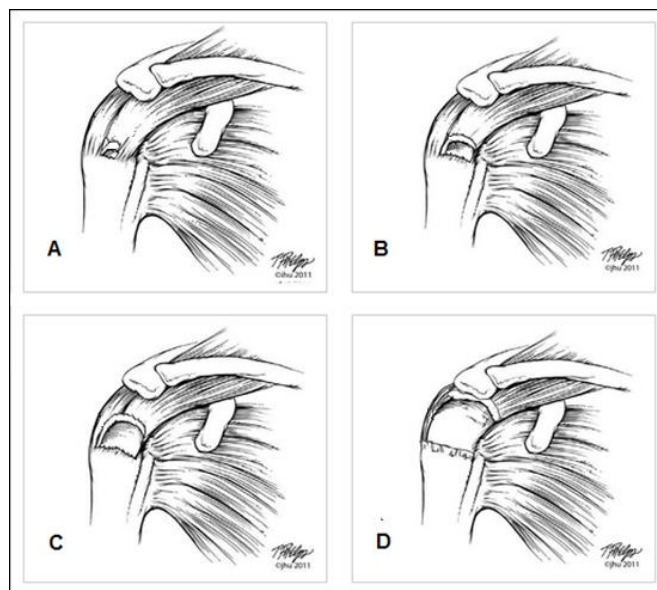


Fig. 2.25: Niveles de Desgarro del Tendón del Supraespinoso: A) Leve, B) Moderado, C) De Gran Tamaño, D) Masivo

2.2.3 Desgarros de la Parte Superior del Labrum

Los desgarros de la parte superior del labrum (SLAP), se presentan en la parte superior del labrum y se extienden desde la parte anterior a la posterior (Fig. 2.26) [27]. Snyder fue el primero que clasificó esta lesión y lo hizo caracterizándola en cuatro tipos:

- Tipo I: Presenta flecos en la parte superior del labrum sin desgarros. El tendón del bíceps no presenta ninguna lesión.
- Tipo II: Son las más comunes. En la parte superior del labrum están extraídas de la inserción.
- Tipo III: Son desgarros del labrum superior en asa de cubo y con el tendón del bíceps intacto.
- Tipo IV: Son desgarros en asa de cubo de la parte superior del labrum con diversos grados de extensión y afectación sobre el tendón del bíceps.

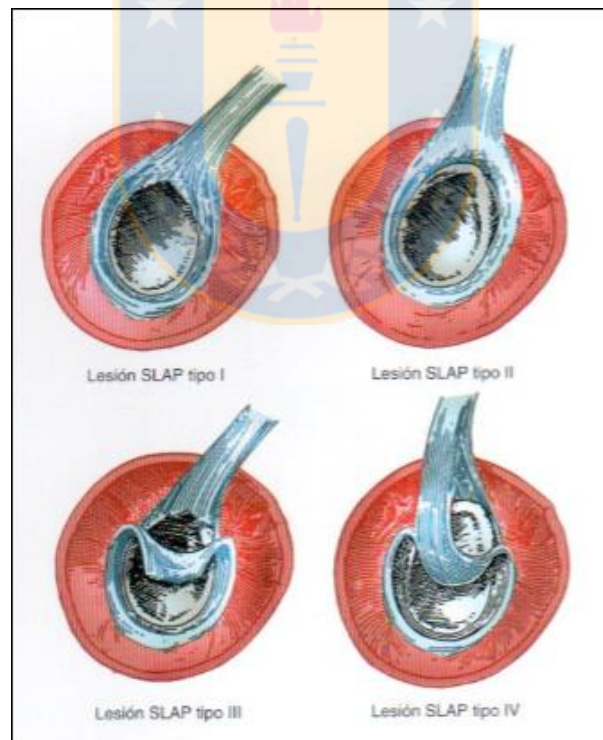


Fig. 2.26: Clasificación de Snyder para los Desgarros SLAP

2.3. Artroscopia de Hombro

La artroscopia de hombro se recomienda cuando el dolor persiste luego de un tratamiento no quirúrgico. El tratamiento no quirúrgico incluye reposo, terapias físicas, medicamentos o inyecciones que pueden reducir la inflamación. En una articulación de hombro lesionada la inflamación produce hinchazón, dolor y rigidez. Las lesiones, el uso excesivo y el desgaste relacionado con la edad son los principales responsables de la mayoría de los problemas en el hombro. La artroscopia de hombro puede aliviar los síntomas de muchos problemas que dañan los tendones del manguito rotador, el labrum, el cartílago articular y otros tejidos blandos que rodean la articulación [3]. Entre los procedimientos artroscópicos más comunes destacan:

- Reparación del manguito rotador.
- Reparación del labrum.
- Reparación de los ligamentos.
- Remoción de tejidos inflamados o cartílagos dañados.
- Reparación de luxaciones frecuentes del hombro.

2.3.1 Procedimiento Quirúrgico

- **Posicionamiento y Preparación:** Las posiciones del paciente utilizadas en artroscopia de hombro son:
 - En silla de playa: El paciente se encuentra semi-sentado en una postura similar a la que adoptaría en una silla reclinable.
 - Decúbito lateral: El paciente se encuentra acostado de lado en una mesa quirúrgica.

Una vez posicionado, los asistentes aíslan el hombro con un paño clínico y realizan la limpieza de la piel del hombro utilizando una solución antiséptica.

- **Procedimiento:** El cirujano realiza una marca de la articulación acromioclavicular sobre la piel del paciente, la que utiliza como referencia para realizar tres incisiones (una posterior y dos anteriores), que corresponden a los portales por donde se introducirán las herramientas

quirúrgicas (Fig. 2.27).

Las imágenes del artroscopio se proyectan en una pantalla de video mostrando al cirujano los tejidos de la articulación (Fig. 2.28). Una vez identificado el o los tejidos lesionados se insertan otras herramientas quirúrgicas que permiten reparar el tejido dañado [3]. En particular, para el tratamiento de desgarros del manguito rotador se utilizan anclas con suturas de alta resistencia que permiten fijar el tendón al hueso (Fig. 2.29) [28].

