

# Anatomia funzionale e biomeccanica

Antonio Poser

*Digna Sequens*

Il complesso articolare della spalla è formato da tre articolazioni: la sternoclaveare, l'acromioclaveare e la gleno-omeroale. Inoltre abbiamo due piani di scorrimento, lo scapolo-toracico e il sub-acromiale, che si comportano come delle articolazioni data la sistematicità dei movimenti che in essi avvengono. L'azione di questo complesso sistema permette il massimo del movimento di raggiungimento e presa della mano. La disfunzione anche solo di una di queste strutture può influenzare negativamente il movimento di tutto l'arto superiore.

## ARTICOLAZIONE STERNOCLAVEARE

Quest'articolazione è formata dal manubrio sternale e dalla clavicola ed è l'unica articolazione che connette l'arto superiore allo scheletro assile (Fig. 1.1). È un'articolazione a sella, concava sull'asse orizzontale e convessa sull'asse verticale. Esiste una variazione anatomica presente nel 25% della popolazione in cui la clavicola si articola anche con la faccia superiore della prima costa (1-3). L'articolazione è divisa da un disco di fibrocartilagine che si ancora superiormente alla faccia articolare della clavicola su un'ampia superficie (Fig. 1.2), inferiormente sul margine antero-superiore della cartilagine della prima costa, mentre anteriormente e posteriormente è collegato alla capsula articolare.

Essendo un'articolazione a sella ha tre assi di movimento che permettono l'elevazione/depressione, l'an-teposizione/retroposizione e la rotazione sull'asse lungo della clavicola. L'escursione di movimento è di circa 35° sia sul piano orizzontale sia sul piano frontale e di circa 40°-45° di rotazione (4) (Fig. 1.3).

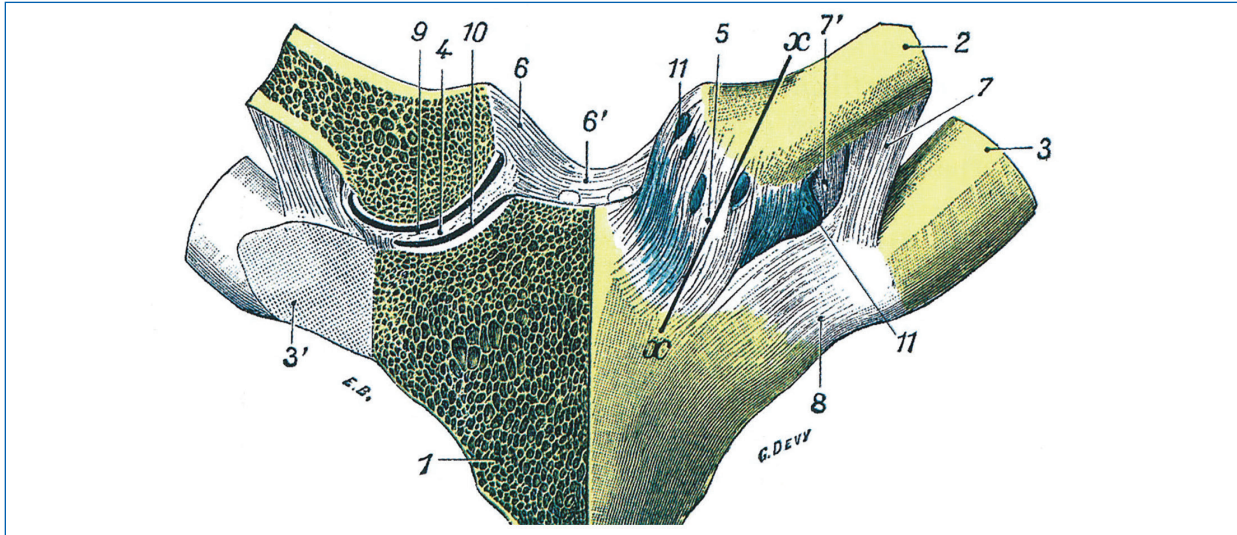
Dal punto di vista osseo quest'articolazione ha una scarsa congruenza poiché la superficie articolare in contatto è solo del 50% (5): la superficie articolare della clavicola è più larga e la cartilagine ialina più spessa rispetto alla controparte sternale. La congruenza articolare è aumentata dalla presenza del disco e la stabilità è demandata soprattutto a un importante complesso capsulo-legamentoso che la circonda.

Il disco articolare si può presentare in tre aspetti, completo o incompleto e in questo caso può assumere la forma ad anello o meniscoide. Non è ancora chiaro se la forma incompleta del disco sia da attribuire a una variazione anatomica oppure sia l'esito di un processo degenerativo (6).

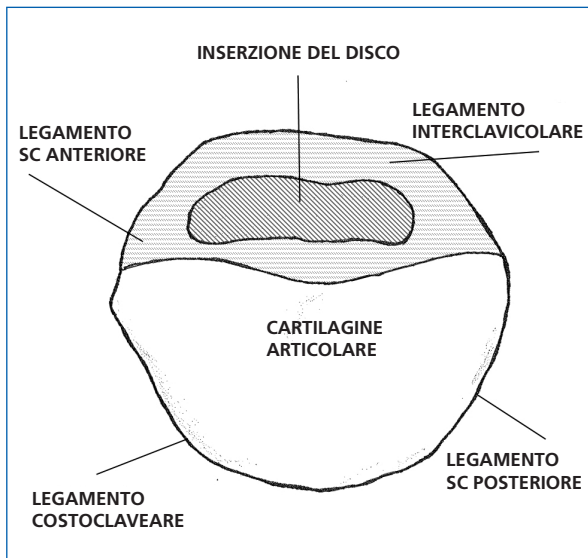
Il disco è un elemento importante dell'articolazione e gli sono state attribuite le seguenti funzioni:

- protezione delle superfici articolari (3)
- permettere una più ampia rotazione della clavicola (7)
- impedire lo scivolamento supero-mediale della clavicola (8).

La stabilità articolare è data soprattutto dalla capsula, dal legamento interclavicolare e dal legamento costo-clavicolare. La capsula articolare avvolge completamente l'articolazione ed è particolarmente sviluppata anteriormente e posteriormente. Nella parte anteriore è distinguibile un ispessimento che prende il nome di legamento sternoclaveare anteriore (9). Nella parte posteriore il legamento sternoclaveare posteriore è più sviluppato e quindi più resistente della parte anteriore, infatti esso sembra essere il limitatore primario alla traslazione anteriore e posteriore della clavicola, mentre la capsula anteriore è il limitatore secondario alla traslazione anteriore (10,11). La capsula nel suo



**Figura 1.1** Articolazione sternocostoclaviculare, vista anteriormente. (1) Sterno; (2) clavicola; (3) prima costa; (4) disco articolare; (5) legamento sternoclaviculare anteriore; (6) legamento sternoclaviculare superiore; (7) legamento interclaviculare; (8) legamento condroster-nale anteriore; (9) sinoviale dell'articolazione; (10) sinoviale dell'articolazione fra disco e sterno; (11) estroflessioni sinoviali, che passano attraverso le smagliature della membrana fibrosa; (xx) asse perpendicolare alla superficie sternale secondo il quale viene condotta la sezione rappresentata. La metà destra è stata segata frontalmente per permettere di vedere il disco interarticolare e le due cavità articolari; l'articolazione del lato sinistro è stata iniettata con sego (da Testut L, Latarjet A. Trattato di anatomia umana, vol. I, Osteologia-artrologia. 5a edizione. Milano, Edra 2017).



**Figura 1.2** Aspetto mediale della clavicola; notare la limitata estensione della cartilagine articolare e l'ampia area di inserzione del disco (disegno di Alessia De Franceschi).

insieme è il principale limitatore della depressione della clavicola: in stazione eretta infatti la sua tensione può essere sufficiente a sostenere il cingolo scapolare in posizione senza l'intervento dell'azione muscolare (12,13). La capsula articolare è inoltre avvolta dall'aponevrosi del muscolo gran pettorale e dal tendine sternale dello sternocleidomastoideo, posteriormente da inserzione al muscolo sternoiideo (14).

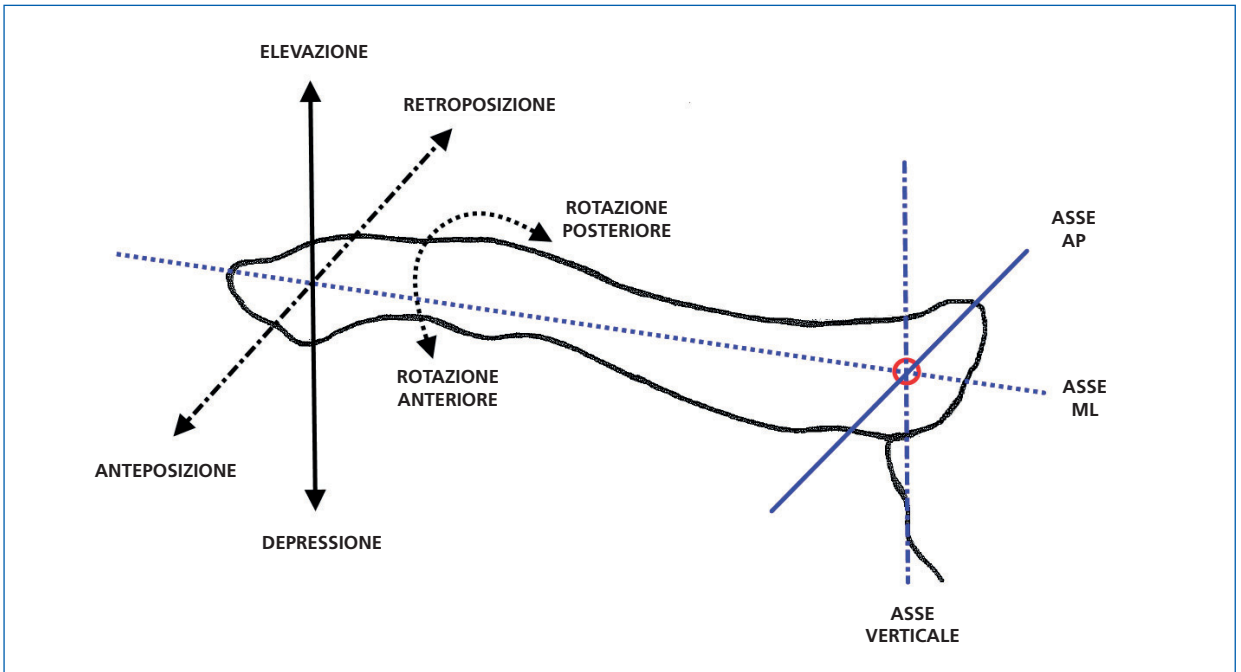
Il legamento interclaviculare collega la parte supe-ro-mediale delle due clavicole e il bordo craniale del manubrio sternale ed è in continuità con la fascia pro-fonda cervicale (7).

Il legamento costoclaveare (o leg. romboide) è forte, breve ed extrarticolare. Si inserisce sul margine mediale superiore della prima costa e sulla cartilagine sternocostale: le sue fibre si dirigono verso l'alto e later-almente per inserirsi sulla faccia inferomediale della clavicola, sul tubercolo costale. La messa in tensione di questo legamento è il limitatore primario dell'elevazione (10) e secondario per la retroposizione e la rotazione posteriore della clavicola (15), mentre scarsa è la sua capacità di stabilizzazione antero-posteriore dell'articolazione (16). Il muscolo succlavio deprime e antepone la clavicola: le sue funzioni sono quindi di controllare l'elevazione e la retroposizione della cla-avicola durante i movimenti di elevazione e al tempo stesso fornire una stabilizzazione dinamica alla sternoclaveare (17).

L'articolazione è innervata dal nervo sovrascapolare mediale e dal nervo succlavio.

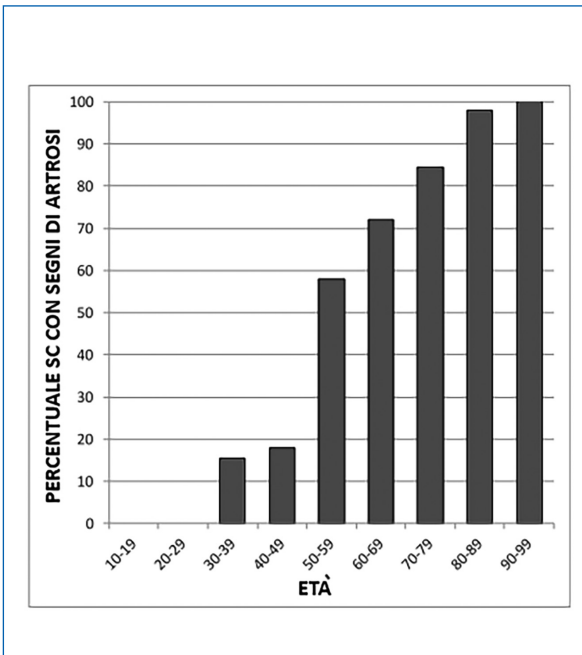
Nonostante la scarsa congruità ossea, l'importante complesso capsulo-legamento fornisce una buona sta-bilità all'articolazione, tanto che le lussazioni sternoc-laveari ammontano solo all'1% di tutte le lussazioni e al 3% delle lussazioni che coinvolgono il cingolo sca-polare (18,19).

L'artrosi della sternoclaveare è frequente ma rara-mente sintomatica (Fig. 1.4). Le persone a maggior



**Figura 1.3** I movimenti (nero) e gli assi (blu) della clavicola (disegno di Alessia De Franceschi).

rischio sono le donne in post-menopausa, i soggetti con instabilità cronica della sternoclaveare e le persone che svolgono un lavoro manuale pesante (20-22).



**Figura 1.4** Percentuale di articolazioni sternoclaveari che dimostrano modificazioni artrosiche in relazione all'età (modificata da Lawrence CR et al. The prevalence of osteoarthritis of the sternoclavicular joint on computed tomography. J Shoulder Elbow Surg. 2017).

La clavicola è un osso lungo a forma di esse (Fig. 1.6); osservandola dall'alto il margine anteriore è convesso medialmente e concavo lateralmente. Sulla faccia inferiore si trovano le zone di inserzione di importanti legamenti: medialmente il legamento costoclaviculare nella fossa romboidea, lateralmente i legamenti conoide e trapezoide. Inoltre su di essa si inseriscono muscoli importanti per la funzionalità dell'arto superiore: antero-medialmente la parte clavicolare del gran pettorale, antero-lateralmente il deltoide anteriore e postero-lateralmente il trapezio superiore. Inoltre vi si inseriscono i muscoli succlavio, sternocleidomastoideo e lo sternoioido.

Le funzioni della clavicola sono:

- essere sede di inserzione muscolare (Fig. 1.7)
- aumentare l'escursione di movimento dell'arto superiore
- proteggere le strutture vasculo-nervose che lasciano la regione cervico-toracica per immettersi nell'arto superiore
- permettere di scaricare il peso dell'arto superiore e di eventuali carichi soprattutto sull'articolazione sternoclaviculare piuttosto che sul rachide cervicale (28-30) (Fig. 1.8).

La frattura della clavicola rappresenta dal 2,6% al 4% di tutte le fratture (31-34): il meccanismo in genere è un trauma diretto sulla spalla, soprattutto a causa di incidenti stradali, cadute in bicicletta o moto e traumi sportivi.

**Box 1.1 Lussazione sternoclaveare**

La lussazione avviene in genere per un trauma molto forte che agisce sull'articolazione in modo diretto o indiretto. Il trauma diretto è costituito da una forza che agisce direttamente sulla clavicola che la spinge posteriormente, mentre il trauma indiretto, che è l'evento più comune, avviene quando la sollecitazione meccanica si esercita a livello della spalla anteriormente, posteriormente o lateralmente.

La lussazione avviene quasi sempre anteriormente, probabilmente per il fatto che la capsula posteriore è molto più resistente dell'anteriore. La maggior parte delle lussazioni avviene per incidenti stradali e traumi sportivi (23-25).

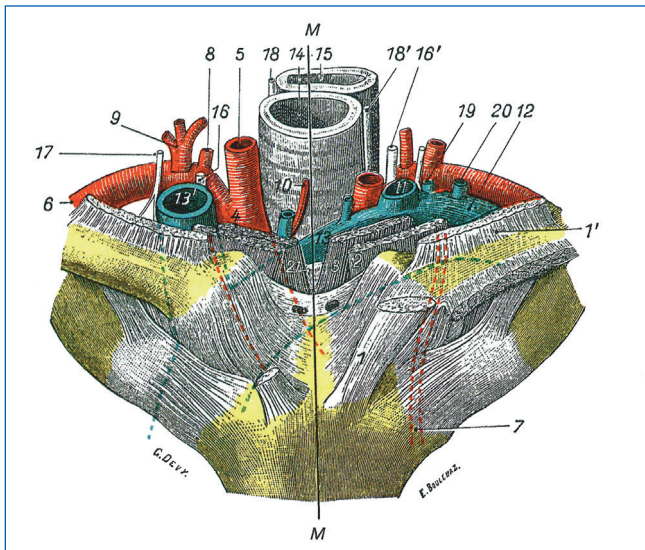
La lussazione anteriore non desta particolari problemi e in genere guarisce bene con un trattamento conservativo.

La lussazione posteriore è un evento raro; in una revisione della letteratura mondiale, Wirth e Rockwood (5) nel 1996 hanno riportato 110 casi, mentre Tepold nel 2014 ha riportato 140 casi in adolescenti (24).

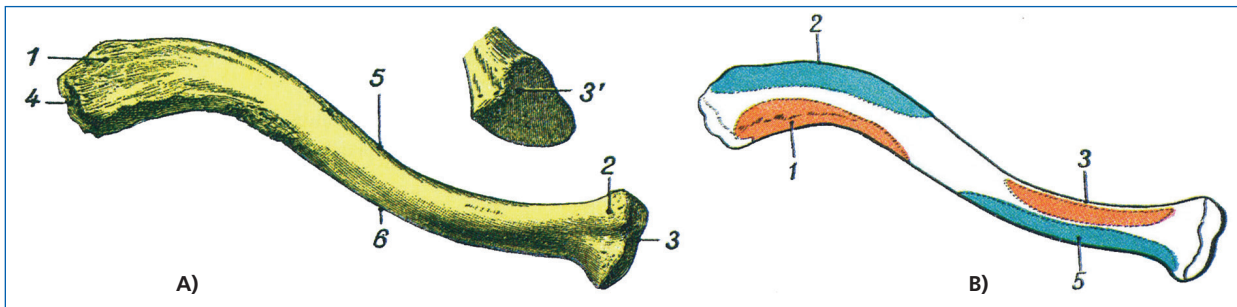
Data la contiguità di importanti strutture (Fig. 1.5) la lussazione posteriore può essere un evento drammatico e può mettere in pericolo di vita il soggetto. La sintomatologia, oltre a quella legata al problema muscoloscheletrico, quindi dolore e impotenza funzionale dell'arto superiore, può variare a seconda delle strutture mediastiniche coinvolte. Nel 30% dei casi possiamo avere complicanze da interessamento di queste strutture. Il paziente si può presentare con congestione venosa del capo o dell'arto superiore se è stato coinvolto il tronco venoso brachiocefalico, dispnea se è implicata la trachea o il polmone, disfagia nell'interessamento dell'esofago, lesioni al plesso brachiale e nei casi severi possiamo avere ipotensione e shock. Il tasso di mortalità è del 3-4% (23).

Sia nella lussazione anteriore sia nella posteriore non complicata il trattamento consiste nella riduzione della lussazione e bendaggio per 4-6 settimane. Le lussazioni posteriori tendono a essere più stabili dopo la riduzione rispetto alle anteriori che tendono a rilussarsi (26).

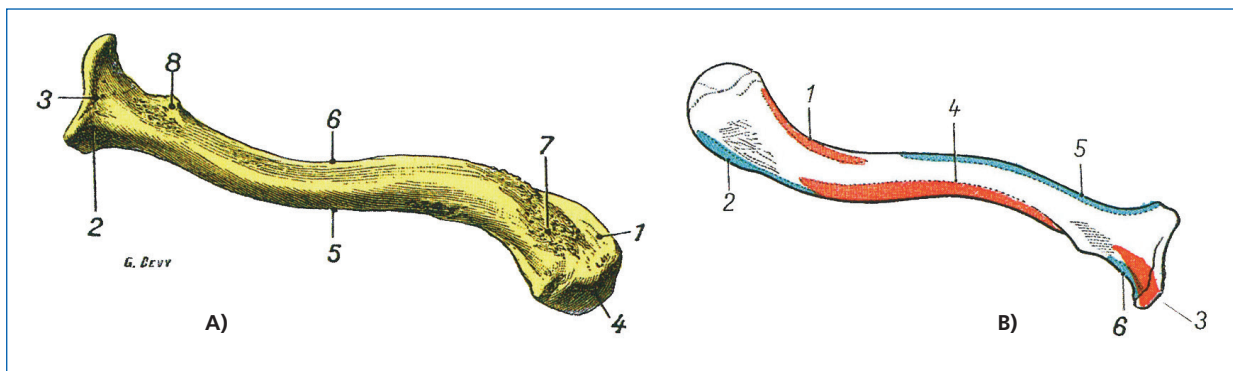
La chirurgia è riservata ai casi di instabilità recidivante o con sintomatologia dolorosa refrattaria al trattamento conservativo (11,27).