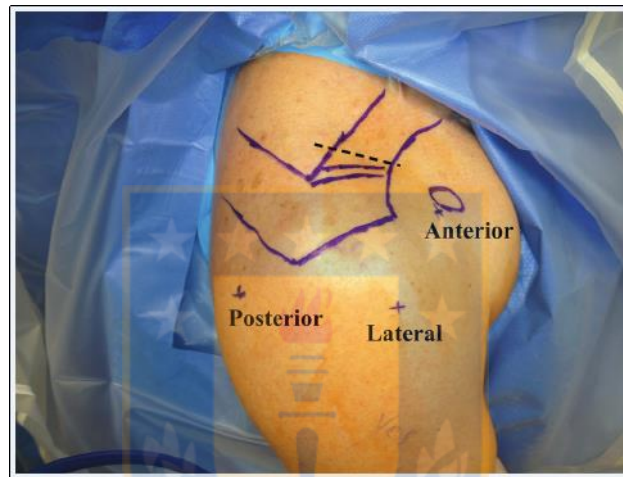


Fig. 2.27: Portales Artroscópicos

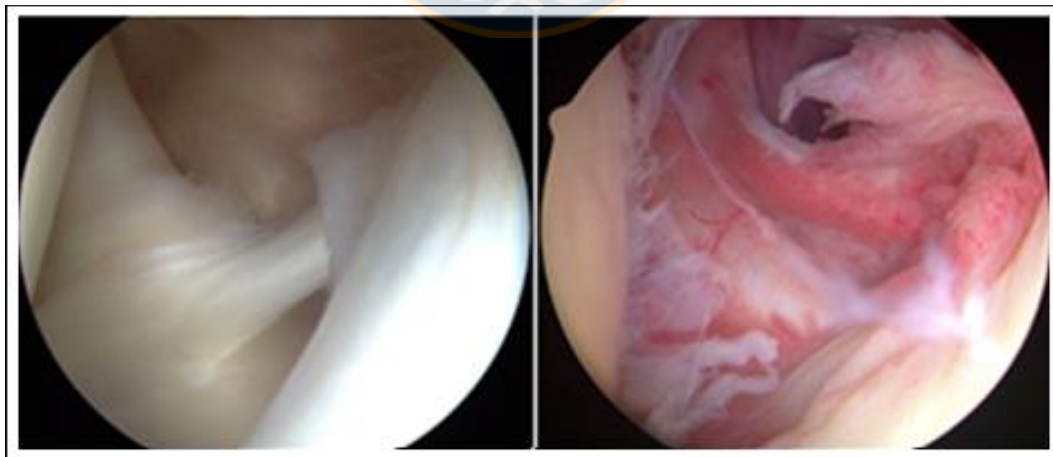


Fig. 2.28: Imágenes Artroscópicas. Tejido Normal (izquierda). Tejido Dañado (derecha)

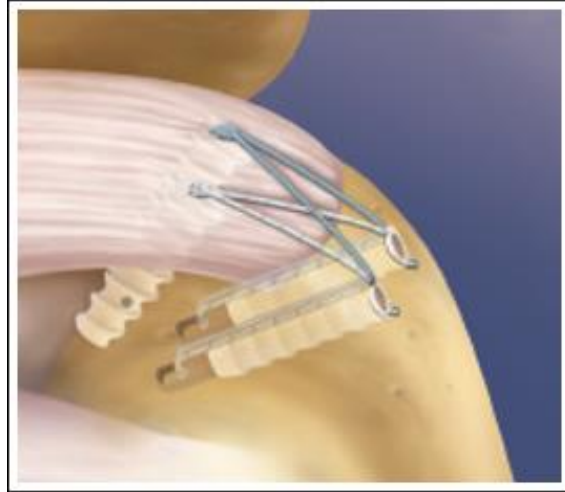


Fig. 2.29: Sistema de Anclaje para el Tendón del Supraespinoso

2.4. Características Histológicas de los Tejidos

2.4.1 Tejido Conjuntivo

El tejido conjuntivo constituye un alto porcentaje de la masa corporal y determina la cohesión de los diversos órganos, la interrelación entre ellos, así como también, la configuración y el mantenimiento de la postura. El tejido conjuntivo constituye la base para distintos tejidos y estructuras, como los huesos, cartílagos, cápsulas articulares, ligamentos, tendones, entre otros. Todas estas estructuras presentan una característica en común, su función depende fundamentalmente, de la calidad de sus componentes extracelulares [29]. A pesar de que los componentes básicos del tejido conjuntivo varían en cada uno de los órganos y estructuras del cuerpo, en todos ellos es posible distinguir:

- Un componente celular, constituido por elementos capaces de sintetizar proteínas de naturaleza fibrilar, glucoproteínas y polisacáridos
- Una matriz extracelular, constituida por fibras de colágeno, de elastina, glucoproteínas y glucosaminoglicanos.

2.4.2 Características Histológicas del Hueso

El tejido óseo es un tejido conjuntivo especializado y está compuesto por:

- Células: Osteoblastos, células de superficie en descanso, osteocitos y osteoclastos.
- Sustancia intercelular: Se divide en una sustancia orgánica (colágeno, glucoproteínas), y una sustancia inorgánica (fosfato de calcio calcificado).

La matriz ósea es la responsable de las propiedades biomecánicas del hueso. El colágeno le proporciona flexibilidad y resistencia a la tensión, mientras que las sales minerales le entregan dureza, rigidez y resistencia a la compresión. El esqueleto humano es un elemento pasivo del aparato locomotor, de modo que las fuerzas son transmitidas de un hueso a otro a través de las articulaciones. Para poder ejercer dicha función el hueso posee tres propiedades mecánicas fundamentales: la resistencia, la rigidez y la viscoelasticidad. La resistencia corresponde a la capacidad de resistir esfuerzos sin romperse. La rigidez del tejido está determinada por la pendiente en la región elástica de la curva de esfuerzo-deformación, y puede medirse con el módulo de elasticidad de Young. Cuanto más alto es el módulo elástico, más rígido es el material. La viscoelasticidad establece que el comportamiento mecánico depende del tiempo, en consecuencia, la relación entre el esfuerzo y la deformación no es constante y depende del tiempo de aplicación de la carga. La curva esfuerzo-deformación de la Fig. 2.30 muestra el comportamiento que experimenta una muestra de hueso sometida a una carga. En el segmento (A-B) de la curva puede apreciarse que la carga aplicada y la deformación que el tejido experimenta presentan un comportamiento lineal. Dicha zona se conoce como región elástica de la curva, ya que al eliminar la carga aplicada, el material vuelve a su longitud inicial sin sufrir daño. Si desde el límite elástico (B) se aumenta la carga, se observa que el material continúa deformándose hasta alcanzar el punto de falla, donde se rompe. El segmento (B-C) de la corresponde a la región plástica de la curva, ya que cuando la deformación alcanza dicha zona, el material experimenta una deformación permanente [30].

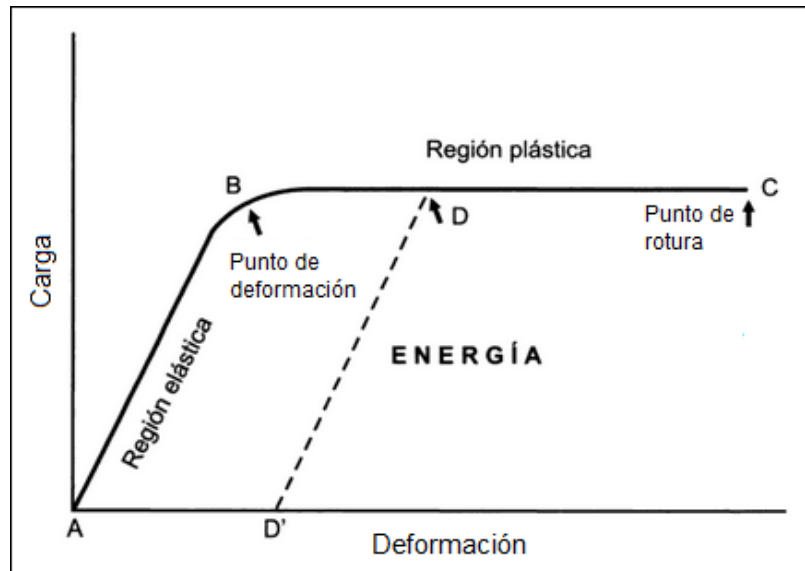


Fig. 2.30: Curva Carga-Deformación del Hueso

2.4.3 Características Histológicas de los Tendones y los Ligamentos

Tanto los tendones como los ligamentos están compuestos por tejido conjuntivo denso modelado. Los tendones actúan como puente para la transmisión de las fuerzas producidas por el músculo hacia el hueso, lo que resulta finalmente, en el movimiento de una articulación. Además, permiten mantener la distancia óptima entre el músculo y la articulación en la que actúan. Por otra parte, los ligamentos ayudan a mantener la unión entre los huesos y por lo tanto, proporcionan estabilidad mecánica a la articulación, guiando el movimiento de esta a través de su rango normal, previniendo el desplazamiento excesivo de la articulación. La tabla 2.2 expone las principales diferencias entre ambos tejidos. Las propiedades biomecánicas fundamentales que poseen estos tejidos son la elasticidad no lineal y la viscoelasticidad. La Fig. 2.31 muestra la curva esfuerzo-deformación de estos tejidos. En general, se distinguen tres regiones en esta curva: una región inicial, una región lineal y una región de falla. Dentro de la actividad fisiológica normal los tendones y los ligamentos cumplen sus funciones en el segmento que forman la zona inicial y el comienzo de la zona lineal, dicho segmento constituye la región elástica no lineal de la curva. La región inicial representa el despliegue de los haces ondulados de las fibras de colágeno y termina cuando el tejido alcanza aproximadamente una deformación del 2%. En la región lineal actúan las uniones intramoleculares de las fibras de colágeno, respondiendo a la carga con el estiramiento de estas. Si la deformación es

menor a un 4% el tendón puede regresar a sus dimensiones originales cuando se elimina la carga aplicada. Cuando el ligamento o tendón es estirado por sobre este límite algunas fibras de colágeno comienzan a fallar. Al acumular estas microfisuras, se reduce la rigidez, y el tendón o el ligamento cede, y en consecuencia, la deformación se vuelve plástica e irreversible. En general, cuando los tendones o los ligamentos son estirados por sobre el 8-10% de su longitud original comienzan a aparecer fallas macroscópicas [31] [32] [33].

TABLA 2.2: Diferencias entre los Tendones y los Ligamentos

Contenido / Característica	Tendones	Ligamentos
Fibroblastos	20%	20%
Sustancia fundamental	Escasa	20-30%
Colágeno (% del peso en seco)	85-95%	70-80%
Elastina	Escasa	Abundante
Agua	60-80%	60-80%
Organización de las fibras de colágeno	Organizadas	Aleatoria
Orientación de las fibras de colágeno	A lo largo del eje de tracción	En forma de red

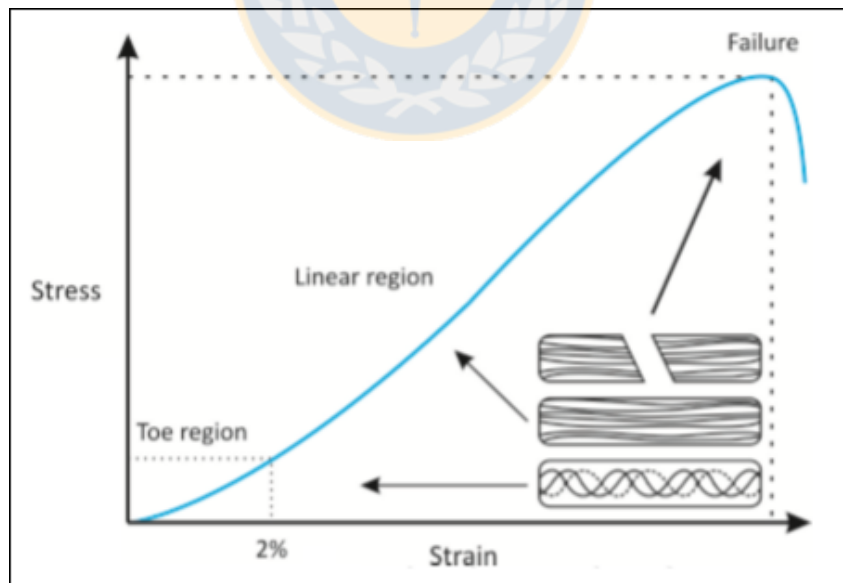


Fig. 2.31: Curva de Esfuerzo-Deformación Típica del Tendón y el Ligamento

2.5. Mecánica de los Elastómeros

Los elastómeros son un grupo de polímeros. En condiciones de reposo son amorfos y están compuestos por cadenas moleculares plegadas.

El comportamiento esfuerzo-deformación típico de un elastómero es totalmente elástico y no lineal (Fig. 2.32), de esta manera el material puede recuperar su forma original sin sufrir daños estructurales, luego de experimentar grandes deformaciones [34] [35].

Del análisis del comportamiento mecánico y de la curva de esfuerzo-deformación del material se deducen las semejanzas mecánicas con los tendones y los ligamentos.

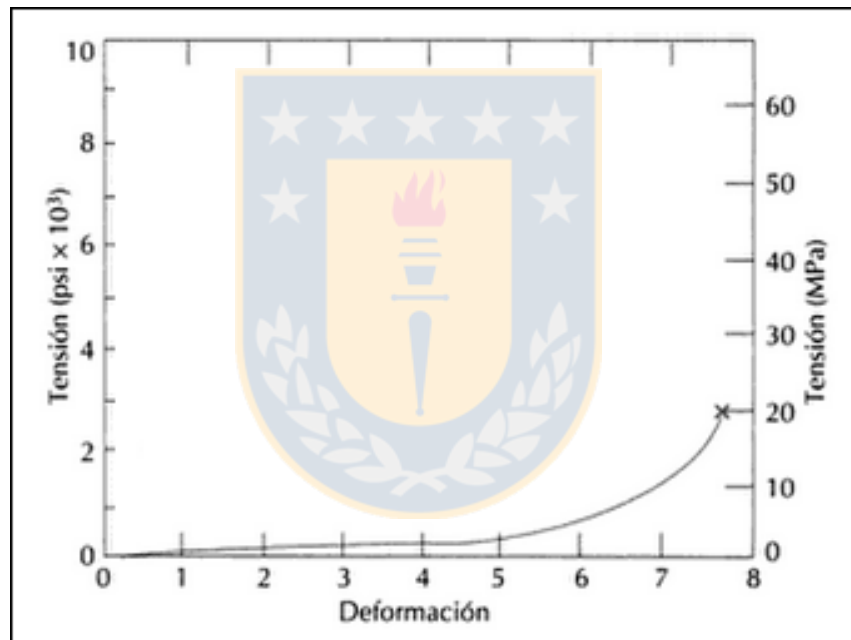


Fig. 2.32: Curva Esfuerzo-Deformación Típica de un Elastómero

Capítulo 3: Desarrollo del Simulador Anatómico

3.1. Materiales

Para el desarrollo del simulador anatómico se utilizaron modelos 3D de los huesos del hombro (Figs. 3.1, 3.2 y 3.3) [36] [37] [38]. Los que fueron impresos en 3D, en base a filamentos de ácido poliláctico, utilizando el método de modelado por deposición fundida. En la tabla 3.1 se especifican las dimensiones de dichos modelos (obtenidas por medio de mediciones realizadas con un pie de metro de 0.05 [mm] de sensibilidad). Para la modelación de los tendones se utilizaron bandas de caucho, mientras que para la modelación de los ligamentos se utilizaron bandas de látex, debido a que ambos materiales presentan propiedades mecánicas similares a las de dichos tejidos.