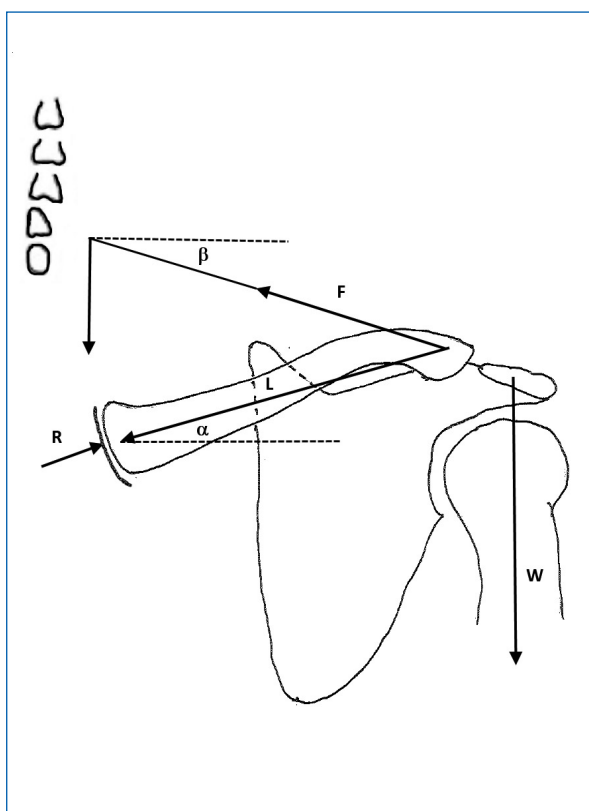
**Figura 1.5** Rapporti dell'articolazione sternocostoclavicolare. La linea **MM** indica il piano sagittale mediano. **(1, 1')** Capo sternale e clavicolare del m. sternocleidomastoideo; **(2)** m. sternocleidomastoideo; **(3)** m. sternotiroidoideo; **(4)** a. anonima, il cui tragitto è indicato da un punteggio rosso; **(5)** a. carotide comune; **(6)** a. succlavia; **(7)** tragitto (punteggiato) dell'a. mammaria interna; **(8)** a. vertebrale; **(9)** tronco tireocervicale; **(10)** a. tiroidea di Neubauer; **(11)** vena giugulare interna sinistra; **(12)** vena succlavia di sinistra; **(13)** vena anonima di sinistra; **(13')** *idem*, di destra; **(14)** trachea; **(15)** esofago; **(16)** nervo vago destro; **(16')** *idem* sinistro; **(17)** nervo frenico; **(18, 18')** nervi ricorrenti di destra e sinistra; **(19)** condotto toracico; **(20)** vena giugulare esterna di sinistra, nel punto di sbocco della vena succlavia; **(21)** residui del timo (da Testut L, Latarjet A. Trattato di anatomia umana vol. I, Osteologia-artrologia. 5a edizione. Milano, Edra 2017).



**Figura 1.6** **(A)** Clavicola di destra, faccia inferiore: **(1)** estremità acromiale; **(2)** estremità sternale; **(3)** faccetta articolare per lo sterno; **(4)** faccia articolare acromiale; **(5)** margine posteriore; **(6)** margine anteriore; **(7)** tubercolo conoideo; **(8)** impressione del legamento costo-clavicolare. **(B)** Clavicola di destra, faccia superiore: **(1)** estremità acromiale; **(2)** estremità sternale; **(3)** faccetta articolare per lo sterno; **(3')** *idem*, vista dal davanti; **(4)** faccia articolare acromiale; **(5)** margine posteriore; **(6)** margine anteriore (da Testut L, Latarjet A. Trattato di anatomia umana, vol. I, Osteologia-artrologia. 5a edizione. Milano, Edra 2017).



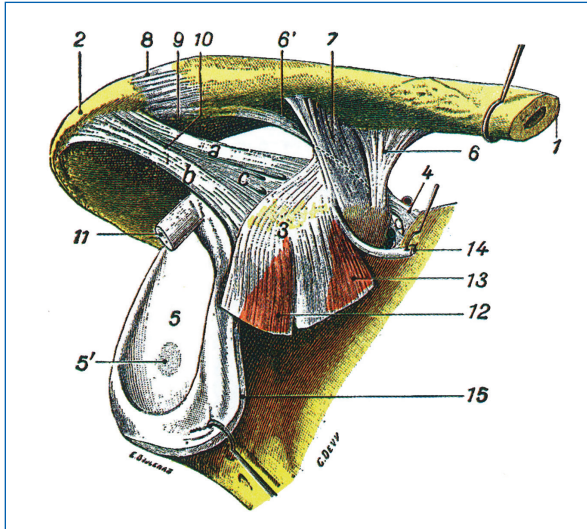
**Figura 1.7** (A) Clavicola di destra, faccia superiore con le inserzioni muscolari: (1) m. deltoide; (2) m. trapezio; (3) m. sternocleidomastoideo; (4) m. grande pettorale. (B) Clavicola di destra, faccia inferiore, con le inserzioni muscolari: (1) m. deltoide; (2) m. trapezio; (3) m. sternoioideo; (4) m. succlavio; (5) m. grande pettorale; (6) m. sternocleidomastoideo (da Testut L, Latarjet A. Trattato di anatomia umana, vol. I, Osteologia-artrologia. 5a edizione. Milano, Edra 2017).



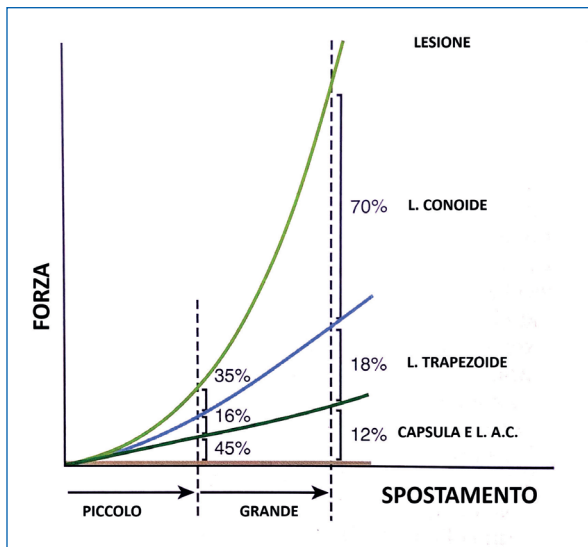
**Figura 1.8** Meccanismo portante del trapezio superiore. Il peso dell'arto superiore  $W$  agisce sulla parte distale della clavicola la cui lunghezza è  $L$ ,  $\alpha$  è l'inclinazione della clavicola,  $F$  è la forza massima che esercita il fascicolo del trapezio superiore che si inserisce su C6, il quale è inclinato sul piano orizzontale con l'angolo  $\beta$ . I momenti si bilanciano,  $F \sin(\alpha + \beta) = W \cos \alpha$ . La forza di reazione ( $R$ ) alla sternoclaveare sarà  $F \cos \beta / \cos \alpha$ . Per un'area di sezione trasversa di  $2,3 \text{ cm}^2$  e un coefficiente di forza di  $50 \text{ N cm}^2$ ,  $F = 115 \text{ N}$ , se  $\alpha = 15^\circ$  e  $\beta = 18^\circ$ ,  $W = 65 \text{ N}$  e  $R = 113 \text{ N}$ . Quindi le fibre trasverse del trapezio superiore possono sostenere il peso dell'arto superiore equilibrando i momenti, ma i carichi compressivi non saranno sopportati dalla colonna cervicale ma dalla sternoclaveare (disegno di Alessia De Franceschi).

## ARTICOLAZIONE ACROMIONCLAVEARE

Quest'articolazione connette la scapola con la clavicola (Fig. 1.9) ed è formata da due piccole faccette articolari, quella convessa della clavicola e quella piana dell'acromion della dimensione di 9 mm di altezza e 19 mm di larghezza (35). La superficie articolare è formata da fibrocartilagine e può essere presente un disco, sempre di fibrocartilagine, più o meno sviluppato. Questo menisco è soggetto a un rapido deterioramento che inizia già nella seconda decade di vita; nella quarta decade il processo è così avanzato da renderlo non riconoscibile (36,37). La funzione del menisco in quest'articolazione è trascurabile. L'articolazione è avvolta da una capsula articolare rinforzata da due ispessimenti, il legamento acromioclavicolare superiore più sviluppato e ulteriormente rinforzato dalle aponevrosi del deltoide e del trapezio, e il legamento acromionclaveare inferiore che è soggetto a variabilità individuale e può essere assente. Sulla porzione inferiore della capsula si inseriscono anche fibre che provengono dal legamento coracoacromiale (38-40). Oltre a questi legamenti propri dell'articolazione abbiamo due legamenti extrarticolari mediali ad essa, il legamento conoide e trapezoide. Entrambi originano dal processo coracoideo e si inseriscono sulla faccia inferiore e laterale della clavicola. La capsula con il legamento superiore e inferiore garantisce soprattutto la stabilità antero-posteriore dell'articolazione acromionclaveare, mentre i legamenti conoide e trapezoide prevalentemente la stabilità sul piano verticale (41-44). Fukuda et al. hanno osservato che per la stabilizzazione dei piccoli movimenti interviene la capsula articolare con i suoi legamenti, mentre per le sollecitazioni più importanti partecipano i legamenti conoide e trapezoide (Fig. 1.10).



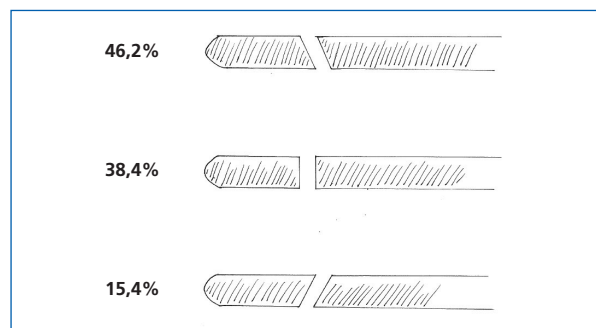
**Figura 1.9** Spalla di destra, vista anteriormente. Sono raffigurati il modo in cui la clavicola si articola con la spalla, il legamento coracoclavicolare e il legamento acromioclavicolare. (1) Clavicola; (2) acromion; (3) processo coracoideo; (4) legamento trasverso della scapola; (5) cavità glenoidea; (5') macchia corrispondente al tubercolo glenoideo; (6) legamento conoide con (6') fascio che si unisce al legamento conoide; (7) legamento trapezoide; (8) legamento acromioclavicolare superiore; (9) *idem*, inferiore; (10) legamento coracoacromiale (a fascio posteriore, b fascio anteriore, c porzione media provvista di fori); (11) tendine del capo lungo del m. bicipite; (12) mm. capo breve del bicipite e coracobrachiale; (13) m. piccolo pettorale; (14) fascio fibroso, che si porta alla fascia del m. succlavio; (15) capsula articolare dell'articolazione dell'omero, spostata in bassa (da Testut L, Latarjet A. Trattato di anatomia umana, vol. I, Osteologia-artrologia. 5a edizione. Milano, Edra 1917).



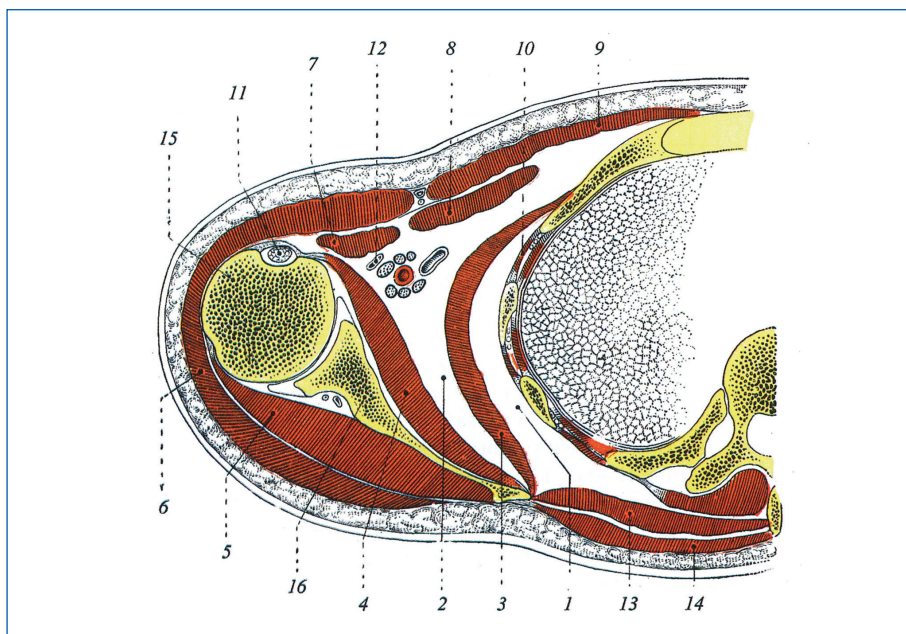
**Figura 1.10** Negli spostamenti di piccola entità vengono sollecitate le strutture capsulo-legamentose proprie dell'articolazione AC, mentre in quelli di più forte intensità sono limitati anche dai legamenti conoide e trapezoide (modificata da Fukuda K et al. Biomechanical study of the legamentous system of the acromioclavicular joint. J Bone Joint Surg. 1986).

L'inclinazione di questa articolazione può variare in tre differenti tipologie. Il tipo I ha un'inclinazione in direzione laterale verso il basso, quindi con un acromion che sovrasta la clavicola. Nel tipo II la rima articolare è verticale. Infine nel tipo III la rima ha un'inclinazione mediale verso il basso, quindi con una clavicola che sovrasta l'acromion. Secondo alcuni autori le caratteristiche anatomiche possono favorire fenomeni di usura articolare o di maggiore o minore resistenza ai traumi (45,46) (Fig. 1.11).

I movimenti dell'articolazione acromionclaveare vengono definiti dal movimento della scapola rispetto alla clavicola. La scapola si muove scivolando sul torace su due piani di scorrimento, il primo fra il muscolo sottoscapolare e il gran dentato e il secondo fra il gran dentato e la cassa toracica (Fig. 1.12). Abbiamo sei movimenti di rotazione (Fig. 1.13). La rotazione verso l'alto e verso il basso è un movimento che avviene su un asse antero-posteriore: la rotazione verso l'alto è quando il movimento porta la glena a guardare in su e viceversa. La rotazione interna ed esterna è un movimento che avviene su un asse verticale: la rotazione interna è un movimento che porta la glena a guardare più in avanti, la rotazione esterna più lateralmente. Infine abbiamo il movimento di tilt (basculamento) anteriore o posteriore che avviene su un asse medio-laterale: il tilt anteriore quando la scapola si inclina in avanti, il tilt posteriore quando si inclina indietro. Infine abbiamo due movimenti di scorrimento: l'elevazione/depressione, in cui quando la scapola si alza, dovendo seguire la forma del torace, effettua un movimento di tilt anteriore, mentre quando si abbassa esegue un tilt posteriore. Il movimento di abduzione-adduzione, in cui durante un'abduzione la scapola, seguendo la forma cilindrica del torace, effettua una rotazione interna e viceversa nell'adduzione. L'abduzione-rotazione interna viene definita protrazione, l'adduzione-rotazione esterna retrazione. Tutti questi movimenti sono dati dall'azione simultanea dell'articolazione sternoclaveare e acromionclaveare.



**Figura 1.11** Variazioni nell'inclinazione della rima articolare dell'AC (45) (disegno di Alessia De Franceschi).



**Figura 1.12** Articolazione scapolo-toracica (secondo Gillis): **(1)** spazio fra il m. dentato anteriore e il torace; **(2)** spazio fra il m. dentato anteriore e il m. sottoscapolare; **(3)** m. dentato anteriore, artificialmente separato dal torace; **(4)** m. sottoscapolare; **(5)** m. sottospinato; **(6)** m. deltoide; **(7)** m. coracobrachiale; **(8)** m. piccolo pettorale; **(9)** m. grande pettorale; **(10)** parete del torace; **(11)** tendine del capo lungo del m. bicipite; **(12)** fascio nerveovascolare dell'ascella; **(13)** m. romboide; **(14)** m. trapezio; **(15)** omero; **(16)** scapola (da Testut L, Latarjet A. Trattato di anatomia umana, vol. I, Osteologia-artrologia. 5a edizione. Milano, Edra 2017).

Durante un'abduzione sul piano scapolare a livello dell'articolazione acromionclavare avviene una rotazione di circa  $15^{\circ}$ - $21^{\circ}$ , una traslazione antero-posteriore di circa 3,5 mm, una superiore di 1 mm, una rotazione interna di  $8^{\circ}$  e un basculamento di  $19^{\circ}$ - $22^{\circ}$  (47-51). I movimenti della scapola possono essere condizionati dalla forma del torace: in presenza di accentuata cifosi toracica abbiamo una loro diminuzione (52).

L'articolazione è innervata dal nervo ascellare, dal pettorale laterale e dal sovrascapolare.

Dopo i trent'anni il riscontro radiologico di artrosi aumenta progressivamente con l'aumentare dell'età, ma c'è scarsa correlazione fra i segni radiologici e la sintomatologia (3,53).

La lussazione dell'articolazione acromionclavare è piuttosto frequente, rappresentando circa il 9% delle lussazioni che interessano la spalla.

La scapola è un osso piatto triangolare che dà inserzione a numerosi muscoli. Sulla faccia posteriore presenta una cresta ossea che l'attraversa in senso medio-laterale detta spina della scapola, la quale divide la faccia posteriore nella fossa infraspinata inferiormente dove si inseriscono il sottospinato, il grande rotondo e il piccolo rotondo, e nella fossa sovraspinata superiormente, più piccola, dove origina il muscolo sovraspinato. La faccia anteriore è completamente occupata dal sottoscapolare (Fig. 1.16)

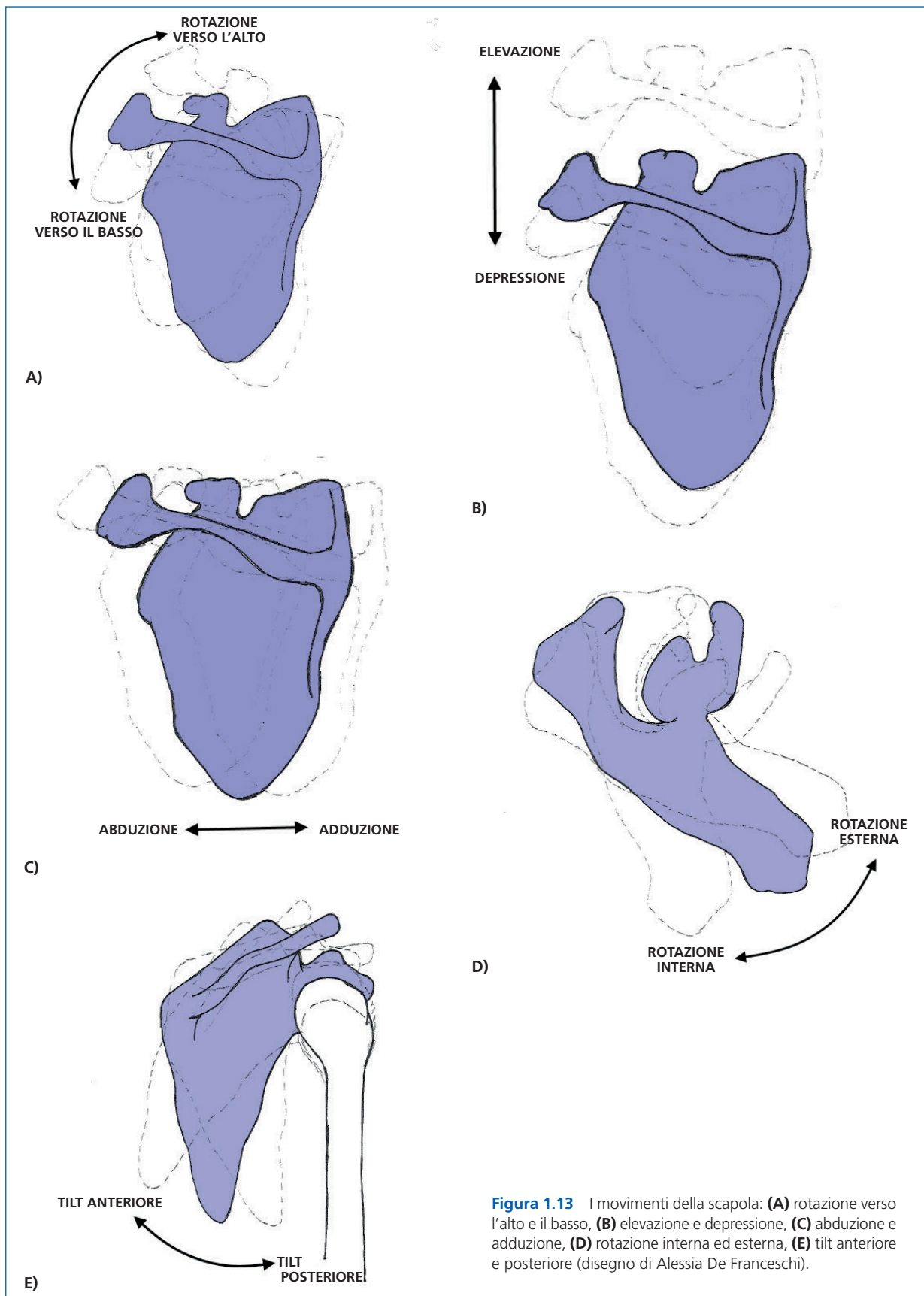
La spina lateralmente finisce con l'acromion che si articola con la clavicola. Sull'angolo laterale troviamo la glena che si articola con l'omero e il processo coracoideo.