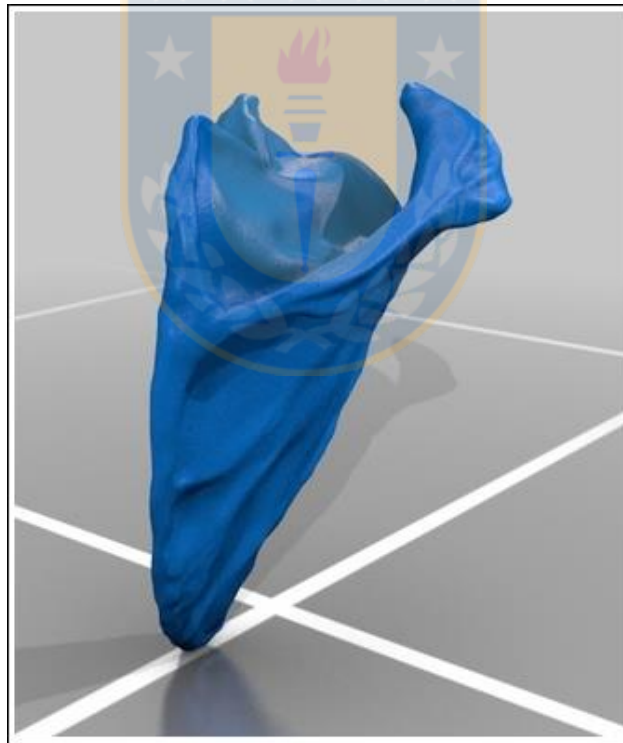


Fig. 3.1: Modelo 3D de la Escápula Derecha

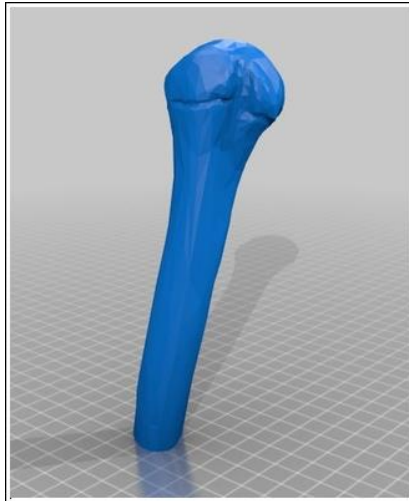


Fig. 3.2: Modelo 3D de la Mitad Superior del Húmero Derecho

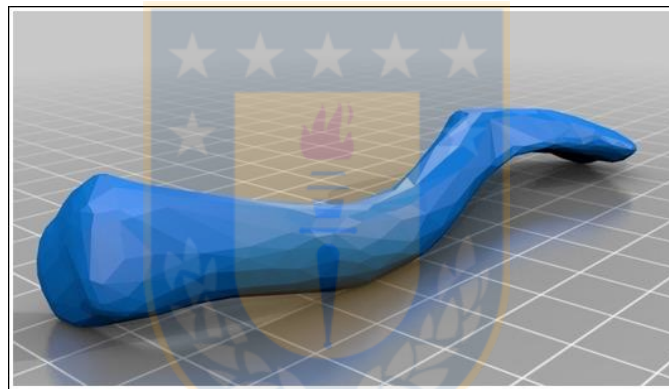


Fig. 3.3: Modelo 3D de la Clavícula Derecha

TABLA 3.1: Dimensiones Generales de los Modelos 3D de los Huesos del Hombro

Parámetro	Longitud [mm]
Espina de la escápula	
Largo máximo (superior-inferior)	152.05
Ancho máximo	108.60
Cavidad glenoidea	
Largo (superior-inferior)	36.60
Ancho máximo	27.85
Clavícula	
Largo	152.45
Húmero	
Largo (superior-inferior)	145.05
Ancho cuello quirúrgico	31.80
Ancho mínimo diáfisis	20.60

3.1.1 Validación de Materiales

Para validar la selección de materiales se realizó una reunión con el especialista en artroscopia de hombro, el Dr. Fredy Montoya. El cirujano emuló parte del procedimiento que se realiza sobre los tendones de los músculos del manguito rotador durante la cirugía artroscópica. De esta manera, realizó una incisión sobre una banda de caucho de 3[mm] de espesor. Posteriormente, utilizó un gancho de sutura para cerrar dicha apertura. Para el caso del látex, el especialista verificó las propiedades elásticas del material y sus dimensiones en comparación con las bandas de caucho. Según el especialista la intervención sobre los materiales mostró una semejanza con las estructuras que se pretende emular. Por lo tanto, sugirió el uso de estos elementos en la modelación de los tendones y los ligamentos.

3.2. Metodología de Desarrollo

El desarrollo del simulador anatómico de hombro se basó en un método iterativo definido por tres etapas:

- **Construcción:** Consistió en el desarrollo de prototipos con funciones incrementales.
- **Retroalimentación:** Consistió en reuniones donde el especialista en artroscopia (Dr. Fredy Montoya) y traumatólogos en formación (Drs. Felipe Tejas, Patricio Alfaro, Jorge Silva, George Ayres y Eduardo Diaz), entregaron retroalimentación y sugerencias utilizadas para mejorar el diseño del simulador.
- **Aprendizaje:** Consistió en el análisis de la retroalimentación y en la investigación de aspectos relacionados al hombro, con el objetivo de mejorar el diseño del simulador. Cabe destacar que se construyeron dos prototipos previos al modelo final.

3.3. Modelación de los Tejidos Blandos de la Articulación Glenohumeral y Acromioclavicular

Para la modelación de los tejidos blandos de la articulación glenohumeral se utilizó como referencia la anatomía expuesta en el marco teórico, así como también la retroalimentación y sugerencias del especialista.

3.3.1 Modelación del Labrum y el Tendón de la Cabeza Larga del Bíceps

- **Labrum:** Para modelar el labrum se utilizaron como referencia las Figs. 2.3 y 2.5. Así, se cortó de un trozo de caucho que emula el tejido (véanse las dimensiones en la tabla 3.2). Éste fue adherido en sus extremos utilizando pegamento instantáneo, dando origen a un anillo de 25 [mm] de diámetro interno (A, Fig. 3.4).
- **Tendón de la cabeza larga del bíceps braquial:** Para modelar el tendón de la cabeza larga del bíceps braquial se utilizaron como referencia las Figs. 2.4, 2.5, 2.6 y 2.8. Así, se cortó un trozo de caucho que emula el tejido (véanse las dimensiones en la tabla 3.3). Éste se pegó a la parte superior del anillo de caucho (B, Fig. 3.4). Luego, se pegó la cara inferior de este anillo alrededor del borde de la cavidad glenoidea de la escápula (Fig. 3.5). Finalmente, se procedió a pintar la estructura con acrílico.

TABLA 3.2: Dimensiones del Material utilizado en la Modelación del Labrum

Parámetro	Dimensión [mm]
Largo	71.25
Ancho	6.15
Espesor	5.00

TABLA 3.3: Dimensiones del Material utilizado en la Modelación del Tendón de la Cabeza Larga del Bíceps

Parámetro	Dimensión [mm]
Diámetro	5.35
Largo	120.70

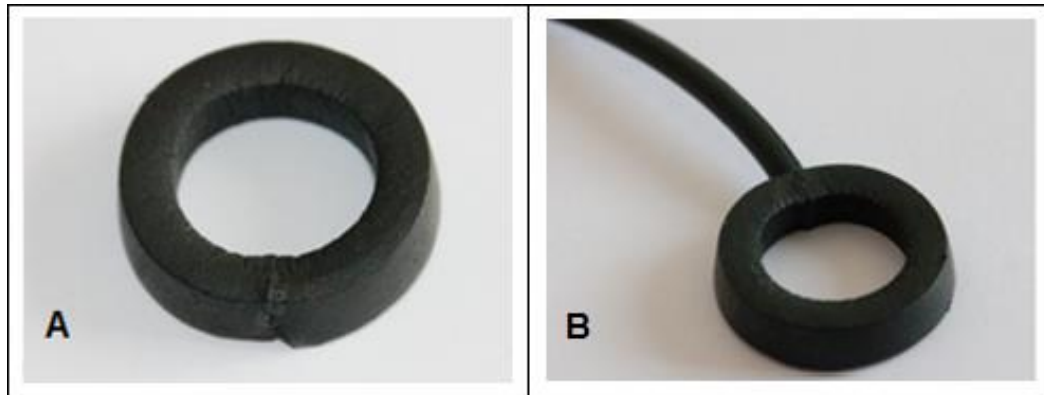


Fig. 3.4: Proceso de Modelación del Labrum y el Tendón de la Cabeza Larga del Bíceps