La scapola dà inserzione a numerosi muscoli (Fig. 1.17). Lungo il bordo mediale su tutta la sua lunghezza si inserisce il gran dentato, poi partendo dal basso si inserisce il grande romboide, il piccolo rom-

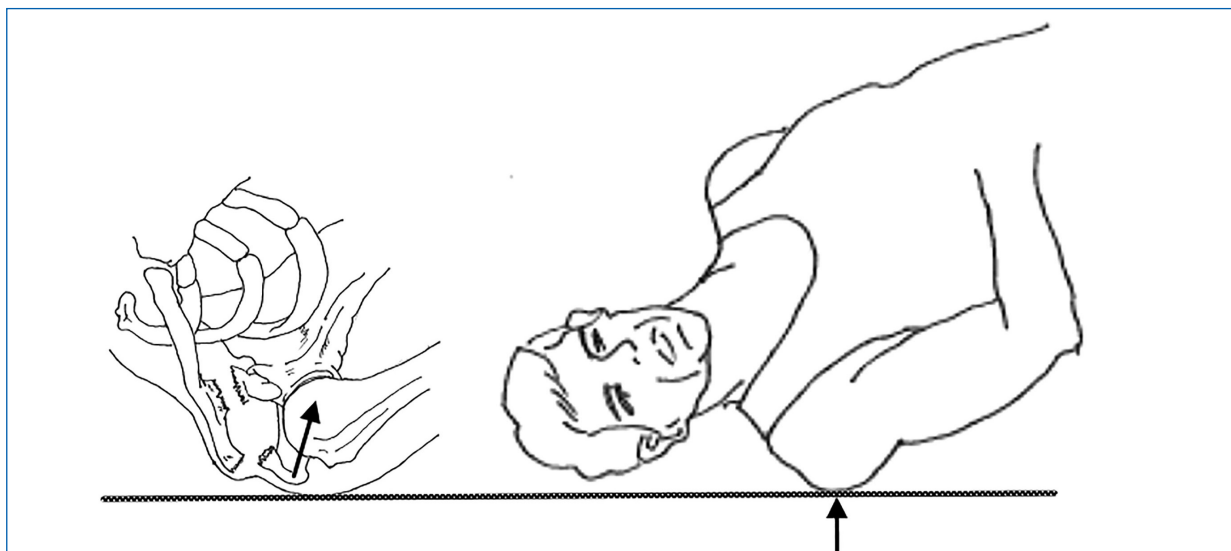
### Box 1.2 La lussazione acromionclavare

Colpisce soprattutto gli uomini alla terza decade che partecipano a sport di contatto. Il meccanismo più frequente è un trauma diretto sulla parte supero-laterale della spalla (Fig. 1.14). Rockwood (54) ha definito una classificazione di queste lussazioni basata sulla severità delle lesioni sostenute dall'apparato capsulo-legamentoso dell'articolazione e dai legamenti extracapsulari (Fig. 1.15). La classificazione descrive 6 tipologie di lesione:

- tipo I – è una distorsione articolare senza lesione della capsula e dei legamenti, non c'è spostamento dei capi articolari; trattamento conservativo
- tipo II – abbiamo una lesione della capsula e dei legamenti articolari, i legamenti extrarticolari hanno solo subito una distorsione; trattamento conservativo
- tipo III – c'è stata una lesione di tutti i legamenti, la clavicola è lussata superiormente; sia trattamento conservativo sia chirurgico (quale sia il migliore è ancora oggetto di dibattito)
- tipo IV – c'è stata una lesione di tutti i legamenti, la clavicola è lussata posteriormente; trattamento chirurgico
- tipo V – differisce dal tipo III, per una più marcata lussazione verso l'alto; trattamento chirurgico
- tipo VI – c'è stata una lesione di tutti i legamenti, la clavicola è lussata inferiormente; trattamento chirurgico (55-57).



**Figura 1.13** I movimenti della scapola: (A) rotazione verso l'alto e il basso, (B) elevazione e depressione, (C) abduzione e adduzione, (D) rotazione interna ed esterna, (E) tilt anteriore e posteriore (disegno di Alessia De Franceschi).

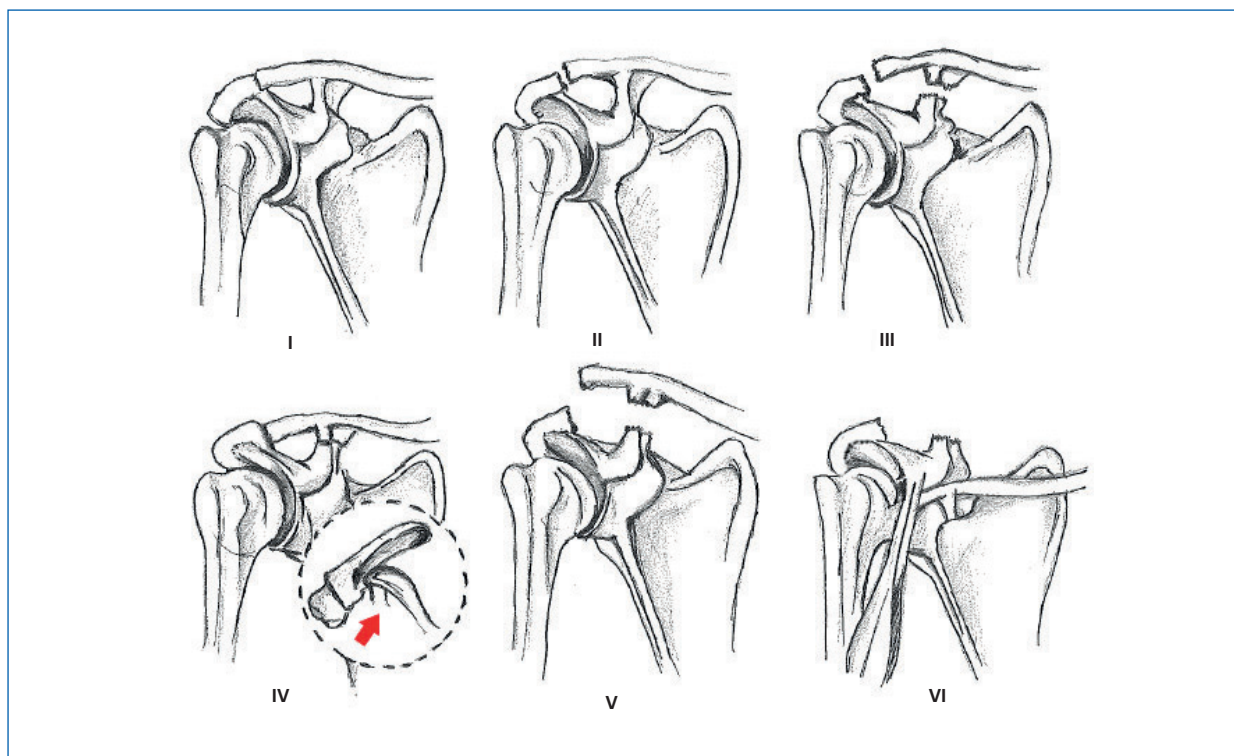


**Figura 1.14** Tipico esempio di meccanismo traumatico per la lussazione AC (disegno di Alessia De Franceschi).

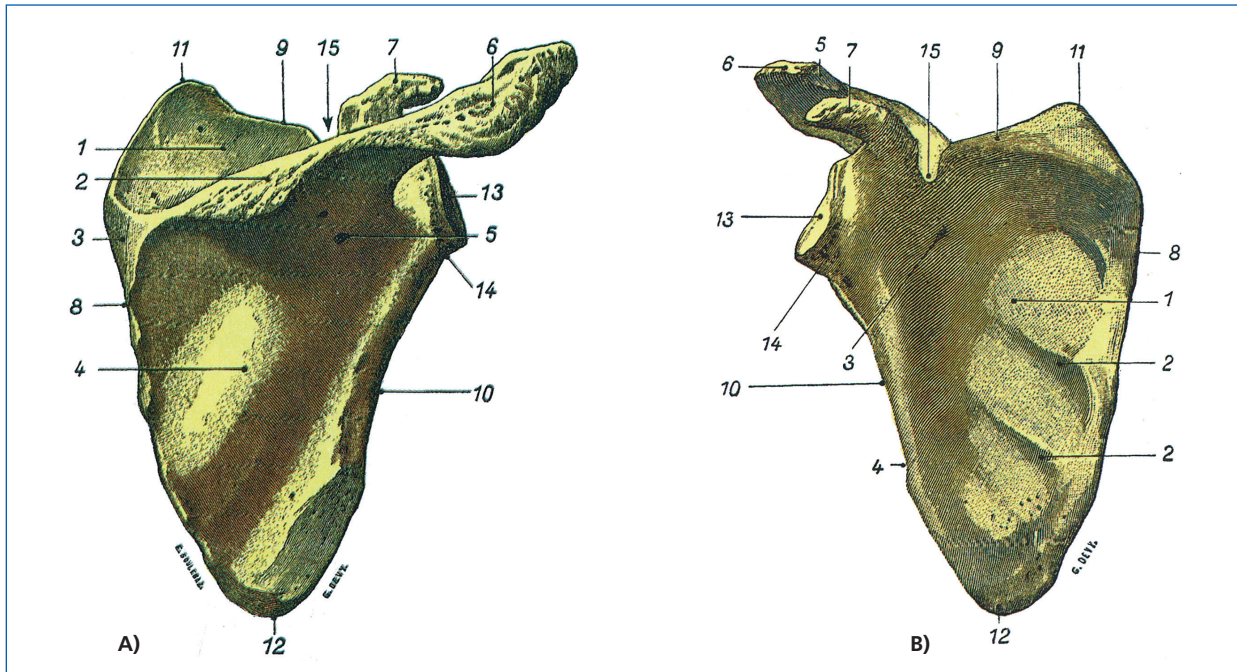
boide e l'elevatore della scapola. Sul processo coracoideo abbiamo l'inserzione del piccolo pettorale, del coracobrachiale e del capo breve del bicipite; inoltre dà inserzione ai legamenti coracoclavicolari (conoide e trapezoide), coracoacromiale e coraco-omeroale. La spina della scapola e l'acromion danno inserzione al trapezio medio e inferiore e al deltoide. L'acromion

insieme al legamento coracoacromiale costituisce il tetto del tunnel osteofibroso dove si trovano il sovraspinato e la borsa sub-acromiale.

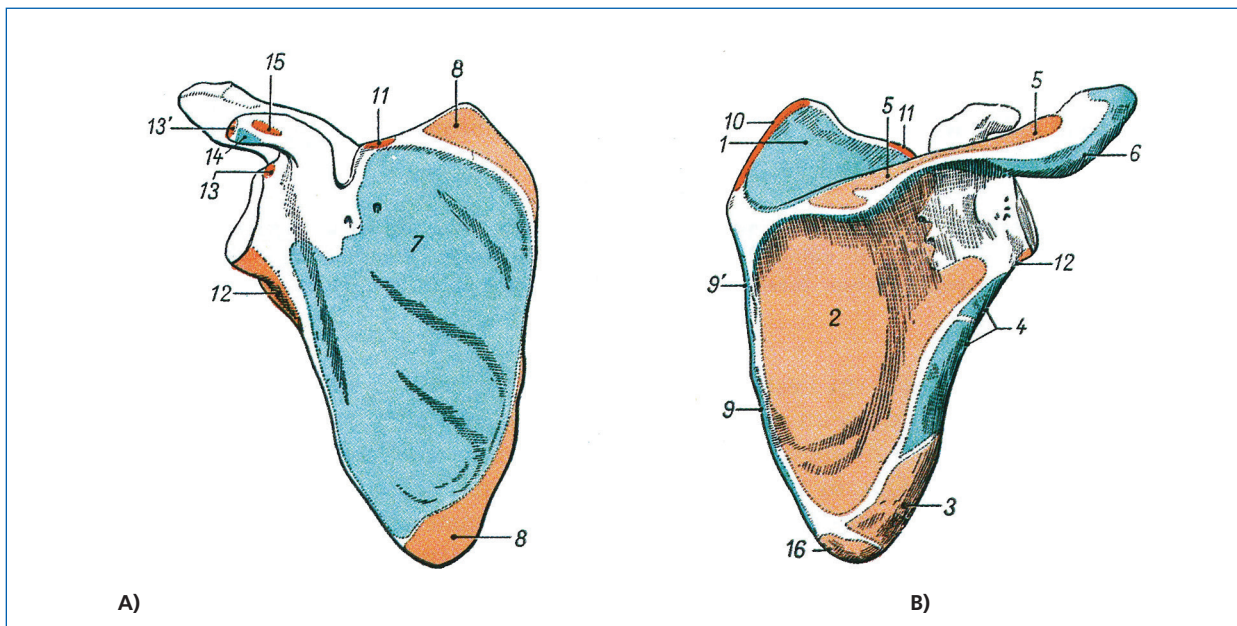
Il legamento coracoacromiale è sotteso fra la coracoide e la faccia inferiore dell'acromion e serve ad assorbire e contenere le traslazioni verso l'alto della testa omerale e a smorzare le sollecitazioni meccani-



**Figura 1.15** Classificazione delle lesioni dell'AC secondo Rockwood (disegno di Alessia De Franceschi).



**Figura 1.16** (A) Scapola destra, vista posteriormente: (1) fossa sovraspinata; (2) spina della scapola; (3) piccola superficie sulla quale scorre la fascia di inserzione del m. trapezio; (4) fossa sottospinata; (5) forame nutrizio; (6) acromion; (7) processo coracoideo; (8) margine mediale; (9) margine superiore; (10) margine laterale; (11) angolo superiore; (12) angolo inferiore; (13) cavità glenoidea; (14) collo della scapola; (15) incisura della scapola. (B) Scapola destra, vista anteriormente: (1) fossa sottoscapolare; (2) creste per l'inserzione del m. sottoscapolare; (3) forame nutrizio; (4, 10) margine laterale; (5) faccetta articolare per la clavicola; (6) acromion; (7) processo coracoideo; (8) margine mediale; (9) margine superiore; (11) angolo superiore; (12) angolo inferiore; (13) cavità glenoidea; (14) collo della scapola; (15) incisura della scapola (da Testut L, Latarjet A. Trattato di anatomia umana, vol. I, Osteologia-artrologia. 5a edizione. Milano, Edra 2017).



**Figura 1.17** La scapola con le inserzioni muscolari: (A) faccia anteriore e (B) faccia posteriore. (1) m. sovraspinato; (2) m. sottospinato; (3) m. grande rotondo; (4) m. piccolo rotondo; (5) m. trapezio; (6) m. deltoide; (7) m. sottoscapolare; (8) m. dentato anteriore; (9, 9') m. romboide; (10) m. elevatore della scapola; (11) m. omoioideo; (12) capo lungo del m. tricipite; (13) capo lungo del bicipite; (14) m. coracobrachiale; (15) m. piccolo pettorale; (16) m. grande dorsale (raramente) (da Testut L, Latarjet A. Trattato di anatomia umana, vol. I, Osteologia-artrologia. 5a edizione. Milano, Edra 2017).

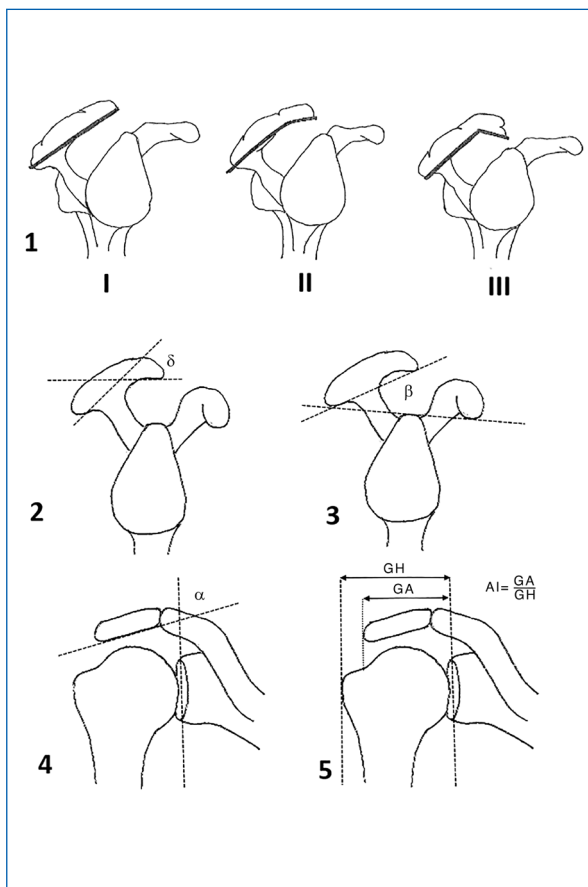
**Box 1.3 La forma dell'acromion**

Data la sua posizione, l'acromion è stato sottoposto a numerosi studi morfologici per cercare di capire il suo ruolo nella sindrome da *impingement* e nella lesione a tutto spessore della cuffia. Sono state studiate in particolare 5 caratteristiche (Fig. 1.18):

1. La forma dell'acromion; è classificata secondo Bigliani (59) in tipo I acromion piatto, tipo II acromion curvato e tipo III acromion uncinato.
2. L'inclinazione dell'acromion; si traccia una linea che congiunge il margine inferiore del punto più anteriore dell'acromion con il margine inferiore a metà acromion. Quindi si traccia la linea che congiunge il margine inferiore della parte più posteriore dell'acromion con il margine inferiore di metà acromion. L'angolo formato dall'incontro delle due linee è l'inclinazione dell'acromion (59,60).
3. Tilt acromiale; da una radiografia dell'*outlet* si traccia una linea che congiunge il margine inferiore della porzione più anteriore dell'acromion con la porzione più posteriore dello stesso, quindi si traccia una linea che congiunge il margine inferiore della porzione più posteriore dell'acromion con il margine inferiore della punta del processo coracoideo. L'angolo che formano queste due linee è l'angolo di inclinazione dell'acromion (60).
4. L'angolo laterale dell'acromion; in una radiografia antero-posteriore della gleno-omeroale si traccia una linea che congiunge il margine craniale e caudale della glena, quindi si traccia una linea parallela al margine inferiore dell'acromion: l'angolo che si forma all'incontro di queste linee è l'angolo laterale dell'acromion (61).
5. L'*acromion index*; sempre su una radiografia antero-posteriore si divide la distanza fra il piano glenoideo e l'acromion con la distanza fra il piano glenoideo e il margine più esterno della testa omerale. Più largo sarà l'acromion, maggiore sarà l'*acromion index*.

È interessante notare come all'inizio l'attenzione fosse mirata alla sua conformazione sul piano sagittale (forma dell'acromion, inclinazione dell'acromion, tilt acromiale), mentre successivamente si sia spostata sulla sua conformazione sul piano frontale (angolo laterale dell'acromion e *acromion index*).

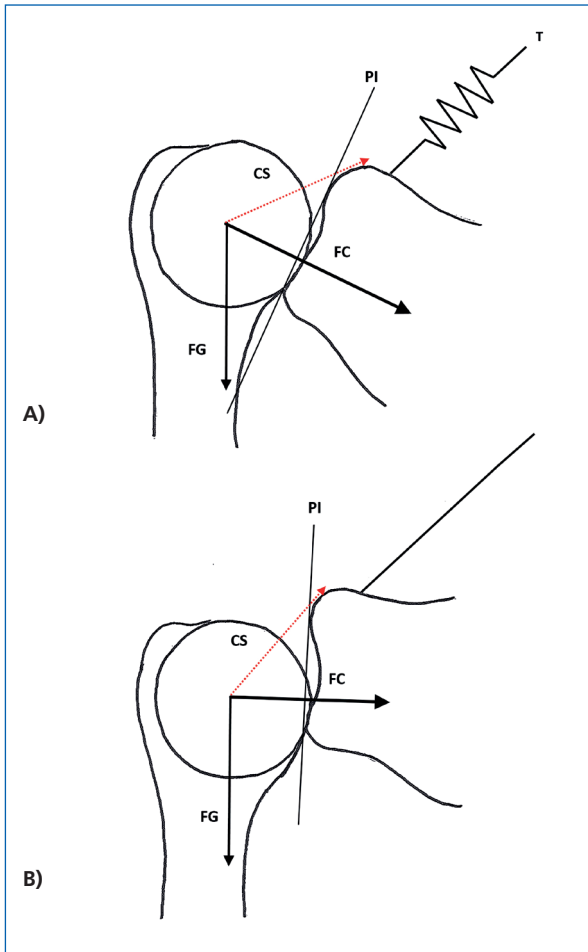
In una metanalisi del 2013 (62) sembra ci sia una correlazione fra un basso angolo laterale dell'acromion e un elevato *acromion index* con la lesione a tutto spessore della cuffia dei rotatori.



**Figura 1.18** Studi morfologici dell'acromion (disegno di Alessia De Franceschi).

che subiscono l'acromion e la coracoide durante l'azione muscolare (58). È un legamento ad aspetto triangolare con un'insertione più piccola a livello della coracoide e più espansa a livello dell'acromion.

La glena ha una forma allungata in direzione cranio-caudale, rispetto al corpo della scapola è leggermente retroversa di circa 6° e leggermente inclinata verso l'alto. La scapola sul torace è inclinata di 30°-40° rispetto al piano frontale e quindi la glena guarda anteriormente nonostante la sua retroversione. Gli autori non sono concordi sull'inclinazione sul piano frontale: per alcuni la glena è inclinata verso l'alto (63,64) mentre per altri è inclinata verso il basso di circa 5° (65,66). La differenza si spiega probabilmente dalla diversa postura dei soggetti esaminati e dal modo diverso di misurare la rotazione scapolare; per esempio nel lavoro di Poppen e Walker (65) l'inclinazione è stata misurata sulla retta che unisce i due estremi, superiore e inferiore della glena, mentre Lukasiewicz et al. (64) hanno misurato l'inclinazione della retta che unisce l'angolo inferiore con la radice della spina della scapola. Questa inclinazione verso l'alto della glena viene chiamata in causa nella stabilizzazione della testa omerale a riposo. La componente capsulo-legamentosa del polo superiore messa in tensione dal peso dell'arto superiore spinge la testa contro il piano inclinato della glena (Fig. 1.19). Da questo meccanismo si ipotizza che nel caso in cui la scapola per postura o in seguito a una patologia (paralisi del trapezio, emiplegia) sia in posizione di



**Figura 1.19** Rappresentazione della postura scapolare e sua ipotetica funzione di stabilizzazione della gleno-omeroale. **(A)** La corda rappresenta la componente muscolare (trapezio superiore) che mantiene l'inclinazione verso l'alto della glena. Il peso dell'arto superiore (FG) associato alla tensione esercitata dal complesso capsulo-legamentoso superiore (CS) generano una forza compressiva dell'articolazione gleno-omeroale (FC). Questa forza di compressione associata all'inclinazione della glena la stabilizza rispetto a una traslazione inferiore. **(B)** Vediamo la perdita dell'inclinazione verso l'alto della glena, rappresentata da una perdita della funzione di sostegno muscolare, con conseguente diminuzione della forza compressiva e quindi la possibilità di un aumento della traslazione inferiore della testa omerale (disegno di Alessia De Franceschi).

rotazione verso il basso, l'aumento della sollecitazione sulle strutture capsulo-legamentose porti con il tempo a una loro deformazione plastica, con possibilità di lussazione inferiore della testa omerale. Anche se considerassimo gli studi più recenti che evidenziano la rotazione verso l'alto della glena, il valore sarebbe comunque talmente modesto ( $1^{\circ}$ - $3^{\circ}$ ) da rendere questo meccanismo probabilmente trascurabile (67). Nelle patologie neurologiche il motivo della lussazione verso il basso della testa omerale è quindi da

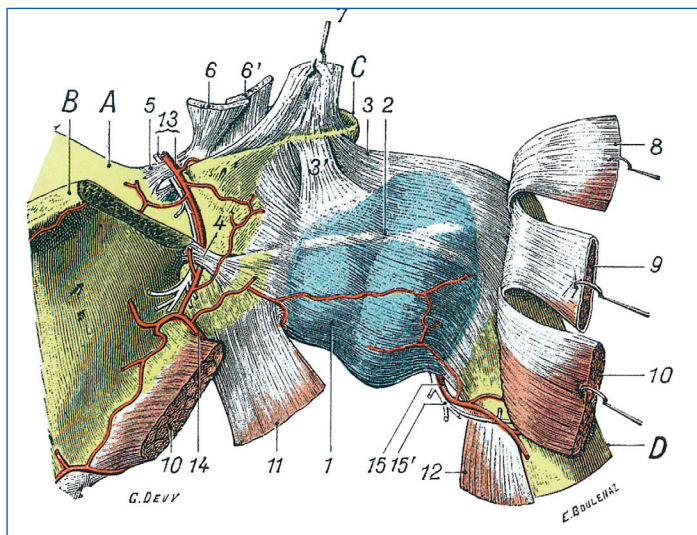
ricercare nell'alterazione senso-motoria dei muscoli gleno-omeroali piuttosto che nella posizione di rotazione verso il basso assunta dalla scapola.

Sull'apice superiore della glena abbiamo il tubercolo sovrarglenoideo che dà inserzione a parte del tendine del capo lungo del bicipite. Inferiormente è presente il tubercolo sottoglenoideo dove si inserisce parte del tendine del capo lungo del tricipite.

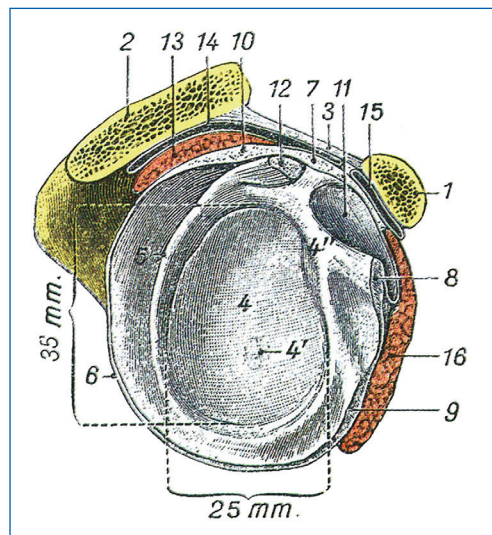
La scapola presenta due incisure (Fig. 1.20) importanti dal punto di vista patologico. L'incisura scapolare si trova sul margine superiore appena mediale al processo coracoideo. Questa incisura è chiusa superiormente dal legamento trasverso della scapola formando quindi un tunnel osteofibroso che offre il passaggio al nervo sovrascapolare. La seconda è l'incisura spino-glenoidea dove il nervo sovrascapolare lascia la fossa sovraspinata per andare nella fossa infraspinata: anche in questo è presente un legamento (spinoglenoideo) che chiude l'incisura (68). Il nervo sovrascapolare può subire un intrappolamento in uno dei due passaggi.

## L'ARTICOLAZIONE GLENO-OMERALE

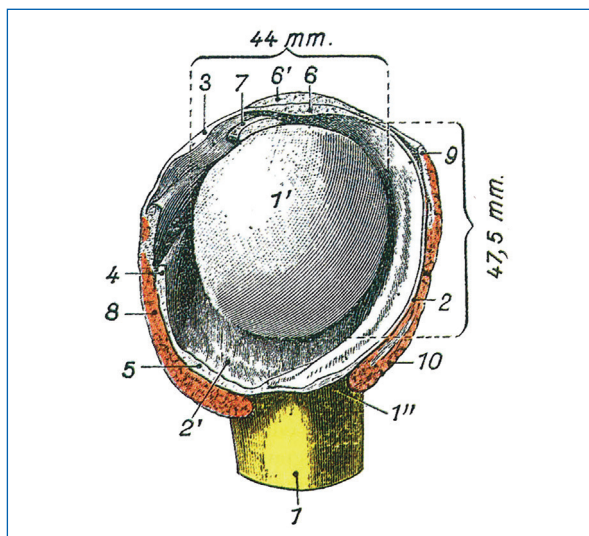
È l'articolazione del corpo umano che ha più gradi di movimento e ciò è dovuto alla sproporzione dell'area di contatto fra la glena e la testa omerale. La glena (Fig. 1.21) ha una forma leggermente concava con il diametro verticale più lungo di quello orizzontale, con un'area di  $6-9 \text{ cm}^2$  (69). La testa omerale (Fig. 1.22) ha una forma a calotta sferica e ha una superficie molto più estesa della glena, di  $20-30 \text{ cm}^2$ . L'area di contatto coperta dalla glena è quindi solo un terzo rispetto all'area disponibile della testa omerale; inoltre il raggio di curvatura delle due superfici non è lo stesso: la glena ha un raggio più grande di quello della testa omerale (70). Data la conformazione, la stabilità ossea è pressoché inesistente. La semisfera della testa dell'omero è collegata alla diafisi omerale attraverso il collo omerale il quale è inclinato rispetto alla diafisi di circa  $140^{\circ}$  (angolo di inclinazione); inoltre la testa è rivolta verso l'indietro, infatti l'asse del collo omerale è ruotato indietro rispetto all'asse della paletta omerale di circa  $35^{\circ}$  (angolo di retroversione) (Fig. 1.23). Sulla faccia laterale dell'omero, appena dopo il collo anatomico, è presente una grossa tuberosità chiamata trochite che dà inserzione al sovraspinato, al sottospinato e al piccolo rotondo. Anteriormente al trochite abbiamo una tuberosità più piccola chiamata trochine, dove si inserisce il sottoscapolare. Fra le due tuberosità si trova il solco bicipitale (Fig. 1.24) coperto dal legamento trasverso dove si impegna il tendine del capo lungo del bicipite.



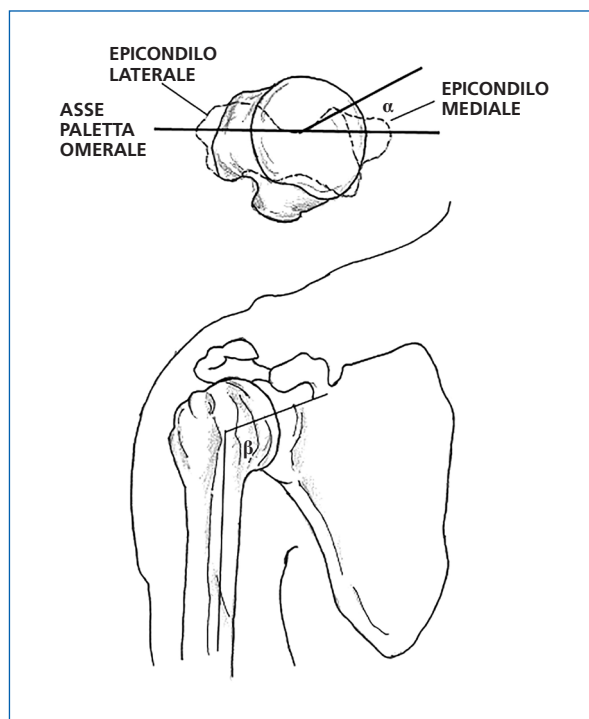
**Figura 1.20** Articolazione dell'omero, vista posteriormente (sinoviale iniettata di sego). (A) Scapola; (B) spina della scapola; (C) processo coracoideo; (D) omero. (1) Capsula dell'articolazione dell'omero; (2) fasci connettivi corrispondenti allo spazio compreso tra il m. sovraspinato e il m. sottospinato; (3) legamento coraco-omeroale con (3') fascio coracoglenoideo; (4) legamento spinoglenoideo; (5) legamento trasverso della scapola; (6, 6') legamento coracoclavicolare; (7) legamento coracoacromiale tagliato e tirato in alto; (8) m. sovraspinato; (9) m. sottospinato; (10) m. piccolo rotondo; (11) capo lungo del m. tricipite; (12) capo laterale del tricipite; (13-15') alcuni nervi e vasi della regione (da Testut L, Latarjet A. Trattato di anatomia umana, vol. I, Osteologia-artrologia. 5a edizione. Milano, Edra 2017).



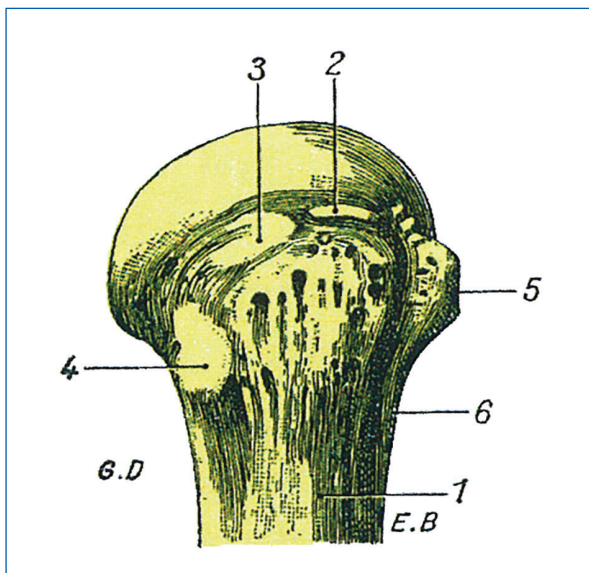
**Figura 1.21** La cavità glenoidea della scapola, vista frontalmente, con il suo contorno legamentoso. (1) Processo coracoideo; (2) acromion; (3) legamento coracoacromiale; (4) cavità glenoidea con (4') macchia glenoidea e (4'') incisura glenoidea; (5) labbro glenoideo; (6) capsula articolare; (7) legamento gleno-omeroale superiore; (8) legamento gleno-omeroale medio; (9) legamento gleno-omeroale inferiore; (10) legamento coraco-omeroale; (11) forame ovale; (12) tendine del capo lungo del m. bicipite; (13) m. sovraspinato; (14) borsa sottoacromiale; (15) borsa sottocoracoidea; (16) m. sottoscapolare (da Testut L, Latarjet A. Trattato di anatomia umana, vol. I, Osteologia-artrologia. 5a edizione. Milano, Edra 2017).



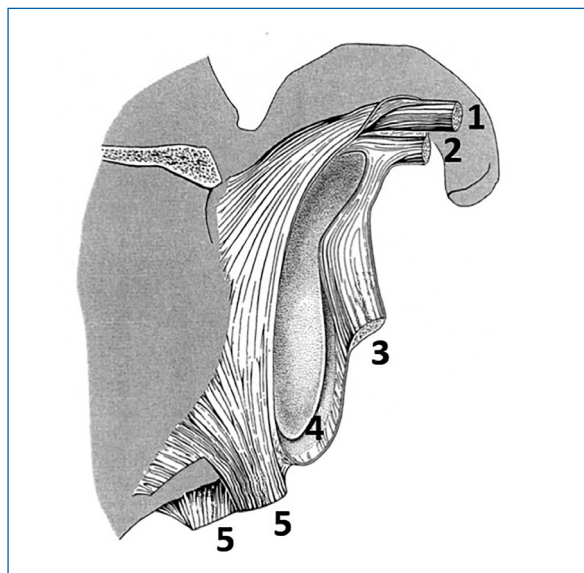
**Figura 1.22** La testa dell'omero, vista frontalmente, con il suo contorno legamentoso. (1) Diafisi; (1') testa; (1'') collo chirurgico; (2) capsula articolare; (2') punto di inserzione della capsula sul collo; (3) legamento gleno-omeroale superiore; (4) legamento gleno-omeroale medio; (5) legamento gleno-omeroale inferiore; (6) legamento coraco-omeroale; (7) tendine del capo lungo del m. bicipite; (8) m. sottoscapolare; (9) m. sottospinato; (10) m. piccolo rotondo (da Testut L, Latarjet A. Trattato di anatomia umana, vol. I, Osteologia-artrologia. 5a edizione. Milano, Edra 2017).



**Figura 1.23** Angoli del collo omerale.  $\alpha$ : angolo di retroversione;  $\beta$ : angolo di inclinazione (disegno di Alessia De Franceschi).



**Figura 1.24** Estremità superiore dell'omero destro, vista lateralmente. (1) Collo chirurgico; (2) faccetta per l'inserzione del m. sovraspinato; (3) *idem*, per il m. sottospinato; (4) *idem*, per il m. piccolo rotondo; (5) tubercolo minore; (6) solco intertuberculare (da Testut L, Latarjet A. Trattato di anatomia umana, vol. I, Osteologia-artrologia. 5a edizione. Milano, Edra 2017).

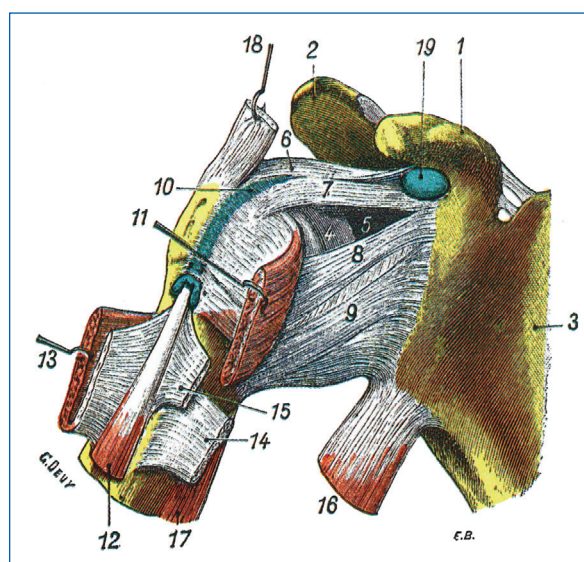


**Figura 1.25** Labbro glenoideo. (1) Tendine del capo lungo del bicipite; (2) legamento gleno-omeroale superiore; (3) banda anteriore del legamento gleno-omeroale inferiore; (4) labbro glenoideo; (5) tendine del capo lungo del tricipite (modificata da Huber WP, Putz RV. Periarticular fiber system of the shoulder joint. Arthroscopy. 1997).

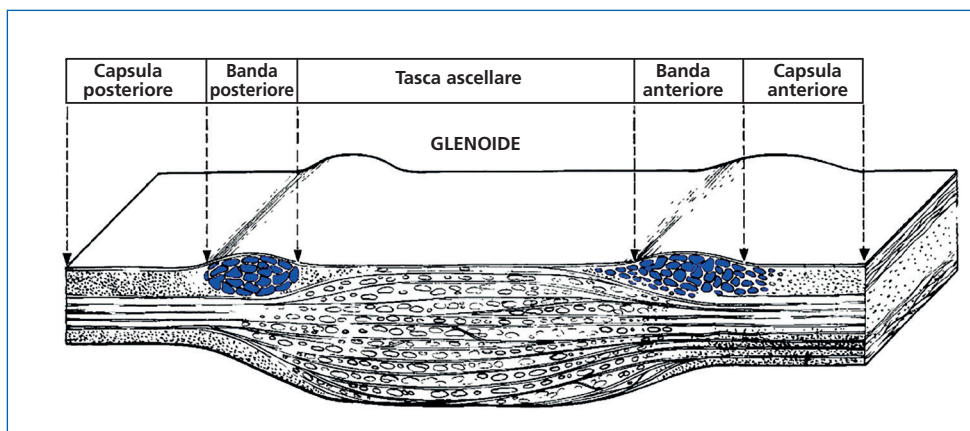
Attorno alla glena si inserisce il labbro glenoideo che è un anello di fibre collagene parallele a sezione triangolare con il compito di aumentare la profondità della glena. Il labbro è maggiormente sviluppato nella parte inferiore, dove riceve fibre dal tendine del capo lungo del tricipite e dove si inserisce fermamente sul bordo cartilagineo della glena (Fig. 1.25). Superiormente la struttura è meno sviluppata ed è formata prevalentemente dalle fibre provenienti dal tendine del capo lungo del bicipite, dal legamento gleno-omeroale superiore e inferiore. L'inserzione nella parte superiore del labbro non avviene sulla cartilagine articolare ma sul collo della glena ed è più mobile rispetto alla parte inferiore (71); questa conformazione forma un recesso fra il labbro e la cartilagine che può essere confuso con una SLAP di tipo II.

L'articolazione è avvolta in una capsula articolare ridondante, rinforzata sia da legamenti intracapsulari sia extracapsulari. La capsula si inserisce tutto intorno al collo della glena, sul labbro glenoideo e sul collo dell'omero. Semplificando possiamo dire che è formata da fibre collagene a decorso radiale, cioè che vanno dalla glena all'omero con varie inclinazioni, più sviluppata nella parte anteriore, e fibre circolari che girano attorno all'articolazione, più evidenti nella parte posteriore.

La capsula è rinforzata da quattro legamenti: il legamento gleno-omeroale superiore, medio, inferiore e il legamento spirale (Fig. 1.26). Non sono strutture



**Figura 1.26** Articolazione dell'omero, vista anteriore. (1) Processo coracoideo; (2) acromion; (3) fossa sottoscapolare; (4) testa dell'omero, veduta attraverso il forame ovale (5), dopo aver distrutto la sinoviale; (6) legamento coraco-omeroale; (7) legamento gleno-omeroale superiore; (8) legamento gleno-omeroale medio; (9) legamento gleno-omeroale inferiore; (10) legamento omerale trasverso di G. Brodie; (11) m. sottoscapolare; (12) capo lungo del m. bicipite; (13) m. grande pettorale; (14) tendine del m. grande rotondo; (15) tendine del m. grande dorsale; (16) capo lungo del m. tricipite; (17) m. vasto mediale del tricipite; (18) m. sovraspinato; (19) borsa sinoviale posta alla radice del processo coracoideo (da Testut L, Latarjet A. Trattato di anatomia umana, vol. I, Osteologia-artrologia. 5a edizione. Milano, Edra 2017).