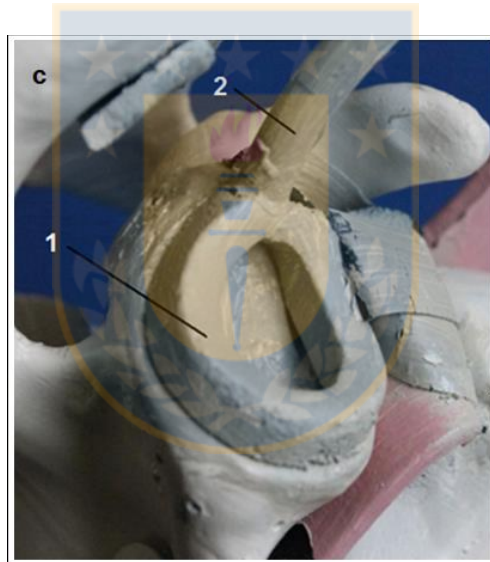


Fig. 3.5: Modelo del Labrum (1) y el Tendón de la Cabeza Larga del Bíceps (2)

3.3.2 Modelación de los Ligamentos del Intervalo Rotador

- **Ligamento coracohumeral:** Para modelar el ligamento coracohumeral se utilizaron como referencia las Figs. 2.6, 2.13, 2.14 y 2.15. Así, se cortó un trozo de látex que emula el tejido (véanse sus dimensiones en la tabla 3.4). El extremo externo se divide en dos haces (troquiteriano y troquiniano), de 6 [mm] de ancho cada uno. El haz troquiteriano, se fijó por arriba de la escotadura intertuberositaria, mientras que el haz troquiniano se pegó por debajo

de ésta (Fig. 3.6). El extremo interno fue adherido a la base de la apófisis coracoides (Fig. 3.7). Cabe destacar que la división de los haces del extremo externo permite el paso del tendón de la cabeza larga del bíceps braquial a través de la escotadura en cuestión.

- **Ligamento glenohumeral superior:** Para modelar el ligamento glenohumeral superior se utilizaron como referencia las Figs. 2.6 y 2.15. Así, se cortó un trozo de látex que emula el tejido (véanse sus dimensiones en la tabla 3.4). El extremo externo se pegó a la cabeza humeral, entre el cuello anatómico y el troquín (Fig. 3.6), mientras que el extremo interno fue adherido al borde anterosuperior del borde axilar de la escápula (Fig. 3.7),
- **Ligamento glenohumeral medio:** Para modelar el ligamento glenohumeral medio se utilizaron como referencia las Figs. 2.6 y 2.7. Así, se cortó un trozo de látex que emula el tejido (véanse las dimensiones en la tabla 3.4). El extremo externo se pegó a la a la cabeza humeral, en la base del troquín (Fig. 3.6), mientras que el extremo interno fue adherido al borde anterosuperior del borde axilar de la escápula por encima del ligamento glenohumeral superior (Fig. 3.7).

TABLA 3.4: Dimensiones de los Materiales utilizados en la Modelación de los Ligamentos del IR

Modelo	Dimensiones (Largo x Ancho x Espesor) [mm]
Coracohumeral	43.25 x 13.15 x 0.50
Glenohumeral Superior	36.35 x 12.30 x 0.50
Glenohumeral Medio	51.40 x 12.30 x 0.50

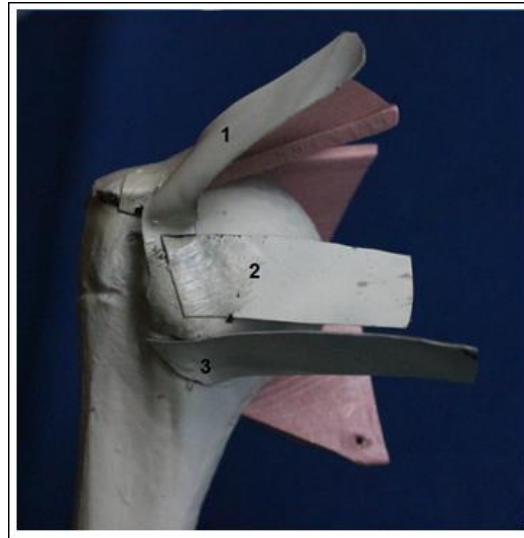


Fig. 3.6: Extremo Externo de los Modelos de los Ligamentos del IR. 1) CHL, 2) SGHL, 3) MGHL



Fig. 3.7: Extremo Interno de los Modelos de los Ligamentos del IR. 1) CHL, 2) SGHL, 3) MGHL

3.3.3 Modelación de los Músculos del Manguito Rotador

- **Subescapular:** Para modelar el subescapular se utilizaron como referencia las Figs. 2.9 y 2.10. Así, se cortó un segmento de caucho que emula el tejido (véanse sus dimensiones en la tabla 3.5). El extremo externo fue fijó al húmero, a través de un tarugo fijado a la entesis del tendón, sobre el troquín. El extremo interno fue adherido a la escápula por medio de tres tarugos insertados en el borde axilar (Fig. 3.8).

- **Supraespinoso:** Para modelar el supraespinoso se utilizaron como referencia las Figs. 2.10, 2.11 y 2.12. Así, se cortó un segmento de caucho que emula el tejido (véanse sus dimensiones en la tabla 3.5). El extremo externo se fijó al húmero, a través de otro tarugo insertado sobre la entesis del tendón, en la carilla superior del troquíter. El extremo interno fue adherido a la escápula, por medio de tres tarugos insertados en el sitio donde comienza la fosa supraespinosa (Fig. 3.9).
- **Infraespinoso:** Para modelar el supraespinoso se utilizaron como referencia las Figs. 2.11 y 2.12. Así, se cortó un segmento de caucho que emula el tejido (véanse sus dimensiones en la tabla 3.5). El extremo externo se fijó al húmero, por medio de un tarugo insertado sobre la entesis del tendón, en la carilla posterosuperior del troquíter. El extremo interno fue adherido a la escápula, en el sitio donde comienza la fosa infraespinosa a través de dos tarugos insertados sobre esa zona (Fig. 3.9).
- **Redondo Menor:** Para modelar el redondo menor se utilizaron como referencia las Figs. 2.11 y 2.12. Así, se cortó un segmento de caucho que emula el tejido (véanse sus dimensiones en la tabla 3.5). El extremo externo se fijó al húmero, por medio de dos tarugos insertados sobre la entesis del tendón, en la carilla posteroinferior del troquíter. El extremo interno fue adherido a la escápula a través de dos tarugos insertados en el borde axilar (Figs. 3.8 y 3.9). Cabe destacar que el modelo del infraespinoso y del redondo menor poseen un tarugo en común.