**Figura 1.27** Sezione sagittale del legamento gleno-omeroale inferiore (modificata da O'Brien SJ et al. The anatomy and histology of the inferior glenohumeral ligament complex of the shoulder. Am J Sports Med. 1990).

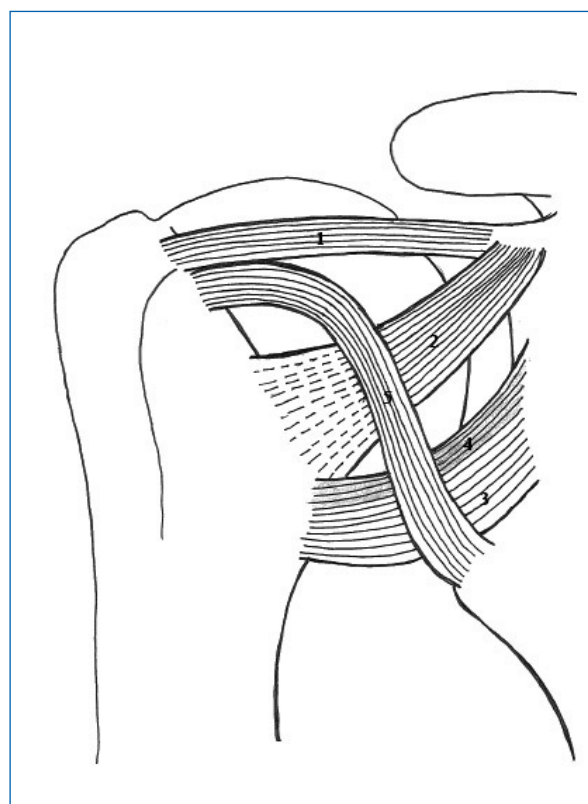
distinte ma sono degli ispessimenti capsulari dove le fibre collagene hanno un orientamento parallelo e ben organizzato rispetto al resto della capsula.

Il legamento gleno-omeroale superiore origina dal tubercolo sovraglenoideo appena davanti all'origine del capo lungo del bicipite e dal labbro glenoideo, e si inserisce sulla parte superiore del trochine, sul fondo del solco bicipitale e sul bordo mediale del solco bicipitale, andando a costituire la parte prossimale del legamento trasverso del bicipite (72). Il resto è costituito dalle fibre provenienti dal tendine del sottoscapolare.

Il legamento gleno-omeroale medio origina sul tubercolo glenoideo superiore appena davanti al precedente e si inserisce sul trochine insieme al tendine del sottoscapolare. È il legamento con la più alta variabilità individuale (73,74).

Il legamento gleno-omeroale inferiore è il più complesso del sistema ed è formato da tre componenti: la banda anteriore e posteriore hanno una forma cordoni-forme costituita da fibre collagene parallele (Fig. 1.27). Fra queste due strutture si estende la tasca ascellare la quale è composta da fasci di fibre disposti in modo meno organizzato. La banda anteriore si inserisce in parte sul collo della glena e in parte sul labbro, anteriormente fra ore 2 e ore 4, la banda posteriore fra ore 7 e ore 9: fra le due, la tasca ascellare. Distalmente la banda anteriore e posteriore si inseriscono anteriormente e posteriormente sul collo dell'omero con la tasca ascellare che si inserisce fra le due (75).

Il legamento spirale o *fasciculus obliquus* è un legamento di recente riconoscimento data la sua intima connessione con il tendine del sottoscapolare che lo rendeva difficilmente individuabile (Fig. 1.28). Origina sul polo inferiore della glena vicino all'inserzione del tendine del tricipite e si porta verso l'alto e lateralmente fino a inserirsi sul trochine. Lungo il percorso le sue fibre si intersecano con le fibre del legamento gleno-omeroale medio e con il tendine del sottoscapo-



**Figura. 1.28** Il legamento spirale. (1) Legamento gleno-omeroale superiore; (2) legamento gleno-omeroale medio; (3) legamento gleno-omeroale inferiore e (4) la sua banda anteriore; (5) legamento spirale o *fasciculus obliquus* (disegno di Alessia De Franceschi).

lare (76-80). Secondo Pouliart è una parte integrante del legamento gleno-omeroale inferiore (80).

Il legamento coraco-omeroale è un legamento complesso che origina dalla coracoide, ha una forma trapezoidale e si dirige lateralmente sopra il legamento gleno-omeroale superiore con cui si unisce nella parte terminale. Anteriormente si avvolge attorno al muscolo e al tendine del sottoscapolare, una parte si inserisce

sul trochite e insieme al legamento gleno-omeroale superiore forma la “*pulley* del bicipite”. La parte posteriore avvolge completamente il tendine del sovraspinato e la parte craniale del tendine del sottospinato (81-83) (Fig. 1.29).

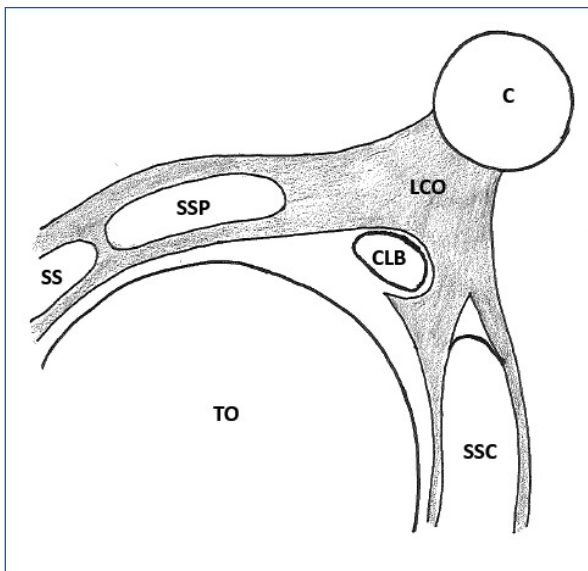
Il volume articolare e quindi la pressione intra-articolare variano a seconda dei movimenti: la posizione che produce la minor pressione è in abduzione scapolare di 30° e 25° di intrarotazione. Questa informazione può essere utile nella programmazione di un esercizio piuttosto che nell'adozione di una posizione antalgica di riposo (84).

Sopra il complesso capsulo-legamentoso si trova la cuffia dei rotatori che avvolge quasi completamente la testa omerale lasciando liberi solo la parte inferiore e un piccolo spiraglio antero-superiore, l'intervallo dei rotatori. La cuffia è composta dai tendini dei muscoli sottoscapolare, sovraspinato, sottospinato e piccolo rotondo. I tendini visti dalla faccia bursale sembrano entità distinte, mentre nella parte più interna, in prossimità dell'inserzione omerale, le fibre collagene si mescolano fra di loro formando un'unica struttura. Le fibre craniali del sottoscapolare passando sul fondo del solco bicipitale si incontrano con le fibre anteriori del sovraspinato; un mescolamento ancora maggiore lo si ha fra le fibre posteriori del sovraspinato con le fibre craniali del sottospinato e infine tra le fibre caudali di quest'ultimo e le fibre craniali del piccolo rotondo (81)(Fig. 1.30). Questo aspetto anatomico ha un risvolto importante nelle lesioni a tutto spessore della cuffia, infatti quando

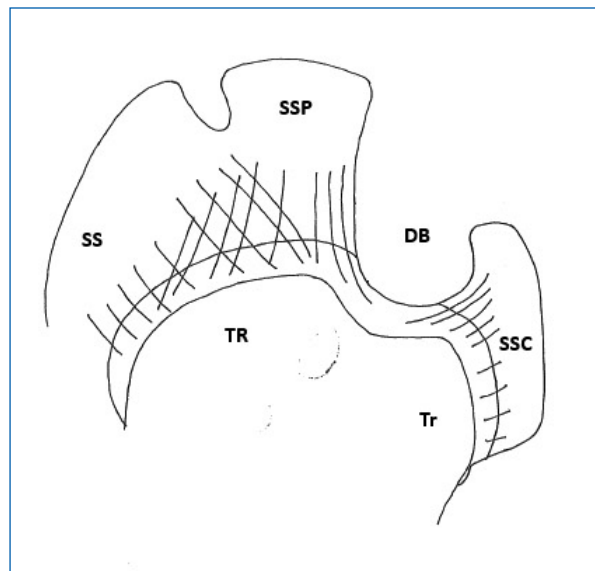
abbiamo una lesione su un tendine questa si può propagare agli altri poiché formano un'unica entità. Con la faccia articolare la cuffia dei rotatori è intimamente collegata alla capsula, e allo stesso modo alla borsa sub-acromiale con la faccia bursale (83). Fra il tendine del sottoscapolare e del sovraspinato si forma uno spazio triangolare con l'apice alla coracoide che si chiama intervallo dei rotatori, che viene coperto dal legamento gleno-omeroale superiore e dal coraco-omeroale.

L'articolazione gleno-omeroale è innervata anteriormente dal nervo ascellare, dal nervo pettorale laterale e dal nervo sottoscapolare, posteriormente dal nervo sovrascapolare e dal nervo ascellare (85).

Fra la cuffia e il tetto osteofibroso dato dall'acromion e dal legamento coracoacromiale abbiamo una zona di scorrimento che funziona come un'articolazione e fra queste due interfacce è posizionata la borsa sub-acromiale, il cui scopo è di ridurre l'attrito. La borsa è formata da due strutture, la borsa sottoacromiale e la borsa sottodeltoidea: esse possono essere unite oppure separate (a tal riguardo la letteratura fornisce dati molto discordanti) (86-88). Ha una forma grossolanamente circolare con un diametro di circa 5,5 cm e il centro posizionato sul margine anteriore dell'acromion. Il tetto della borsa è attaccato alla faccia inferiore dell'acromion, del legamento coracoacromiale e alla parte prossimale del deltoide. Inferiormente la borsa aderisce alla cuffia dei rotatori, in particolare al tendine del sovraspinato. La borsa contiene una fitta rete di terminazioni nervose libere (89-92); per



**Figura 1.29** Legamento coraco-omeroale. C: coracoide, TO: testa omerale, SS: sottospinato, SSP: sovraspinato, SSC: sottoscapolare, CLB: capo lungo del bicipite, LC: legamento coraco-omeroale (disegno di Alessia De Franceschi).



**Figura 1.30** Struttura della cuffia dei rotatori. SSC: sottoscapolare, SSP: sovraspinato, SS: sottospinato, DB: doccia bicipitale, TR: trochine (disegno di Alessia De Franceschi).

quanto riguarda i meccanocettori due studi hanno trovato corpuscoli del Pacini, del Ruffini e del Golgi-Mazzoni (89,92), mentre Vangness et al. (91) hanno trovato solo terminazioni libere. Questa ricca innervazione ha fatto sospettare che sia una struttura rilevante nella generazione del dolore alla spalla. La pressione intrabursale aumenta con l'elevazione dell'omero ed è ulteriormente influenzata dal carico sollevato (93).

L'innervazione è fornita prevalentemente dal nervo sovrascapolare, parte dal nervo pettorale laterale, dall'ascellare e da una branca della corda posteriore del plesso brachiale.

## MUSCOLI

### Muscoli assio-scapolari

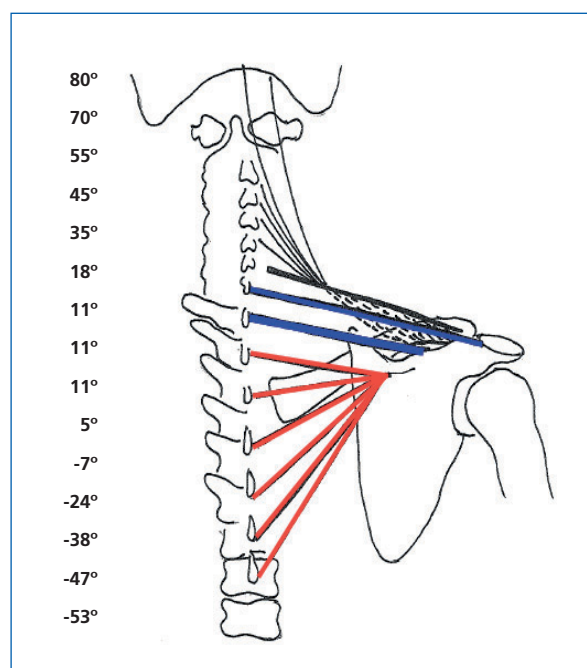
#### TRAPEZIO

Il trapezio è un muscolo ampio e sottile che si estende dall'occipite fino al torace, dalla linea mediana fino all'acromion. Funzionalmente è suddiviso in tre parti: il trapezio superiore, medio e inferiore. Il trapezio superiore si inserisce sulla linea nucale superiore e sul legamento nucale fino a C6: tutte le fibre si inseriscono poi sul bordo posteriore del terzo laterale della clavicola. Il trapezio medio origina dalle spinose di C7-T1 e si inserisce sull'acromion e lungo tutto il bordo superiore della spina della scapola. Il trapezio inferiore origina dalle spinose da T2 a T12: fino a T5 le fibre sono sempre presenti, da T6 a T12 sono presenti in modo progressivamente meno frequente. Le fibre si inseriscono attraverso una lamina aponevrotica sul tubercolo del deltoide sulla spina della scapola. La direzione delle fibre del trapezio superiore è molto verticale partendo dai fasci che originano dall'occipite, ma questa inclinazione diminuisce prima dell'inserzione sulla clavicola per la presenza della fascia cervicale. I fasci inferiori sono molto meno inclinati: l'inserzione sulla clavicola del trapezio superiore avviene quindi con una piccola inclinazione verso l'alto. Le fibre del trapezio medio sono pressoché orizzontali e da sole costituiscono un terzo della PCSA (*Physiological Cross Sectional Area*) di tutto il trapezio (Tab. 1.1). Infine le fibre del trapezio inferiore sono arrangiate a ventaglio, l'inclinazione è prevalentemente verso l'alto ed è via via crescente man mano che si scende (28) (Fig. 1.31). Comunemente il trapezio viene descritto come un importante rotatore verso l'alto della scapola in associazione con il gran dentato. Questa funzione è ulteriormente rafforzata da una coppia di forze che si svilupperebbe all'interno del muscolo stesso fra il trapezio superiore e il trape-

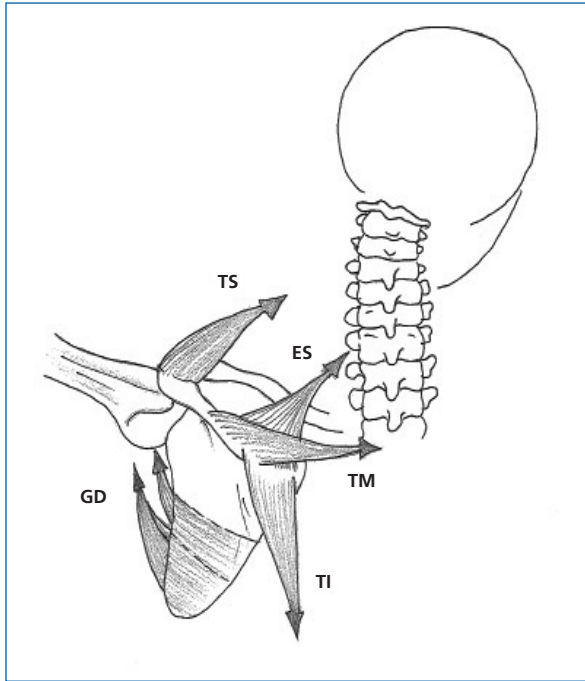
**Tabella 1.1** PCSA del trapezio

Muscolo trapezio	PCSA cm <sup>2</sup>
T. superiore LNS	0,3 (2,3%)
T. superiore C0-C3	0,7 (5,4%)
T. superiore C3-C6	2,3 (17,7%)
T. medio	4,1 (31,6%)
T. inferiore T2-T5	3,0 (23%)
T. inferiore T6-T12 (variabile)	2,6 (20%)

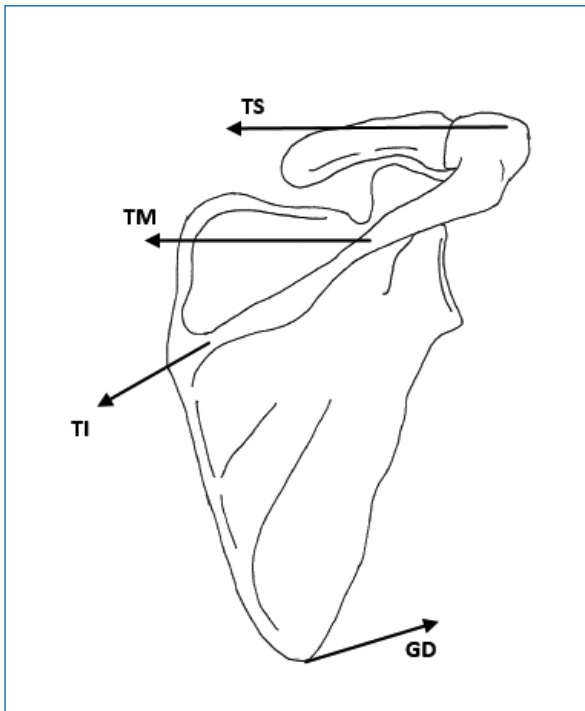
zio inferiore. Johnson et al. (28) attraverso un'accurata indagine anatomica hanno evidenziato innanzitutto che il trapezio superiore non ha un vettore di forza orientato come comunemente si crede, fortemente inclinato verso l'alto (Fig. 1.32), ma è molto più orizzontale e non agisce sulla scapola ma sulla clavicola (Fig. 1.33). L'azione principale del trapezio superiore è di elevare e retroporre la clavicola; naturalmente questo ha un'azione indiretta anche sulla scapola facilitando la sua rotazione verso l'alto, il tilt posteriore e la rotazione esterna. Da notare che tutte le fibre del trapezio superiore, escluse quelle che si inseriscono sull'occipite, si inseriscono sul legamento nucale in modo da non sollecitare eccessivamente il rachide cervicale. Le fibre che si inseriscono sull'occipite hanno una PCSA molto piccola, quindi non riescono a produrre molta forza; inoltre sono molto



**Figura 1.31** Inclinazione rispetto al piano orizzontale dei fasci del trapezio (disegno di Alessia De Franceschi).



**Figura 1.32** Una classica rappresentazione del trapezio superiore. Come possiamo vedere la linea di azione è molto inclinata, quasi che la funzione preceda la struttura, come ha osservato Johnson (28). Da notare anche l'inserzione sull'acromion mentre nella realtà si inserisce esclusivamente sulla clavicola. **TS**: trapezio superiore, **ES**: elevatore della scapola, **TM**: trapezio medio, **TI**: trapezio inferiore, **GD**: gran dentato (disegno di Alessia De Franceschi).



**Figura 1.33** Linee d'azione del trapezio sulla scapola (disegno di Alessia De Franceschi).

inclinate e la fascia cervicale fa da puleggia per cui arrivano all'inserzione sulla clavicola con un angolo di inclinazione molto ridotto.

Il centro di rotazione della scapola varia durante il movimento di rotazione verso l'alto. Nella fase iniziale si trova presso il tubero del deltoide per poi scorrere lungo la spina e portarsi all'acromion (94).

Le fibre del trapezio medio sono pressoché orizzontali quindi molto vicine al centro di rotazione della scapola nella fase iniziale, ma aumentando la rotazione verso l'alto il momento diventa più efficiente.

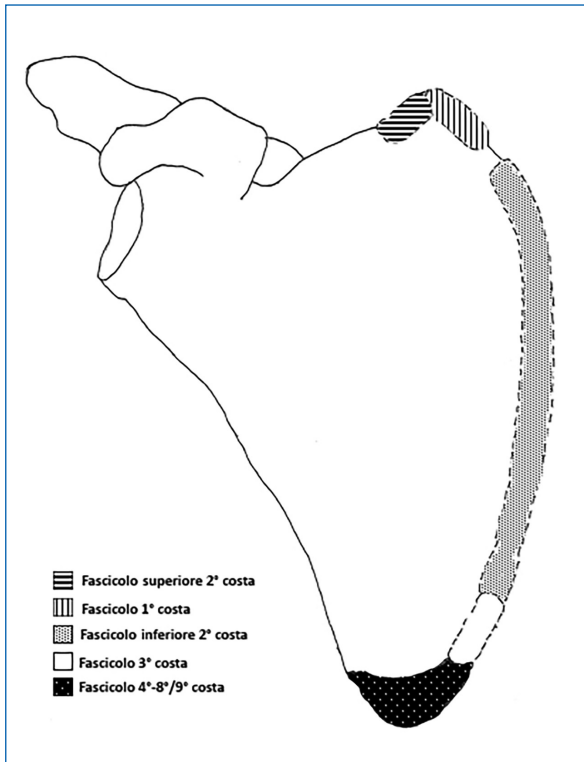
Il trapezio inferiore inserendosi sul tubero del deltoide agisce direttamente sul centro di rotazione nella fase iniziale e anche quando questo si sposta verso l'acromion il braccio di leva non si modifica sostanzialmente. Da questa descrizione è evidente che anche l'idea della coppia di forze creata dal trapezio superiore e inferiore è infondata. Riassumendo il trapezio ha un'azione modesta di rotazione verso l'alto, mentre la sua funzione principale è di controllo del centro di rotazione della scapola, contrastando l'azione di protrazione del dentato anteriore: la sua azione stabilizzante rende efficiente l'azione di rotazione verso l'alto del gran dentato (28,95).

È innervato dal nervo accessorio spinale e riceve fibre dai rami ventrali di C3-C4.

## GRAN DENTATO

È un muscolo piatto che origina sulla faccia laterale del torace dalla 1<sup>a</sup> alla 9<sup>a</sup> costa. Origina con una digitazione per costa ad eccezione della 2<sup>a</sup> costa da cui nascono due digitazioni, per un totale quindi di 10 fasci muscolari. Questi si portano posteriormente e vanno a inserirsi lungo tutto il margine mediale-ventrale della scapola. Più precisamente le prime due digitazioni sull'angolo supero-mediale, la seconda e la terza lungo tutto il margine mediale e dalla 4<sup>a</sup> alla 10<sup>a</sup> sull'apice inferiore (Fig. 1.34). Dalla distribuzione dell'inserzione sulla scapola il gran dentato si può suddividere in una parte superiore, media e inferiore; tale distinzione è evidente sia per l'architettura muscolare sia per l'innervazione che è differente per le tre parti (96,97). La parte superiore lavora insieme all'elevatore della scapola e al trapezio inferiore con il compito di controllare e stabilizzare il centro di rotazione della scapola. La parte media ha un'azione prevalentemente di protrazione della scapola e quindi bilancia l'azione di adduzione del trapezio. La parte inferiore ruota verso l'alto la scapola (98,99); questa parte è la più forte di tutto il muscolo e inoltre ha un braccio di leva molto favorevole (Tab. 1.2).

Il gran dentato è innervato dal nervo toracico lungo.



**Figura 1.34** Inserzione del gran dentato sulla scapola (disegno di Alessia De Franceschi).

**Tabella 1.2** PCSA del gran dentato

Muscolo gran dentato	PCSA cm <sup>2</sup>
G.D. superiore (1 <sup>a</sup> -2 <sup>a</sup> costa)	1,3 (20,3%)
G.D. medio (2 <sup>a</sup> -3 <sup>a</sup> costa)	2,1 (32,8%)
G.D. inferiore (4 <sup>a</sup> -9 <sup>a</sup> costa)	3,0 (46,9%)

## ELEVATORE DELLA SCAPOLA, GRANDE E PICCOLO ROMBOIDE

Questi tre muscoli hanno un decorso molto simile: dalla scapola le fibre vanno verso l'alto e medialmente, ma quelle dell'elevatore della scapola sono maggiormente inclinate. Il grande e piccolo romboide si inseriscono sul bordo mediale della scapola dalla radice della spina fino all'angolo inferiore e a livello della colonna sulle spinose e sul legamento interspinoso da C7 a T5. L'elevatore origina a livello cervicale dal tubercolo posteriore del processo trasverso delle prime 4 vertebre cervicali e si inserisce sull'angolo supero-mediale della scapola fino alla radice della spina: la sua azione a questo livello è una rotazione ipsilaterale. Quindi questi tre muscoli hanno la stessa azione a livello della scapola: elevazione, adduzione e rotazione verso il basso.

L'innervazione dell'elevatore della scapola è data dai nervi spinali C3-C5 e dal nervo scapolare dorsale. I romboidi sono innervati dal nervo scapolare dorsale.

## PICCOLO PETTORALE

Origina sulla faccia anteriore del torace dalla 2<sup>a</sup> alla 5<sup>a</sup> costa e dalla fascia che ricopre i muscoli intercostali, dirigendosi verso l'alto e lateralmente per inserirsi sulla coracoide. La sua azione sulla scapola è di rotazione verso il basso, rotazione interna, protrazione e tilt anteriore. Il suo accorciamento è considerato essere uno dei potenziali meccanismi di alterazione del movimento scapolare, e quindi una causa della spalla dolorosa. Nonostante le numerose ricerche sull'argomento la questione rimane ancora controversa (100).

È innervato dal nervo pettorale mediale.

## Muscoli assio-omerale

### GRAN PETTORALE

È formato dalla parte clavicolare e dalla parte sternale. Origina dal margine anteriore della clavicola, dallo sterno, dalla cartilagine, dalle prime 6-7 coste e dall'aponevrosi degli addominali. Si inserisce sul bordo laterale della doccia bicipitale. È un rotatore interno, flessore e adduttore.

È innervato dal nervo pettorale mediale e laterale.

### GRAN DORSALE

È un muscolo piatto molto ampio. Origina sui processi spinosi delle ultime 6 vertebre toraciche e attraverso la fascia toraco-lombare, sulla colonna lombare, sacrale, sulla cresta iliaca e sulle ultime 3 coste. L'inserzione avviene sul fondo del solco bicipitale. È un estensore, intrarotatore e adduttore.

È innervato dal nervo toraco-dorsale.

### CORACOBRACHIALE

Origina con un tendine comune al capo breve del bicipite e si inserisce sulla faccia antero-mediale a metà della metafisi omerale. È un flessore e adduttore.

È innervato dal nervo muscolocutaneo.

## Muscoli scapolo-omerale

### DELTOIDE

È il muscolo più grande del cingolo scapolare ed è formato da tre componenti: l'anteriore, il medio e il posteriore. I fasci anteriori originano dal terzo laterale della

clavicola e dal margine anteriore dell'acromion, i fasci mediali dal margine laterale dell'acromion e i fasci posteriori dalla spina della scapola. L'inserzione all'omero è sul tubercolo deltoideo. Queste tre sezioni sono diverse dal punto di vista strutturale e funzionale. Le parti anteriore e posteriore hanno fibre muscolari lunghe e parallele, mentre la parte media multipennata ha fibre più corte e quindi è più forte e ha minore escursione.

Il deltoide anteriore è il principale flessore della gleno-omeroale, secondariamente è abductore e intrarotatore. Il deltoide medio è un abductore e partecipa a tutti i movimenti della spalla. La parte posteriore ha un momento estensorio ed extrarotatorio. Il momento adduttore/abductore cambia a seconda della posizione dell'omero: sotto i 120° è adduttore, sopra invece abductore (101).

È innervato dal nervo circonflesso.

## SOVRASPINATO

Il sovraspinato è un muscolo fusiforme formato da due parti: l'anteriore, caratterizzata da un'architettura bipennata con un tendine intramuscolare che si continua con la parte anteriore del tendine del sovraspinato, e la posteriore, più piccola, monopennata, con fibre quasi parallele che confluiscono solo nel finale con la parte posteriore del tendine. Il tendine si inserisce sull'apice del trochite. La PCSA della parte anteriore è 2,5 volte più grande della posteriore. Il tendine nella parte anteriore è più spesso mentre nella parte posteriore è più sottile, nastriforme, ma molto più largo, tanto che la PCSA del tendine posteriore è più grande della parte anteriore. Se mettiamo insieme i dati della PCSA muscolare con quella tendinea abbiamo un maggiore stress meccanico alla componente tendinea anteriore (102,103). Il tendine inoltre non è solo sollecitato lungo il suo asse come avviene normalmente ma seguendo la mobilità della testa dell'omero è soggetto a forze di scivolamento e di compressione (104-106). Il sovraspinato è un abductore e la componente rotatoria dipende dalla posizione dell'omero poiché il suo vettore passa vicino all'asse di rotazione della testa omerale. Howell et al. hanno cercato di calcolare il contributo del sovraspinato rispetto al deltoide nell'abduzione sul piano scapolare attraverso il blocco del nervo sovrascapolare e hanno calcolato che esso contribuisce al 50% della forza misurata con dinamometro isocinetico (107). Phillips et al. utilizzando sempre il blocco del nervo sovrascapolare hanno invece misurato la forza isometrica a 30°, 60°, 90° di abduzione sul piano scapolare e hanno calcolato che il contributo del sovraspinato oscilla fra il 32% e il 48% indipendentemente dal grado di abduzione (108). È da considerare che con il blocco del nervo sovrascapolare si elimina l'attività del sotto-

spinato che ha una componente abductoria. Gerber et al., sempre con il blocco del nervo sovrascapolare ma eseguito sia a livello dell'incisura della scapola (paralisi del sovra e sottospinato) sia a livello della spina glenoidea (paralisi selettiva del sottospinato), hanno riscontrato una perdita del 75% della forza abductoria nel primo caso e una perdita del 45% nel secondo caso concludendo quindi che il contributo del sovraspinato all'abduzione è del 30% (109).

Dewitte et al. hanno dimostrato che l'azione del sovraspinato è variabile fra gli individui e che il deltoide ha un'azione complementare che aumenta al diminuire dell'attivazione del sovraspinato (110).

Il sovraspinato è innervato dal nervo sovrascapolare.

## SOTTOSPINATO

Il sottospinato è un muscolo pennato formato da tre gruppi di fasci muscolari, superiore, medio e inferiore, convergenti in un tendine che si inserisce sul trochite. La sua azione principale è la rotazione esterna dell'omero; i fasci superiori hanno una componente abductoria. Gli studi effettuati con blocco selettivo del nervo sovrascapolare a livello della spina glenoidea hanno dimostrato una perdita di extrarotazione del 70% indipendentemente dal grado di abduzione e una perdita di forza di abduzione del 25-45% (109,111). La componente abductoria è complementare al sottoscapolare, infatti se l'omero è in intrarotazione viene favorita la sua componente abductoria, mentre se è in extrarotazione aumenta la componente abductoria del sottoscapolare (111). Questo interessante meccanismo permette a questi muscoli di compensare, indipendentemente dalla posizione dell'omero, la lesione del tendine del sovraspinato. Insieme al sottoscapolare è un depressore della testa omerale (Fig. 1.35).

Il muscolo è innervato dal nervo sovrascapolare.

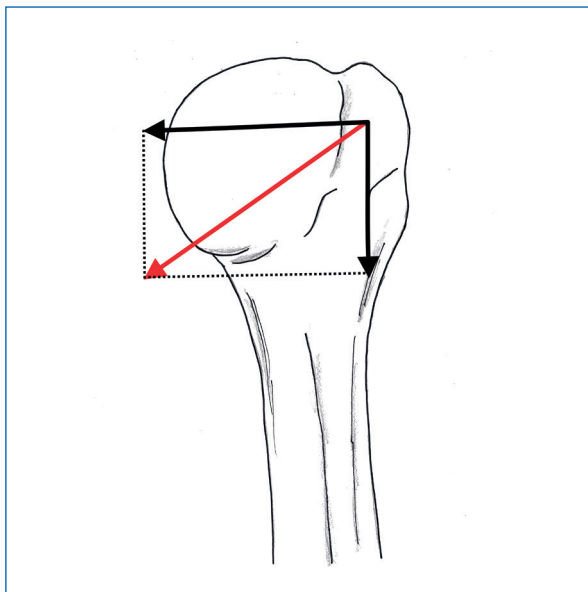
## PICCOLO ROTONDO

È un piccolo muscolo fusiforme con fibre parallele. Origina sul margine laterale della scapola nella sua metà superiore. Il tendine si inserisce sulla faccetta inferiore del trochite. Le sue azioni principali sono la rotazione esterna e l'adduzione.

È innervato dal nervo circonflesso.

## SOTTOSCAPOLARE

È un muscolo multipennato ed è il più forte della cuffia dei rotatori. Origina dalla faccia anteriore della scapola: nei due terzi superiori il muscolo contiene alcuni fasci tendinei che si uniscono lateralmente



**Figura 1.35** Componente depressoria della testa omerale della coppia sottoscapolare-sottopinato (disegno di Alessia De Franceschi).

formando un tendine piatto che si inserisce sul trochine; il terzo inferiore del muscolo invece si inserisce direttamente sul trochine senza l'interposizione di un tendine. Funzionalmente il sottoscapolare è suddiviso in una parte superiore e una inferiore con innervazione separata. Queste due componenti sono entrambe intrarotatorie: la componente superiore ha un'azione abduttoria e l'inferiore di depressione della testa omerale (112-114).

È innervato dal nervo sottoscapolare.

## LA STABILITÀ DELL'ARTICOLAZIONE GLENO-OMERALE

La stabilità dell'articolazione gleno-omeroale è garantita da elementi statici e dinamici che lavorano insieme per garantire lo scopo.

Nei fattori statici annoveriamo la pressione negativa, il labbro glenoideo e il complesso capsulo-legamentoso. Fra i fattori dinamici abbiamo i muscoli: il gruppo della cuffia dei rotatori sono gli stabilizzatori dinamici primari, mentre il capo lungo del bicipite e il deltoide sono gli stabilizzatori dinamici secondari.

La pressione negativa è un fattore passivo che interviene solo quando non abbiamo attività muscolare attorno all'articolazione gleno-omeroale. In stazione eretta il peso dell'arto superiore tira la testa omerale verso il basso: ciò determina una diminuzione della pressione intra-articolare che si oppone alla decoap-

tazione articolare. Questa componente della stabilità gleno-omeroale interviene solo a riposo. Essa viene meno quando il complesso capsulo-legamentoso non riesce a mantenere la pressione negativa, per esempio per una sua lesione come avviene nella Bankart, nella SLAP di tipo II, nella lesione a tutto spessore della cuffia, oppure per una sua eccessiva lassità legamentosa. La pressione negativa scompare appena abbiamo un movimento dell'arto superiore, poiché l'attività della cuffia dei rotatori comprime la testa omerale contro la glena (115).

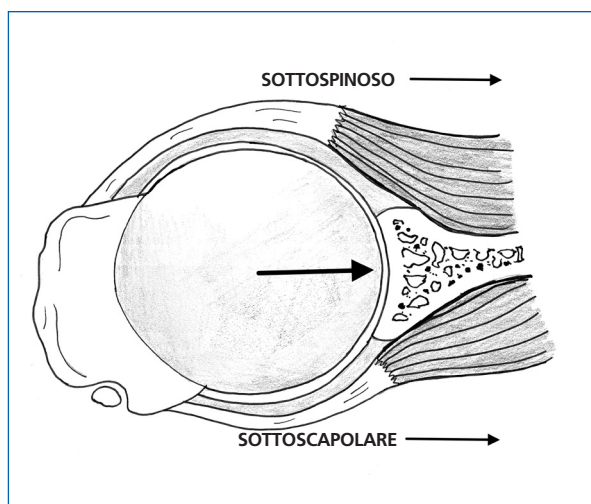
Il labbro glenoideo è importante come fattore di stabilità passiva poiché aumenta la superficie di contatto con la testa omerale e soprattutto aumenta la profondità della glena del 50% sia in direzione antero-posteriore sia cranio-caudale (116). Insieme alla cuffia dei rotatori partecipa al meccanismo della *concavity-compression* che è importante per la stabilità dell'articolazione nel *mid-range*.

Il complesso capsulo-legamentoso essendo molto lasso interviene nella stabilità articolare solo nel fine corsa dei movimenti. Gohlke et al. (117) ci avvertono che i legamenti, sebbene indichino le zone di maggior carico meccanico della capsula e quindi i movimenti che maggiormente la sollecitano, cioè l'abduzione, l'extrarotazione e la traslazione verso il basso (118,119), non vanno interpretati in modo isolato. Piuttosto bisogna considerare la capsula nel suo insieme, cioè un cilindro formato da fibre radiali, piuttosto angolate per permettere un movimento ampio, che si intersecano e si collegano con fibre circolari che solo in minima parte si inseriscono sui capi articolari. Durante un movimento di rotazione le fibre radiali messe in tensione, oltre a limitare il movimento stesso, mettono in tensione anche le fibre circolari creando una forza di compressione dei capi articolari, impedendo le traslazioni eccessive. Inoltre il collegamento fra le fibre permette la distribuzione delle sollecitazioni meccaniche su tutta la capsula rendendola più resistente ai traumi. Anche Pagnani e Warren (120) intuirono questo fenomeno osservando le lesioni capsulari in seguito a lussazione. Notarono infatti che per una lussazione anteriore si aveva sia una lesione anteriore sia una lesione posteriore, e viceversa per una lussazione posteriore, e coniarono il termine *circle concept* per intendere come la capsula e i suoi legamenti funzionino come un'unica struttura.

Il sistema capsulo-legamentoso insieme al labbro glenoideo non intervengono solo come stabilizzatori passivi dell'articolazione ma, attraverso il sistema nervoso, hanno una funzione regolatrice sull'attività dei muscoli periarticolari. Infatti in una serie di studi si è evidenziato che queste strutture sono innervate oltre che da terminazioni sensitive libere anche da mecca-

nocettori, corpuscoli del Ruffini e del Pacini (91,121-124). La loro presenza è stata dimostrata anche nel legamento coracoacromiale (125). I meccanocettori trasformano la deformazione meccanica del tessuto in segnali nervosi che trasmettono informazioni propriocettive sul movimento e la posizione articolare: in risposta a questi segnali abbiamo un'attività neuromuscolare riflessa dei muscoli periarticolari. Data la latenza lunga di questi riflessi, essi non sembrano però utili a un'attività protettiva immediata dell'articolazione ma piuttosto alla programmazione del movimento (*feed forward control*) (126-130).

La cuffia dei rotatori è la componente principale della stabilizzazione dinamica, e per poter svolgere appieno la sua funzione ha bisogno dell'integrità del labbro glenoideo. Queste due componenti insieme creano il fenomeno della *concavity compression* (131-133) (Fig. 1.36). L'azione della cuffia è quindi quella di comprimere la testa omerale dentro la concavità formata dalla glena e dal labbro. Più è forte l'azione dei muscoli, più è profonda la concavità, maggiore sarà la stabilità articolare. La componente del labbro contribuisce a circa il 20% della stabilità così ottenuta. Per avere questo fenomeno è necessaria l'attivazione di tutta la cuffia dei rotatori. La partecipazione all'a-



**Figura 1.36** Concavity compression (disegno di Alessia De Franceschi).

zione stabilizzante varia fra i singoli muscoli della cuffia e dipende dalla loro forza e dal braccio di leva che esercitano a livello della testa omerale. La forza di un muscolo è direttamente proporzionale all'area della sezione fisiologica (PCSA) (134). È particolarmente difficile confrontare la PCSA fra i vari studi, sia per la differenza dei campioni ma anche per le diverse procedure di analisi, mentre è molto più affidabile calcolare il rapporto di forza espresso in percentuale fra i vari muscoli in un singolo studio. Per quanto riguarda la cuffia dei rotatori in ordine di forza decrescente abbiamo il sottoscapolare, il sottospinato, il sovraspinato e il piccolo rotondo (134-136) (Tab. 1.3). Per quanto riguarda il braccio di leva esercitato dai muscoli della cuffia sulla testa dell'omero, è piuttosto simile: sul piano trasverso il braccio di leva con l'omero in posizione neutra è di 23 mm per il sottospinato, di 20 mm per il piccolo rotondo e di 22 mm per il sottoscapolare; il sovraspinato ha una componente rotatoria scarsa, 3 mm di momento in extrarotazione, ma il braccio di leva sul piano frontale è di 23 mm. Questa componente attiva partecipa anche alla stabilità a fine corsa, associandosi così alla componente capsulo-legamentosa, ma con intensità minore rispetto al *mid-range* (137,138).