TABLA 3.5: Dimensiones de los Materiales utilizados en la Modelación de los Tendones del MR

Modelo	Largo x Ancho extremo externo x Ancho extremo interno [mm]	Espesor [mm]
Subescapular	60.10 x 46.30 x 19.35	3.00
Supraespinoso	63.75 x 41.45 x 17.50	3.00
Infraespinoso	64.05 x 42.75 x 17.10	3.00
Redondo menor	61.40 x 43.75 x 23.25	3.00



Fig. 3.8: Vista Anterior de los Modelos de los Tendones del MR. 1) SSC



Fig. 3.9: Vista Posterior de los Modelos de los Tendones del MR. 1) SSP, 2) ISP, 3) RM

3.3.4. Modelación de la Articulación Acromioclavicular

Para modelar la articulación acromioclavicular se utilizó como referencia la Fig. 2.16. Así, se cortaron dos segmentos de caucho con dimensiones equivalentes (Tabla 3.6). Uno de ellos se pegó en la carilla articular del acromion, mientras que el otro fue adherido a la carilla articular de la clavícula. Posteriormente, se pegaron los extremos de ambos segmentos, emulando el ligamento acromioclavicular (Fig. 3.10). Para evitar que el extremo interno de la clavícula permaneciera libre se

utilizó sistema estabilizador (Fig.3.11), compuesto por un eje que pasa a través del ángulo superior de la escápula y en un punto del tercio proximal de la clavícula. Este eje está compuesto por tres partes. Las partes externas poseen un hilo que permite el paso dos tuercas en cada uno de estos segmentos, las que son utilizadas para comprimir las superficies de ambos huesos. De alguna manera este sistema permite emular la acción de la articulación esternoclavicular y de los ligamentos conoide y trapezoide, ya que mantiene fijo el extremo interno de la clavícula y entrega estabilidad al rango de movimiento de la articulación.

TABLA 3.6: Dimensiones de los Materiales utilizados en la Modelación de la Articulación AC

Parámetro	Dimensión [mm]
Largo	30.00
Ancho	12.50
Espesor	3.00

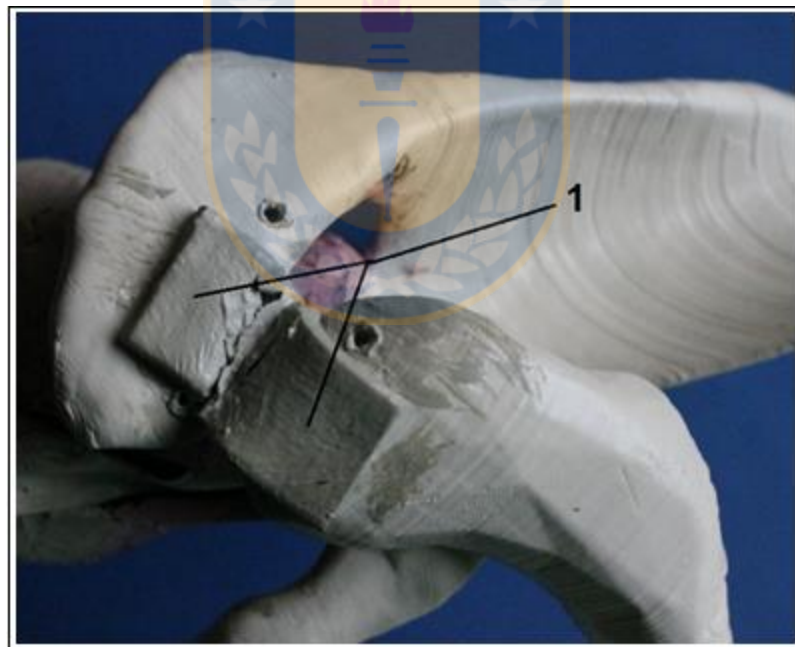


Fig. 3.10: Modelo de la Articulación AC. 1) LAC



Fig. 3.11: Sistema Estabilizador de la Articulación AC

3.5. Implementación de la Capa Envoltente del Modelo Anatómico

Para implementar la capa envoltente del modelo anatómico en primer lugar se determinaron las dimensiones adecuadas para cubrir el modelo anatómico, específicamente, se construyeron moldes en papel para cubrir el húmero, la cara anterior y posterior de la escápula. Para el molde que cubre el húmero se utilizó un hexágono simétrico doblado sobre su eje más largo. Para los moldes que cubren las caras anterior y posterior de la escápula se utilizaron superficies semicirculares. En los bordes internos de estos moldes se realizaron cinco cortes, con el objetivo de adaptar las capas a la forma del hombro. Posteriormente, los modelos fueron replicados en cuero sintético (Fig. 3.12). A lo largo del borde interno de las capas que cubren la escápula se coció un cierre que permite unir ambas caras. En el borde externo de dichas capas se coció la capa que cubre la mitad superior del húmero.



Fig. 3.12: Capa Envoltente del Modelo Anatómico

3.6. Implementación del Soporte del Simulador

Para la implementación del soporte del modelo anatómico (Fig. 3.13) se utilizó una superficie de madera unida a una barra de acero inoxidable. Al extremo superior de esta barra se implementó un sistema que permite el movimiento alrededor de dos ejes paralelos al anteroposterior y al transversal del hombro.

El eje transversal se construyó a partir de un cilindro de 6.5 [mm] de diámetro interno soldado al extremo superior de la barra de acero. A uno de sus bordes se soldó una tuerca de diámetro equivalente. Luego, se realizó una ranura vertical de 6 [mm] de espesor sobre éste, el que permite la articulación con una pieza semicilíndrica soldada al sistema que emula el eje anteroposterior. Posteriormente, se alinearon todos los orificios y se pasó un tornillo que permite fijar el modelo anatómico en cualquier punto del rango de movimiento del sistema.

El eje anteroposterior se construyó a partir de una estructura con forma de 'U', a la que se realizó una perforación, que atraviesa dos de sus lados. Alrededor de uno de los orificios generados, se soldó una tuerca del mismo diámetro. Luego, se realizó una perforación de 6 [mm] en el borde axilar de la escápula. Alrededor del orificio generado en la cara posterior de la escápula, se pegó una golilla de 5 [mm] de diámetro interno. Posteriormente, se alinearon todos los orificios y se pasó un tornillo de 5 [mm] de diámetro que permite fijar el modelo en cualquier punto del rango de movimiento del sistema.

Al extremo inferior de la barra de acero se soldó un tornillo de 11 [mm] de diámetro y 30 [mm] de largo. Luego, se realizó una perforación de 11 [mm] de diámetro en el centro geométrico de la sección transversal. A lo largo de este orificio se introdujo un tornillo macho para fabricar el hilo complementario al tornillo de la barra de acero. Finalmente, se introdujo el tornillo de la barra de acero.

Para fijar la superficie de madera al borde de otra superficie se construyó un sistema que permite su anclaje (Fig. 3.14). El sistema está formado por una superficie de acero doblada en tres lados iguales, dando origen a una pieza con forma de C. En su lado inferior se realizó un orificio de 6 [mm] de diámetro, alrededor del extremo inferior del orificio se soldó una tuerca de 6 [mm] de diámetro que permite el paso de un tornillo a través de éste. Finalmente, se soldó otra tuerca de 6 [mm] al extremo superior del tornillo. Dicha tuerca permite la unión con el extremo inferior de un platillo de compresión.

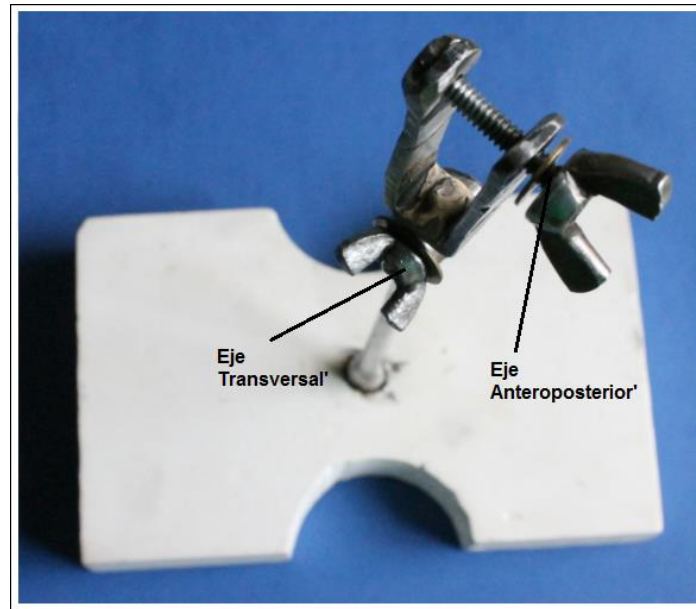


Fig. 3.13: Soporte del Modelo



Fig. 3.14: Sistema para el Anclaje del Soporte

Capítulo 4. Resultados

4.1. Simulador Anatómico

El simulador anatómico (Figs. 4.1 y 4.2), está constituido por los modelos de todas las estructuras anatómicas solicitadas. Además, la articulación glenohumeral permite los movimientos de flexoextensión en el plano sagital, aducción y abducción en el plano frontal, flexoextensión horizontal en el plano transversal, de rotación interna, externa y de circunducción. La articulación acromioclavicular permite realizar simples movimientos. Aunque, el rango de movimiento de estas articulaciones está limitado a los materiales y al diseño utilizado.