Alcuni studi (139-142) hanno messo in discussione il meccanismo della *concavity compression* poiché hanno osservato con l'esame elettromiografico che i muscoli della cuffia non erano attivati a un'intensità simile durante i movimenti della gleno-omeroale, come ci si dovrebbe aspettare, ma erano attivati in direzione specifica. Durante la flessione veniva attivata in maniera preponderante la cuffia posteriore, sopra e sottospinato, probabilmente in modo da contrastare la traslazione anteriore della testa omerale provocata dai flessori, mentre durante l'estensione era maggiormente attivo il sottoscapolare. Questa differenza la si è notata anche nelle rotazioni: nella rotazione esterna c'è una predominanza del sottospinato e nella rotazione interna del sottoscapolare. Probabilmente la strategia di stabilizzazione attiva adottata dal sistema nervoso sarà modulabile rispetto a quanto il movimento intrapreso impegni la stabilità articolare. Tale azione varierà a seconda della direzione del movimento, del

**Tabella 1.3** PCSA dei muscoli della cuffia dei rotatori

Muscoli della cuffia dei rotatori	PCSA cm <sup>2</sup> (134)	PCSA cm <sup>2</sup> (135)	PCSA cm <sup>2</sup> (136)	PCSA cm <sup>2</sup> (143)
Sottoscapolare	52%	43%	43%	47%
Sottospinato	23%	30%	31%	35%
Sovraspinato	15%	18%	17%	11%
Piccolo rotondo	9%	7%	9%	10%

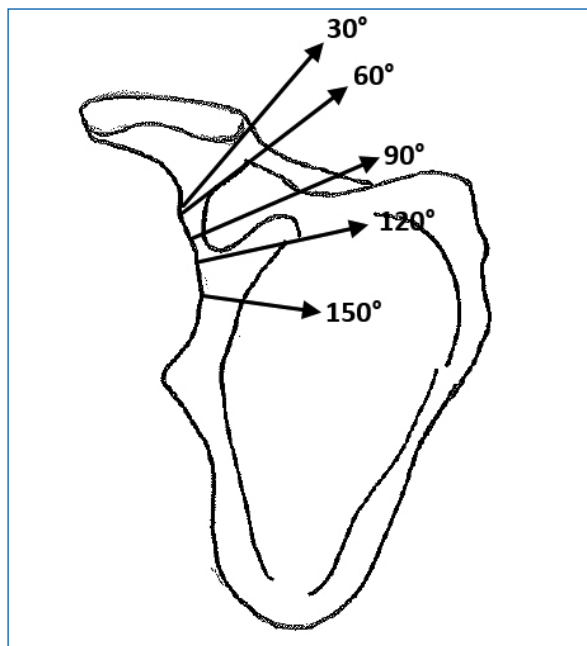
grado articolare, del carico e della velocità, passando in un *continuum* da una attivazione direzione specifica senza il controllo dell'antagonista ma con una stabilità sufficientemente garantita dalla tensione passiva della muscolatura antagonista (o da una sua moderata attivazione) e dalla messa in tensione delle strutture capsulo-legamentose, fino ad arrivare alla co-contrazione della *concavity compression* nei movimenti particolarmente impegnativi come per esempio nel lancio.

Il capo lungo del bicipite è considerato uno stabilizzatore secondario data la sua anatomia che lo rende solidale alla testa dell'omero. Ma sempre dal punto di vista anatomico la sua architettura ci dice l'opposto. Infatti è un muscolo tri-articolare, a fibre lunghe e parallele, quindi un muscolo che non controlla una singola articolazione, sviluppa relativamente poca forza ed è adatto a movimenti ampi e veloci del gomito (143). Le evidenze sulla sua capacità di stabilizzazione derivano quasi esclusivamente dagli studi effettuati su cadavere (144-152). Dagli studi elettromiografici emerge che la sua azione dipende soprattutto dal movimento del gomito e in misura minore dalla spalla e che il momento esercitato su di essa è trascurabile (153,154). Un recente studio effettuato *in vivo* con esame fluoroscopico bidimensionale ha evidenziato che le spalle con tenodesi del tendine del capo lungo del bicipite presentano solo una traslazione di piccola entità e di dubbio valore clinico rispetto a quelle normali, ridimensionando quindi la funzione stabilizzante di questa struttura (155).

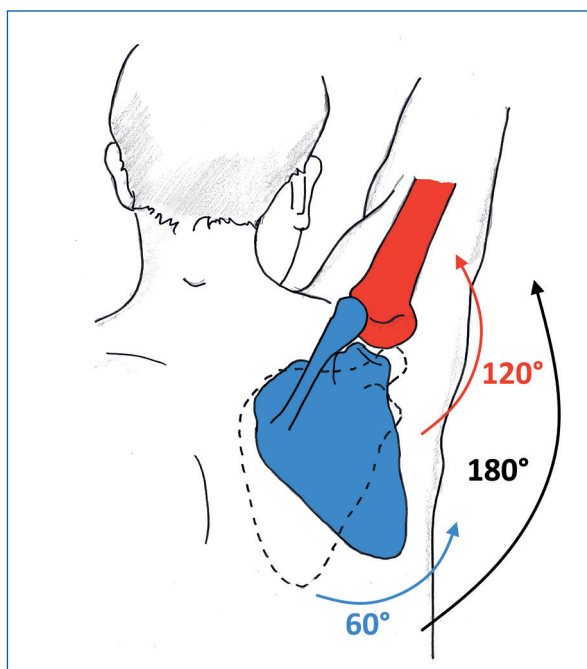
Il deltoide è un ottimo stabilizzatore dinamico secondario per la grande forza che riesce a esercitare nel movimento di abduzione sul piano scapolare fra i 60° e i 150° (156) (Fig. 1.37).

## RITMO SCAPOLO-OMERALE

Con questa felice definizione Codman (157) descriveva l'armonico e regolare movimento che avviene durante un movimento di elevazione dell'arto superiore fra la scapola e il torace e fra l'omero e la scapola. I piani di movimento studiati sono la flessione sul piano sagittale, l'abduzione sul piano frontale e l'abduzione sul piano scapolare, inclinato anteriormente al piano frontale di circa 30°-40°. Il primo autore che tentò di misurare il rapporto di movimento fra queste due strutture fu Inman (50), il quale individuò il rapporto di 1 a 2, cioè a ogni grado di rotazione verso l'alto della scapola corrispondeva un movimento di 2° dell'omero. Quindi a un'elevazione completa di 180°, 120° sono ascrivibili al movimento fra omero e scapola e 60° a quello fra scapola e torace (Fig. 1.38). Questo rapporto non era regolare per tutta l'escursione articolare poiché nei primi 30° di movimento, definito



**Figura 1.37** Linee d'azione del deltoide rispetto alla glenoide durante un'abduzione sul piano scapolare (disegno di Alessia De Franceschi).



**Figura 1.38** Ritmo scapolo-omeroale (disegno di Alessia De Franceschi).

*setting phase*, il movimento era prevalentemente attribuito alla gleno-omeroale. Il ritmo scapolo-omeroale ha dato origine a un filone di ricerca piuttosto cospicuo che via via ha usato sistemi di misurazione sempre più

avanzati. Nonostante questo, i risultati ottenuti, anche se si discostano in alcuni punti dal lavoro seminale di Inman, non hanno apportato sostanziali modificazioni (48,134-143,158-167) se non nell'introduzione del concetto che per la completa elevazione dell'arto superiore, oltre che alla rotazione verso l'alto della scapola e al movimento di flessione/abduzione dell'omero, partecipa anche il tilt posteriore della scapola. Si rimanda il lettore al lavoro di McClure et al. (164) per vedere la comparazione fra le misurazioni articolari dei vari studi e i motivi che ne spiegano la loro variabilità.

Durante il movimento dell'arto superiore la scapola inizia a ruotare verso l'alto mossa principalmente dai muscoli trapezio e gran dentato, e il suo movimento non può essere disgiunto dal movimento della clavicola. La clavicola durante l'elevazione dell'arto superiore si eleva e si retropone. Durante la rotazione verso l'alto della scapola la coracoide si abbassa e mette in tensione i legamenti conoide e trapezoide: questi tirano verso il basso la clavicola la quale, avendo la forma a manovella, provoca un movimento di rotazione posteriore; a controprova di ciò, non ci sono muscoli inseriti sulla clavicola che possano generare questo movimento. La rotazione posteriore della clavicola permette una ulteriore rotazione verso l'alto della scapola. Oltre alla rota-

zione verso l'alto, la scapola effettua anche un tilt posteriore: questo movimento, che si aggira sui 15°-20°, è più pronunciato nei movimenti di flessione rispetto all'abduzione. Infine abbiamo anche un movimento di rotazione esterna della scapola di piccola entità e piuttosto variabile. Quindi il corretto posizionamento della scapola rispetto all'omero deriva dal movimento dell'articolazione sternoclaveare e dall'acromionclaveare. Nella Figura 1.39 possiamo vedere l'apporto del movimento scapolare al movimento dell'arto superiore: il soggetto ha un'artrosi gleno-omeroale in esito di frattura. A livello omerale il movimento di elevazione si accompagna fino ai 90° anche con una rotazione esterna, la quale permette al trochite di non confliggere sotto l'acromion (160,168,169). Il principale motore dell'omero è il deltoide affiancato da tutti i muscoli della cuffia. L'attività muscolare della cuffia non differisce sostanzialmente se l'elevazione avviene sul piano coronale, scapolare o sagittale (170-176).

Durante il movimento di elevazione dell'arto superiore abbiamo anche un movimento associato della colonna toracica (162). Questi movimenti hanno il compito sia di aumentare l'escursione dell'arto superiore (162), sia di conservare l'equilibrio durante il movimento (177). Anche il rachide cervicale (178,179) partecipa al movimento dell'arto superiore con un



**Figura 1.39** Movimento di flessione (A) e abduzione (B) in soggetto con artrosi gleno-omeroale.

movimento del capo in flessione, lateroflessione omolaterale e rotazione opposta. Tale movimento può essere dovuto sia a un'azione diretta dei muscoli assio-scapolari come il trapezio e l'elevatore della scapola, sia a un compenso al movimento della colonna toracica.

Negli studi sul ritmo scapolo-omeroale una zona particolarmente esaminata è stata lo spazio sub-acromiale poiché una sua riduzione è ritenuta essere una possibile causa della sindrome da *impingement* e della lesione a tutto spessore della cuffia dei rotatori (180). Giphart et al. (181) hanno misurato la distanza fra l'acromion e la testa omerale durante il movimento di elevazione sul piano scapolare e sagittale. Innanzitutto, hanno osservato che questo parametro varia dal piano di movimento utilizzato e dai gradi del movimento stesso. La distanza minima va dall'acromion alla superficie articolare della testa omerale nei primi  $34^\circ$  per la flessione e  $36^\circ$  per l'abduzione, poi al trochite fino ai  $65^\circ$  e  $72^\circ$  e infine alla metafisi prossimale (Fig. 1.40). La distanza minima sul piano scapolare era di 26 mm a  $83^\circ$  di elevazione e di 18 mm sul piano sagittale a  $97^\circ$  ed era la distanza fra l'acromion e la metafisi omerale prossimale. La distanza minima fra l'acromion e l'inserzione del sovraspinato era fra i  $36^\circ$  e i  $72^\circ$  per l'elevazione sul piano scapolare e  $36^\circ$  e  $65^\circ$  per la flessione. Anche Lawrence et al. hanno riscontrato che la distanza minima fra la cuffia e l'acromion avviene molto prima dei  $90^\circ$  di elevazione (182). I risultati di questo studio sorprendono perché dimostrano che i test che normalmente usiamo per la sindrome da *impingement*, che hanno lo scopo di comprimere la cuffia dei rotatori contro l'acromion e il legamento coracoacromiale, vengono effettuati a  $90^\circ$  di abduzione/flessione (test di Hawkins, Yocum)

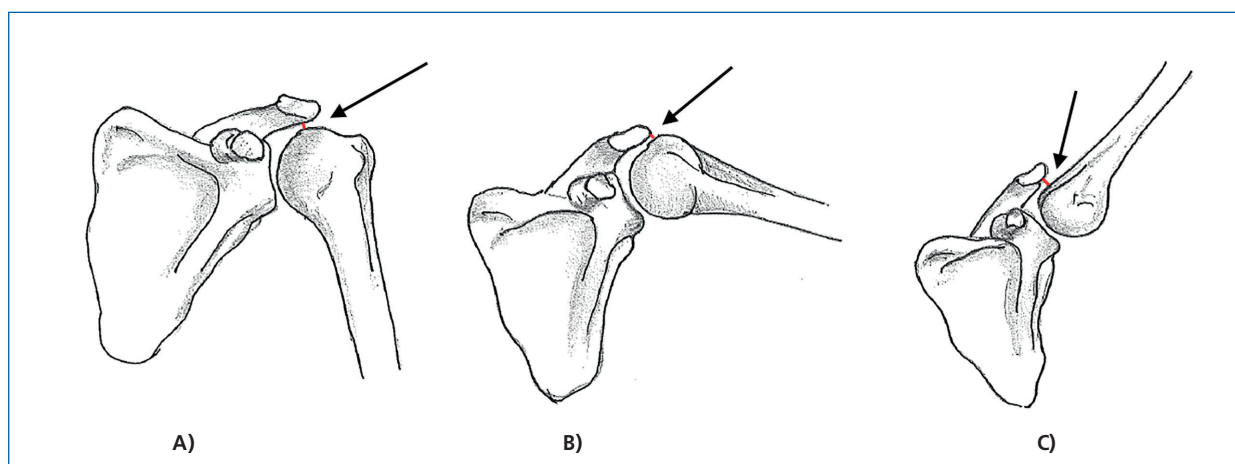
o oltre (segno di Neer), ma dal punto di vista biomeccanico non sono posizioni in cui c'è la minima distanza fra il sovraspinato e il tetto acromiale.

## IL CENTRO DI ROTAZIONE ISTANTANEO DELLA TESTA OMERALE

Il centro di rotazione di un'articolazione è un elemento importante per comprendere l'azione muscolare che agisce su di essa, attraverso il calcolo del momento di forza (138).

I movimenti planari di un'articolazione sono tre (183).

- Lo scivolamento (*sliding*): è un movimento di traslazione di una superficie su un'altra superficie fissa. Il punto di contatto della superficie in movimento non cambia mentre cambiano continuamente i punti di contatto sulla superficie fissa. Se la superficie fissa è curva, il centro di rotazione sarà al centro della sua curvatura.
- La rotazione (*spinning*): in questo caso abbiamo due tipi di movimento. Uno che avviene attorno a un asse perpendicolare al piano; in questo caso useremo il termine *spinning*, dove abbiamo un unico punto di contatto sia nella superficie fissa sia nella superficie mobile. Nella seconda accezione abbiamo la rotazione su un asse parallelo alla superficie, e avremo un punto fisso di contatto sulla superficie fissa mentre i punti di contatto della superficie in rotazione cambiano continuamente; definiremo questo movimento come rotazione. Il centro di spinning/rotazione si trova all'interno del corpo che ruota.



**Figura 1.40** Distanza minima (tratto rosso) fra l'acromion e l'omero durante un movimento di flessione e abduzione sul piano scapolare. A circa  $34^\circ$  abbiamo la distanza minima fra acromion e superficie articolare della testa omerale (A). Quindi la distanza minima si troverà sulla sede di inserzione della cuffia (B). Infine dopo i  $72^\circ$  la distanza minima è con la metafisi prossimale dell'omero (C) (disegno di Alessia De Franceschi).

- Il rotolamento (*rolling*): questo movimento è caratterizzato dal continuo cambio di contatto dei punti sia della superficie fissa sia di quella in movimento. Il centro di rotazione si trova nel punto di contatto delle due superfici. Al contrario di tutti gli altri movimenti, dove l'attrito tende a ridurli, il rotolamento ha bisogno di esso: senza attrito non abbiamo rotolamento. Nelle grandi articolazioni del corpo umano il coefficiente d'attrito è estremamente ridotto arrivando a  $\mu = 0,001$ : nessun manufatto umano riesce a ottenere un attrito così ridotto (184). Il rotolamento compare durante l'abduzione sul piano scapolare fra i  $60^\circ$  e i  $90^\circ$  (185), probabilmente perché è massima la compressione esercitata dalla muscolatura. Quando abbiamo un aumento dell'attrito fra le superfici articolari dovuto a una perdita della capacità lubrificante del liquido sinoviale e a un frastagliamento delle superfici articolari come avviene nell'artrosi, allora il rotolamento diventa importante e questo porta a un'alterazione del movimento. Nel caso della gleno-omeroale, essendo la lunghezza della superficie articolare della testa omerale molto maggiore della lunghezza della glena, il rotolamento porterà più velocemente al fine corsa articolare. Questo fenomeno può contribuire insieme ad altri alla perdita di articularità che si osserva nell'artrosi.

Affinché la testa omerale si comporti da enartrosi, avendo questa un centro di rotazione fisso al suo centro, essa dovrebbe solo ruotare.

Il centro di rotazione della testa omerale negli studi iniziali è stato individuato nel centro geometrico della testa omerale, poiché la sua forma si avvicina molto a quella di una sfera (186). Poppen e Walker nel 1976 (65), attraverso delle radiografie effettuate ogni  $30^\circ$  di movimento in abduzione sul piano scapolare su un gruppo di soggetti asintomatici, hanno individuato che il centro di rotazione istantaneo della gleno-omeroale si trovava, seppur con qualche piccola variazione, in

un'area ristretta attorno al centro di rotazione geometrico. Da questo risultato si poteva considerare che la gleno-omeroale si comportasse come una vera enartrosi con un centro di rotazione fisso, simile alla coxo-femorale (187,188).

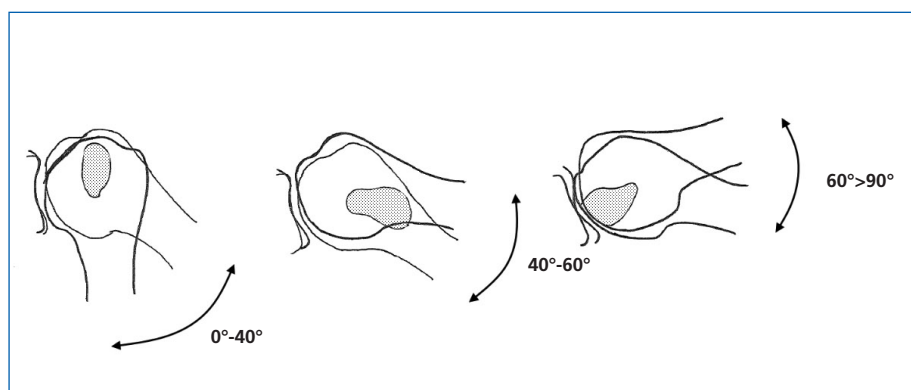
In studi più recenti si è osservato che la testa omerale durante il movimento di abduzione sul piano scapolare presenta delle traslazioni in senso cranio-caudale, antero-posteriore e medio-laterale.

Nella fase iniziale del movimento la testa trasla superiormente, mentre nella fase finale inferiormente, per un'escursione di 2,5 mm. Nella fase iniziale trasla anteriormente e nella fase finale posteriormente per un'ampiezza di 6 mm e infine la testa si sposta medialmente rispetto alla posizione di riposo di 1,6 mm (169,185,189). Naturalmente se la testa omerale si sposta durante i movimenti significa che non esegue solo movimenti di rotazione/*spinning* (dove il centro di rotazione rimane fisso) ma anche movimenti di traslazione/rotolamento, quindi il suo centro di rotazione si sposta. Il lavoro di Blaimont (185) ha dimostrato come il centro di rotazione si sposta in modo marcato all'interno della testa omerale a seconda della posizione raggiunta durante un'abduzione sul piano scapolare. Nella prima parte fra  $0^\circ$  e  $40^\circ$  il centro di rotazione si trova in un'area centrale, fra i  $40^\circ$  e  $60^\circ$  si sposta verso il basso vicino al collo dell'omero, come nel lavoro di De Duca e Forrest (190), per poi risalire dai  $60^\circ$  ai  $90^\circ$  (Fig. 1.41).

Anche il movimento di rotazione interna/esterna con il braccio in abduzione sul piano scapolare che può essere definito come uno *spinning* presenta delle traslazioni ampie e molto variabili fra i soggetti (191).

Il centro di rotazione può essere influenzato negativamente da numerosi fattori: la fatica muscolare (192,193), la lesione della cuffia a tutto spessore (194,195), il blocco del nervo sovrascapolare (196), la lesione dell'apparato capsulo-legamentoso (65,197), la spalla dolorosa aspecifica (194).

La localizzazione del centro di rotazione nel vivente è particolarmente complessa: la diversità dei risultati



**Figura 1.41** Spostamento del centro di rotazione (area grigia) della testa omerale a seconda del grado (scapolo-omeroale) di abduzione (disegno di Alessia De Franceschi).

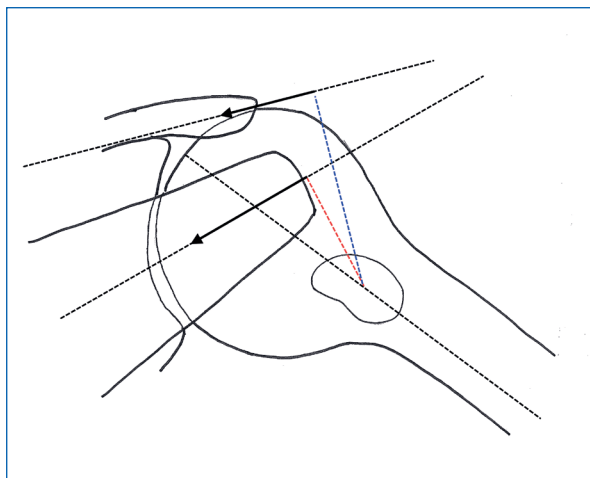
non solo proviene dai diversi strumenti di indagine, ma anche dai diversi metodi di calcolo (198).

Se questi dati sono di importanza cruciale per la progettazione e l'impianto di una protesi di spalla, per il clinico suggeriscono che il centro di rotazione abbia un comportamento così complesso da rendere la regola concavo-convessa, per la quale la gleno-omeroale dovrebbe scivolare in direzione opposta al rotolamento, una spiegazione parziale e semplificata. Inoltre il modello di Blaimont (185) valorizza la componente abduztrice del sovraspinato, ma soprattutto del sottospinato e del sottoscapolare. Infatti fra i 40° e i 60° di abduzione il centro di rotazione si abbassa aumentando considerevolmente il momento abduztrice di questi muscoli che possono così vicariare efficacemente in caso di rottura del sovraspinato (Fig. 1.42).