Es posible montar y desmontar los modelos de los tendones del manguito rotador y la capa que envuelve el modelo, permitiendo la reutilización y la exposición de las estructuras que lo componen, según los requerimientos del usuario.

El soporte permite anclar la base de éste al borde de otra superficie y hace posible la fijación del modelo en una posición similar a la de silla de playa, utilizada en artroscopia de hombro.

Se estima que el costo asociado a los materiales utilizados en el desarrollo del modelo final no supera los 40 USD.



Fig. 4.1: Simulador Anatómico

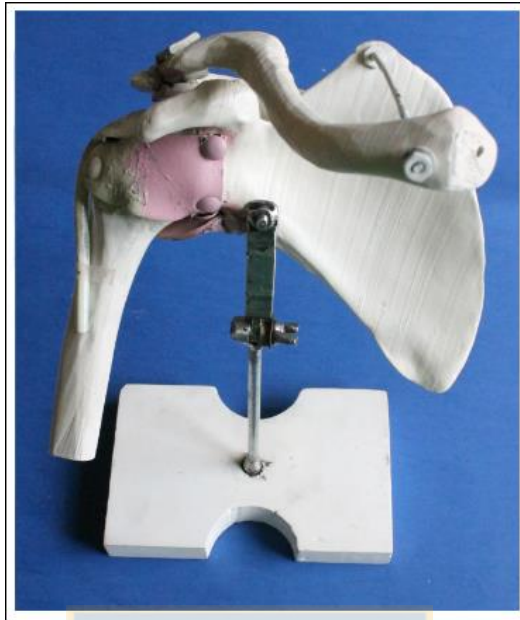


Fig. 4.2: Simulador Anatómico con Estructuras Expuestas

4.2. Simulación Clínica

La simulación clínica se realizó en uno de los pabellones quirúrgicos del Hospital Traumatológico Concepción. Allí, se llevó a cabo la simulación artroscópica en seco por el Dr. Fredy Montoya en un procedimiento que duró aproximadamente 15 minutos.

En primer lugar, el cirujano realizó las marcas anatómicas de rutina sobre la capa envolvente del modelo en la zona de la articulación acromioclavicular, utilizándolas como referencia para realizar los portales artroscópicos. Luego, a través de la cánula de un trocar introdujo el artroscopio, procediendo a explorar la articulación glenohumeral (Fig. 4.3). Utilizando otro trocar introducido a través del portal posterior se palparon y reconocieron los tejidos blandos de la articulación (Fig. 4.4). Luego, introdujo una sonda de radiofrecuencia por medio del portal anterior (Fig. 4.5), donde emuló la ablación de tejido dañado en la zona del tendón de la cabeza larga del bíceps y la parte superior del labrum. Finalmente, un estudiante en formación en traumatología utilizó el simulador para realizar el entrenamiento de la triangulación y la percepción de profundidad durante la exploración de la articulación glenohumeral.

Según los profesionales, el simulador mostró una buena reproducción de los tejidos de la articulación y fue útil para el entrenamiento quirúrgico artroscópico.



Fig. 4.3: Exploración de la Articulación Glenohumeral



Fig. 4.4. Palpación del Labrum

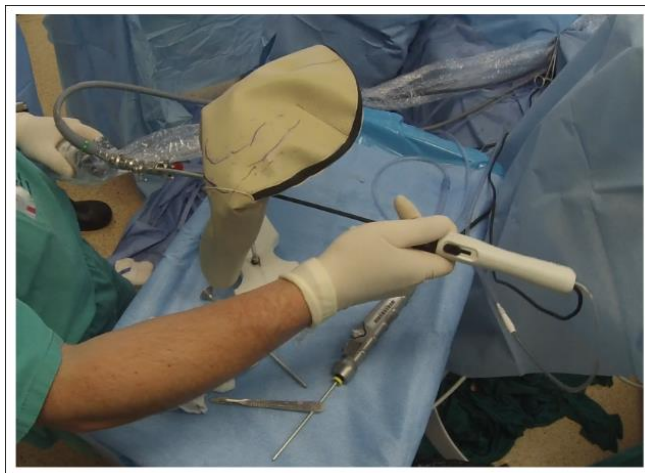


Fig. 4.5: Simulación de Ablación de Tejido

Capítulo 5. Conclusiones

5.1. Discusión

La efectividad de los simuladores como herramientas para el aprendizaje de habilidades quirúrgicas ha sido demostrada en estudios previos [4] [11]. En particular, el 80% de los directores de programas y el 86% de estudiantes los considera un elemento esencial para la formación en el área ortopédica [38].

De acuerdo con la evaluación del especialista, el simulador de bajo costo desarrollado en este trabajo, probó ser una alternativa útil y asequible para el entrenamiento de habilidades básicas en artroscopia. En particular, mostró una buena relación costo-efectividad para el desarrollo de habilidades psicomotoras como la triangulación del instrumental durante la exploración de la articulación glenohumeral, la percepción de profundidad en un plano bidimensional, la visualización y reconocimiento de estructuras anatómicas; y quirúrgicas básicas como la reparación de lesiones del manguito rotador con sistemas de anclaje con suturas.

5.2. Conclusiones

El simulador desarrollado a un bajo costo, es un aporte real tanto para estudiantes de traumatología como para traumatólogos ya formados. Tener a disposición sistemas de entrenamiento como el expuesto en este trabajo es de importancia fundamental, ya que permite abordar de manera segura al manejo quirúrgico posterior de los pacientes.

En base a la retroalimentación del especialista se determinó que el modelo es útil tanto para el entrenamiento de cirugía abierta como para artroscopia, y en particular para:

- Entrenamiento de la triangulación, la visualización y reconocimiento de estructuras anatómicas, la percepción de profundidad en un plano bidimensional, la coordinación visomotora y el manejo del instrumental durante la exploración de la articulación.
- Diagnóstico, identificación y tratamiento de patologías como desgarros del manguito rotador o de la parte superior del labrum (SLAP).

- Manejo de nudos quirúrgicos en suturas asociadas al anclaje de los tendones del manguito rotador.
- Reparación de luxaciones de la articulación Acromioclavicular.

5.3. Trabajo Futuro

Como trabajo futuro se definieron los siguientes puntos:

- Desarrollar modelos 3D estándares de los tejidos blandos que componen el simulador para la impresión de estos sobre materiales con propiedades elásticas.
- Desarrollar un molde 3D complementario a los modelos óseos del simulador, de manera que permitan emular con mayor fidelidad los volúmenes musculares (deltoides, trapecio y pectoral mayor) en la zona del hombro.
- Reproducir el simulador para brindar soporte al programa de traumatología y ortopedia de la Universidad de Concepción y realizar un estudio sobre la utilidad del modelo en la formación en artroscopia con una muestra estadísticamente significativa.
- Desarrollar un manual de entrenamiento artroscópico que guíe al estudiante en la realización de procedimientos quirúrgicos con el simulador.

Bibliografía

- [1] J. Rodríguez, E. Turienzo, G. Vigal, A. Brea. “Formación quirúrgica con simuladores en centros de entrenamiento”. *Cir Esp.* 2006; 79(6): 342-348.
- [2] J. Ochsner. “Minimally Invasive Surgical Procedures”. *The Ochsner Journal.* 2000 Jul; 2(3): 135-136
- [3] AAOS [internet]. [Citado 20 Ene 2017]. Disponible en: <http://orthoinfo.aaos.org/topic.cfm?topic=A00589>
- [4] C. Tay, A. Khajuria. “Simulation training: A systematic review of simulation in arthroscopy and proposal of a new competency-based training framework”. *International Journal of Surgery.* 2014 Mar; 626-633.
- [5] M. Corvetto, MP. Bravo, R. Montaña, F. Utili, E. Escudero, C. Boza. “Simulación en educación médica: una sinopsis”. *Rev Med Chile* 2013; 141: 70-79.
- [6] T. Suresh, P.E., Chair. “The Link Flight Trainer: A Historic Mechanical Engineering Landmark”. *ASME International* 2000: 1-12.
- [7] J. Cooper, V. Taqueti. “A brief history of the development of mannequin simulators for clinical education and training”. *Qual Saf Health Care.* 2004; 13: 11-18.
- [8] N. J. Maran, RJ. Glavin. Low - to high-fidelity simulation - a continuum of medical education?. *Med Educ.* 2003; 37(Suppl.1): 22-28.
- [9] A. I. Levine, MH. Swartz. “Standardized patients: the “other” simulation”. *J Crit Care* 2008; 23 (2): 179-184.
- [10] K. Akhtar, A. Chen. “The role of simulation in developing surgical skills”. *Curr Rev Musculoskeletal Med.* 2014 Jun; 7(2): 155–160.
- [11] S. Madam, D. Pai. “Role of Simulation in Arthroscopy Training”. *Sim Healthcare.* 2014 Apr; 9(2): 127-135.
- [12] Sawbones [internet]. [Citado 20 Ene 2017]. Disponible en: <http://www.sawbones.com/Catalog/Orthopaedic%20Models/Shoulder/1509-37#>

- [13] G. Alonso, L. Cogua. “Desarrollo de un simulador de bajo costo para la adquisición de destrezas básicas en cirugía artroscópica”. *Rev. Asoc. Argent. Ortop. Traumatol.* 2014 Jun; 79(2).
- [14] Arthrex. “ArthroBox™ - Arthroscopic triangulation Training System”.
- [15] S. Gibson, J. Samoski, A. Mor, C. Fyock, E. Grimson, T. Kanade. “Simulating Arthroscopic Knee Surgery using Volumetric Object Representations, RealTime Volume Rendering and Haptic Feedback”. MERL. 1996.
- [16] JM. Fernández, J. Potti, A. Illana, L. Pastor, A. Rodríguez, S. Bayona. “InsightArthroVR®, Advanced Arthroscopic Training Simulator”. *Rev Trauma.* 1998; 19(1): 1-7.
- [17] M. Reznick, P. Harte. *Virtual Reality and Simulation: Training the Future Emergency Physician.* *Acad Emerg Med.* 2002 Jan; 9(1):78-87.
- [18] A. Kapandji. “Tomo 1. Capítulo 1. El hombro”. “Fisiología Articular”. 6ª ed. Editorial Medica Panamericana; 2006. p. 2-74.
- [19] L. Testut, A. Latarjet. “Libro II. Artrología. Capítulo IV Articulaciones de los miembros”. “Compendio de Anatomía Descriptiva”. 1ª ed. Elsevier; 2007. p. 107-126.
- [20] L. Testut, A. Latarjet. “Libro I. Osteología. Capítulo IV. Miembros”. “Compendio de Anatomía Descriptiva”. 1ª ed. Elsevier; 2007. p. 54-86.
- [21] L. Testut, A. Latarjet. “Libro III. Miología. Capítulo VI. Músculos del miembro superior”. “Compendio de Anatomía Descriptiva”. 1ª ed. Elsevier; 2007. p. 196-215.
- [22] M. J. DeFranco, B. J. Cole. “Current Perspectives on Rotator Cuff Anatomy”. *Arthroscopy: The Journal of Arthroscopic and Related Surgery.* Elsevier. 2009; 25(3): 305-320.
- [23] S. M. Thompson. “The Central Tendon of the Supraespinatus: Structure and Biomechanics”. Imperial College London. 2013 (Mar).
- [24] R. Frank, D. Taylor. “The Rotator Interval in the Shoulder. Implications in the Treatment of the Shoulder Instability”. *Orthop J Sports Med.* 2015 Dec; 3(12): 2325967115621494.
- [25] AAOS [internet]. Citado [27 Nov 2016]. Disponible en: <http://orthoinfo.aaos.org/topic.cfm?topic=a00032>
- [26] AAOS [internet]. Citado [27 Nov 2016]. Disponible en:

<http://orthoinfo.aaos.org/topic.cfm?topic=a00064>

- [27] M. Miller. “Capítulo 4, sección 4, Hombro”. “Ortopedia y Traumatología: Revisión Sistemática”. 5ª ed. Elsevier; 2009. p. 276-287.
- [28] Arthrex. “SutureBridge™ Double Row Rotator Cuff Repair”. Surgical Technique.
- [29] R. Segura. “Capítulo 2. Bioquímica del tejido conjuntivo y del tejido muscular”. “Lecciones básicas de biomecánica del aparato locomotor” 2ª ed. Masson; 2004. p. 15-39.
- [30] A. Viladot, J. Lorenzo. “Capítulo 3. Biomecánica del hueso”. “Lecciones básicas de biomecánica del aparato locomotor”. 2ª ed. Masson; 2004. p. 41-51.
- [31] K. Robi, N. Jacob. “Chapter 2. The Physiology of Sports Injuries and Repair Processes”. “Current Issues in Sports and Exercise in Medicine”. InTech. 2013; p. 43-86
- [32] A. Viladot, J. Lorenzo. “Capítulo 4. La articulación”. “Lecciones básicas de biomecánica del aparato locomotor”. 2ª ed. Masson; 2004. p. 53-64.
- [33] J. Nardi, A. Cambalía “Capítulo 5.- Biomecánica del tendón”. “Lecciones básicas de biomecánica del aparato locomotor”. 2ª ed. Masson; 2004. p. 67-81.
- [34] W. Calister. “Tomo II. Capítulo 16. Características, aplicaciones y conformación de los polímeros”. “Introducción a la Ciencia e Ingeniería de Materiales”. Ed. Reverté; 1998. p. 491-525.
- [35] W. Calister. “Tomo II. Capítulo 15. Estructuras de los Polímeros”. “Introducción a la Ciencia e Ingeniería de Materiales”. Ed. Reverté; 1998; p. 461-486.
- [36] MakerBot Thingiverse [Internet]. [Citado 27 Nov 2016]. Disponible en: <http://www.thingiverse.com/thing:367268>
- [37] MakerBot Thingiverse [Internet]. [Citado 27 Nov 2016]. Disponible en: <http://www.thingiverse.com/thing:368312>
- [38] MakerBot Thingiverse [Internet]. [Citado 27 Nov 2016]. Disponible en: <http://www.thingiverse.com/thing:456351>
- [39] M. Karam, R. Pedowitz. “Current and Future Use of Surgical Skills Training Laboratories in Orthopaedic Resident Education: A National Survey”. J Bone Joint Surg Am. 2013; 95: 1-8.