## IL LANCIO

Il movimento del lancio nella società moderna è limitato agli sport come il baseball, il giavellotto, il football, il rugby e alle attività ludiche dei bambini. È interessante notare in quest'ultimo caso come quest'attività motoria non necessiti di essere insegnata: emerge infatti spontaneamente e inizia prima ancora che il bambino raggiunga la stazione eretta (199). È quindi probabile che tale abilità sia codificata geneticamente e che le sue origini siano da ascrivere al processo evolutivo.

Già Darwin nel 1871 intuì che la capacità di lancio ottenuta dopo l'acquisizione della locomozione bipede poteva avere un forte beneficio selettivo. Pure i primati hanno questa abilità anche se molto rozza, con scarsa potenza e precisione.



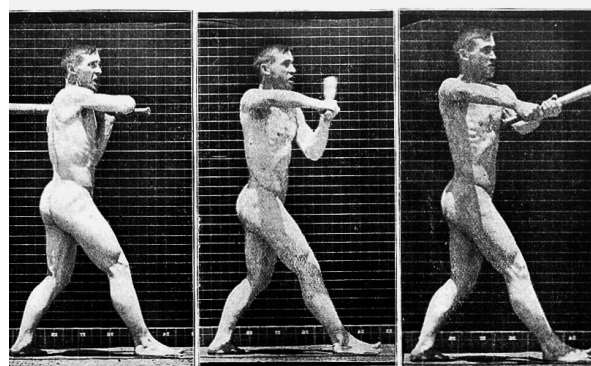
**Figura 1.42** Lo spostamento verso il basso del centro di rotazione durante l'abduzione fra i 40° e i 60° comporta un aumento del braccio di leva abduztrice del sottospinato-sottoscapolare (in rosso) e del sovraspinato (in blu) (disegno di Alessia De Franceschi).

Recentemente quest'attività motoria è diventata oggetto di ricerca dei biologi evuzionisti (200-202): probabilmente prima di acquisire l'abilità del lancio gli ominidi impararono a colpire l'avversario con un bastone (*club swing* o *striking*) (Fig. 1.43); quest'attività dal punto di vista biomeccanico è simile al lancio. Anche quest'ultimo movimento lo ritroviamo in alcuni sport come il baseball, il cricket, il tennis. Il vantaggio evolutivo di queste capacità motorie è evidente: l'ominide privo di mezzi di offesa/difesa naturali poteva attaccare o difendersi meglio negli scontri fra rivali della propria specie, difendersi dai predatori e cacciare in modo più sicuro ed efficiente, ampliando così le proprie risorse energetiche e aumentando la propria capacità di sopravvivenza e riproduzione.

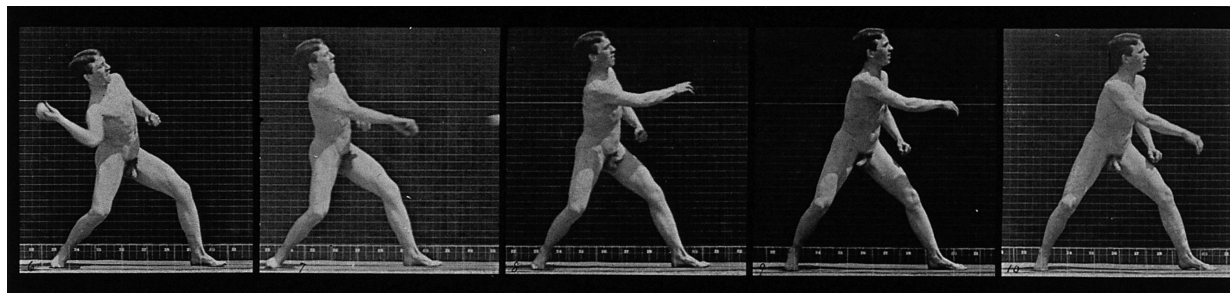
Il lancio è un movimento caratterizzato da un'attivazione rapida, sequenziale e coordinata di numerosi muscoli che inizia dai piedi e progredisce attraverso le anche, il tronco, la spalla, il gomito fino alla mano. È come un colpo di frusta: il momento generato in ogni articolazione accelera il segmento corporeo ad essa collegato creando movimenti angolari veloci che accumulano energia cinetica a ogni passaggio dell'anello della catena cinetica fino all'oggetto che viene lanciato (Fig. 1.44).

Il movimento del lancio viene suddiviso in varie fasi i cui nomi dipendono sia dagli autori sia dallo sport analizzato e allo scopo rimandiamo il lettore al lavoro fondamentale di Fleisig (203).

Al nostro scopo possiamo sintetizzare il lancio in tre fasi: la fase di carico dove si immagazzina l'energia cinetica che termina quando il braccio raggiunge la massima extrarotazione; la fase di accelerazione che finisce con il lancio dell'oggetto e infine la fase di decelerazione dove l'energia cinetica deve essere dissipata. I due momenti critici per la spalla per le elevate sollecitazioni meccaniche messe in gioco sono la fase terminale del carico e la fase iniziale della decelerazione.



**Figura 1.43** Uomo con mazza da baseball. Foto di Eadweard Muybridge.



**Figura 1.44** Uomo che lancia una palla. Foto di Eadweard Muybridge.

L'intrarotazione della spalla è l'elemento della catena cinetica che maggiormente partecipa alla velocità di lancio dell'oggetto. Questo movimento è il più veloce che il corpo umano possa produrre, circa  $7000^\circ/\text{sec}$ . e dura pochi millisecondi. Calcolando la potenza massima che i muscoli intrarotatori possono esercitare, si è visto che essi possono partecipare al massimo con il 50% della potenza di rotazione della spalla. Inoltre il picco del momento di intrarotazione avviene prima che l'omero inizi la rotazione interna (204-207). Il fenomeno della potenza mancante può essere spiegato attraverso l'accumulo di energia elastica durante la fase di carico, la quale inizia quando il lanciatore porta in avanti il piede controlaterale; quando questo tocca il suolo, l'omero si trova già in abduzione, estensione orizzontale ed extrarotato e con il gomito flesso a  $90^\circ$ . Quindi abbiamo una potente rotazione del tronco in avanti e un'attivazione del gran pettorale che effettua una flessione orizzontale. Con l'arto superiore nella posizione appena descritta il movimento del tronco associato all'azione del gran pettorale aumenta il momento d'inerzia sull'asse lungo dell'omero grazie al gomito flesso. Il ritardo di movimento dell'avambraccio e della mano rispetto al movimento del tronco aumenta ulteriormente la rotazione esterna dell'omero caricando di energia elastica le strutture periarticolari. Quando il bicipite si rilascia il gomito inizia l'estensione, il momento di inerzia è ridotto e l'energia elastica accumulata viene rilasciata aumentando così la potenza dei rotatori interni della spalla.

Nella fase di decelerazione l'arto superiore è soggetto a una forza di trazione pari al peso del lanciatore oltre che a forze di traslazione antero-superiori e antero-posteriori; a queste forze si deve opporre una massiccia e coordinata azione muscolare dei muscoli gleno-omerali, in particolare quelli della cuffia, e dei muscoli periscapolari per evitare possibili danni alle strutture della spalla.

Se osserviamo la spalla dal punto di vista evolutivo e consideriamo la sua anatomia e biomeccanica alla luce della sua specializzazione per il movimento del lancio, allora possiamo capire meglio certe

sue caratteristiche anatomiche che altrimenti rimarrebbero controverse.

Innanzitutto il luogo dove avviene l'accumulo di energia elastica è nell'articolazione gleno-omeroale poiché la scapolo-toracica si muove poco durante la fase di accelerazione (208,209). Durante la fase iniziale del caricamento abbiamo la messa in tensione del legamento gleno-omeroale inferiore, del legamento gleno-omeroale medio e del legamento coraco-omeroale i quali verranno ulteriormente stirati nella fase terminale della fase di caricamento, dove si raggiunge la massima extrarotazione grazie al movimento inerziale (210,211). La funzione di accumulo di energia cinetica su queste strutture spiegherebbe meglio le loro caratteristiche anatomiche.

Il tendine del capo lungo del bicipite, la cui funzione è ancora dibattuta (212,213) tanto da essere stato considerato un residuo dell'evoluzione con l'appellativo di "appendice della spalla", insieme alla porzione superiore del labbro dove si ancora, potrebbe essere un'altra sede di accumulo dell'energia elastica: questo spiegherebbe come mai sia così diffusa la lesione SLAP di tipo II negli atleti lanciatori (214,215). Infine il muscolo sottoscapolare raggiunge la sua massima attività elettromiografica nella fase di caricamento (216,217), probabilmente per controllare l'extrarotazione, per stabilizzare l'articolazione, ma anche per immagazzinare energia elastica a livello del suo tendine che è particolarmente sviluppato rispetto agli altri tendini della cuffia. Anche gli altri rotatori interni partecipano all'accumulo di energia elastica durante la fase di caricamento. È interessante notare come sia il sottoscapolare sia il capo lungo del bicipite durante l'extrarotazione massima vengano ulteriormente caricati da due strutture che fanno da puleggia, la coracoide per il sottoscapolare e il legamento trasverso per il bicipite, agendo come l'arciere che mette in tensione la corda dell'arco.

Se compariamo il trochite umano con quello dei primati osserviamo che il nostro è molto più smussato, rendendo così il braccio di leva del sovraspinato meno efficace, ma, associato a una glena con un diametro antero-posteriore ridotto, permette in

compenso una maggiore extrarotazione ed estensione orizzontale (218).

Il legamento coracoacromiale, comunemente considerato un ammortizzatore della risalita della testa dell'omero all'inizio dell'abduzione, acquista un nuovo significato se osservato in questa funzione.

Nella fase di carico sulla testa omerale agiscono forze di scivolamento superiore per 250 N e di scivolamento anteriore per 310 N (219): se combinati insieme questi due vettori hanno una risultante in direzione antero-superiore di 400 N proprio in direzione di questo legamento (218).

## Riferimenti bibliografici

1. Sewell MD, Al-Hadithy N, Le Leu A, Lambert SM. Instability of the sternoclavicular joint: Current concepts in classification, treatment and outcomes. *Bone Joint J.* 2013;95B(6):721-31.
2. Barbaix E, Lapierre M, Van Roy P, Clarijs JP. The sternoclavicular joint: Variants of the discus articularis. *Clin Biomech.* 2000;15(1):S3-7.
3. DePalma AF. *Surgical Anatomy of Acromioclavicular and Sternoclavicular Joints.* Surg Clin North Am. 1963; 43(6):1541-50.
4. Ludewig PM, Behrens SA, Meyer SM et al. Three-Dimensional Clavicular Motion During Arm Elevation: Reliability and Descriptive Data. *J Orthop Sports Phys Ther.* 2004;34(3):140-9.
5. Wirth MA, Rockwood CA. Acute and Chronic Traumatic Injuries of the Sternoclavicular Joint. *J Am Acad Orthop Surg.* 1996;4(5):268-78.
6. Emura K, Arakawa T, Terashima T, Miki A. Macroscopic and histological observations on the human sternoclavicular joint disc. *Anat Sci Int.* 2009;84(3):182-8.
7. Dhawan R, Singh RA, Tins B, Hay SM. Sternoclavicular joint. *Shoulder Elb.* 2018;10(4):296-305.
8. Terry GC, Chopp TM. Functional Anatomy of the Shoulder. *J Athl Train.* 2000;35(3):248-55.
9. Van Tongel A, MacDonald P, Leiter J et al. A cadaveric study of the structural anatomy of the sternoclavicular joint. *Clin Anat.* 2012;25(7):903-10.
10. Negri JH, Malavolta EA, Assunção JH et al. Assessment of the function and resistance of sternoclavicular ligaments: A biomechanical study in cadavers. *Orthop Traumatol Surg Res.* 2014;100(7):727-31.
11. Spencer EE, Kuhn JE, Huston LJ et al. Ligamentous restraints to anterior and posterior translation of the sternoclavicular joint. *J Shoulder Elbow Surg.* 2014;11(1):43-7.
12. Bearn JG. Function of certain shoulder muscles in posture and in holding weights. *Rheumatology.* 1961;6(3):100-4.
13. Bearn JG. Direct observations on the function of the capsule of the sternoclavicular joint in clavicular support. *J Anat.* 1967;101(1):159-70.
14. Lee JT, Campbell KJ, Michalski MP et al. Surgical anatomy of the sternoclavicular joint: A qualitative and quantitative anatomical study. *J Bone Joint Surg Am.* 2014;96(19):e166.
15. Tubbs RS, Shah NA, Sullivan BP et al. The costoclavicular ligament revisited: A functional and anatomical study. *Rom J Morphol Embryol.* 2008;50(3):475-9.
16. Spencer EE, Kuhn JE, Huston LJ et al. Ligamentous restraints to anterior and posterior translation of the sternoclavicular joint. *J Shoulder Elbow Surg.* 2002; 11(1):43-7.
17. Reis FP, De Camargo AM, Vitti M, De Carvalho CAF. Electromyographic study of the subclavius muscle. *Acta Anat (Basel).* 1979;105(3):284-90.
18. Groh GI, Wirth MA. Management of traumatic sternoclavicular joint injuries. *J Am Acad Orthop Surg.* 2011;19(1):1-7.
19. Panzica M, Zeichen J, Hankemeier S et al. Long-term outcome after joint reconstruction or medial resection arthroplasty for anterior SCJ instability. *Arch Orthop Trauma Surg.* 2010;130(5):657-65.
20. De Maeseneer M, Lenchik L, Buls N et al. High-resolution CT of the sternoclavicular joint and first costochondral synchondrosis in asymptomatic individuals. *Skeletal Radiol.* 2016;45(9):1257-62.
21. Lawrence CR, East B, Rashid A, Tytherleigh-Strong GM. The prevalence of osteoarthritis of the sternoclavicular joint on computed tomography. *J Shoulder Elbow Surg.* 2017;26(1):e18-22.
22. Kier R, Wain SL, Apple J, Martinez S. Osteoarthritis of the sternoclavicular joint radiographic features and pathologic correlation. *Invest Radiol.* 1986;21(3):227-33.
23. Nettles JL, Linscheid RL. Sternoclavicular dislocations. *J Trauma – Inj Infect Crit Care.* 1968;8(2):158-64.
24. Tepolt F, Carry PM, Heyn PC, Miller NH. Posterior sternoclavicular joint injuries in the adolescent population: A meta-analysis. *Am J Sports Med.* 2014;42(10):2517-24.
25. Kendal JK, Thomas K, Lo IKY, Bois AJ. Clinical Outcomes and Complications Following Surgical Management of Traumatic Posterior Sternoclavicular Joint Dislocations: A Systematic Review. *JBJS Rev.* 2018;6(11):e2.
26. Martetschläger F, Warth RJ, Millett PJ. Instability and degenerative arthritis of the sternoclavicular joint: A current concepts review. *Am J Sports Med.* 2014;42(4):999-1007.
27. Thut D, Hergan D, Dukas A et al. Sternoclavicular joint reconstruction: A systematic review. *Bull NYU Hosp Jt Dis.* 2011;69(2):128-35.
28. Johnson G, Bogduk N, Nowitzke A, House D. Anatomy and actions of the trapezius muscle. *Clin Biomech.* 1994;9(1):44-50.
29. Moseley HF. The Clavicle Its Anatomy and Function. *Clin Orthop Relat Res.* 1968;(58):17-27.
30. Matsumura N, Nakamichi N, Ikegami H et al. The function of the clavicle on scapular motion: a cadaveric study. *J Shoulder Elbow Surg.* 2013;22(3):333-9.

31. Postacchini F, Gumina S, De Santis P, Albo F. Epidemiology of clavicle fractures. *J Shoulder Elbow Surg.* 2002;11(5):452-6.
32. Robinson CM. Fractures of the clavicle in the adult. *J Bone Jt Surg Br.* 1998;80-B(3):476-84.
33. Nordqvist A, Petersson C. The incidence of fractures of the clavicle. *Clin Orthop Relat Res.* 1994;(300):127-32.
34. Nowak J, Mallmin H, Larsson S. The aetiology and epidemiology of clavicular fractures: A prospective study during a two-year period in Uppsala, Sweden. *Injury.* 2000;31(5):353-8.
35. Klassen JF, Morrey BF, An K. Surgical anatomy and function of the acromioclavicular and coracoclavicular ligaments. *Oper Tech Sports Med.* 1997;5(2):60-4.
36. Salter EG, Nasca RJ, Shelley BS. Anatomical observations on the acromioclavicular joint and supporting ligaments. *Am J Sports Med.* 1987;15(3):199-206.
37. Petersson CJ. Degeneration of the acromioclavicular joint: A morphological study. *Acta Orthop.* 1983;54(3):434-8.
38. Stine IA, Vangsnest CT. Analysis of the Capsule and Ligament Insertions About the Acromioclavicular Joint: A Cadaveric Study. *Arthrosc – J Arthrosc Relat Surg.* 2009;25(9):968-74.
39. Mazzocca AD, Arciero RA, Bicos J. Evaluation and treatment of acromioclavicular joint injuries. *Am J Sports Med.* 2007;35(2):316-29.
40. Pastor MF, Averbek AK, Welke B et al. The biomechanical influence of the deltoid fascia on horizontal and vertical acromioclavicular joint stability. *Arch Orthop Trauma Surg.* 2016;136(4):513-9.
41. Fukuda K, Craig EV, An KN et al. Biomechanical study of the ligamentous system of the acromioclavicular joint. *J Bone Joint Surg Am.* 1986;68(3):434-40.
42. Lee KW, Debski RE, Chen CH et al. Functional evaluation of the ligaments at the acromioclavicular joint during anteroposterior and superoinferior translation. *Am J Sports Med.* 1997;25(6):858-62.
43. Dawson PA, Adamson GJ, Pink MM et al. Relative contribution of acromioclavicular joint capsule and coracoclavicular ligaments to acromioclavicular stability. *J Shoulder Elbow Surg.* 2009;18(2):237-44.
44. Oki S, Matsumura N, Iwamoto W et al. The function of the acromioclavicular and coracoclavicular ligaments in shoulder motion: A whole-cadaver study. *Am J Sports Med.* 2012;40(11):2617-26.
45. Crönlein M, Postl L, Beirer M et al. Analysis of the bony geometry of the acromio-clavicular joint 11 Medical and Health Sciences 1103 Clinical Sciences. *Eur J Med Res [Internet].* 2018;23(1):5-9.
46. Colegate-Stone T, Allom R, Singh R et al. Classification of the morphology of the acromioclavicular joint using cadaveric and radiological analysis. *J Bone Joint Surg Br.* 2010;92(5):743-6.
47. Sahara W, Sugamoto K, Murai M, Yoshikawa H. Three-dimensional clavicular and acromioclavicular rotations during arm abduction using vertically open MRI. *J Orthop Res.* 2007;25(9):1243-9.
48. Ludewig PM, Phadke V, Braman JP et al. Motion of the shoulder complex during multiplanar humeral elevation. *J Bone Joint Surg A.* 2009;91(2):378-89.
49. Teece RM, Lunden JB, Lloyd AS et al. Three-dimensional acromioclavicular joint motions during elevation of the arm. *J Orthop Sports Phys Ther.* 2008;38(4):181-90.
50. Inman VT, Saunders JB, Abbott LC. Observations of the function of the shoulder joint. *J Bone Joint Surg.* 1944;26.
51. Graichen H, Stammberger T, Bonel H et al. Magnetic Resonance Based Motion Analysis of the Shoulder During Elevation. *Clin Orthop Relat Res.* 2000;370(3):154-63.
52. Barrett E, O'Keefe M, O'Sullivan K et al. Is thoracic spine posture associated with shoulder pain, range of motion and function? A systematic review. *Man Ther.* 2016;26:38-46.
53. Shubin Stein BE, Wiater JM, Pfaff HC et al. Detection of acromioclavicular joint pathology in asymptomatic shoulders with magnetic resonance imaging. *J Shoulder Elbow Surg.* 2001;10(3):204-8.
54. Rockwood CA, Matsen FA, Wirth MA, Lippitt SB. *The Shoulder.* WB Saunders 2004.
55. Tamaoki MJ, Lenza M, Matsunaga FT et al. Surgical versus conservative interventions for treating acromioclavicular dislocation of the shoulder in adults. *Cochrane Database Syst Rev.* 2019;10(10):CD007429.
56. McKee M, Pelet S, McCormack RG et al. Multicenter Randomized Clinical Trial of Nonoperative Versus Operative Treatment of Acute Acromio-Clavicular Joint Dislocation. *J Orthop Trauma.* 2015;29(11):479-87.
57. Frank RM, Cotter EJ, Leroux TS, Romeo AA. *Acromioclavicular Joint Injuries: Evidence-based Treatment.* *J Am Acad Orthop Surg.* 2019;27(17): E775-88.
58. Chamblor AFW, Bull AMJ, Reilly P et al. Coracoacromial ligament tension in vivo. *J Shoulder Elbow Surg.* 2003;12(4):365-7.
59. Bigliani LU, Morrison DS, April EW. The Morphology of the Acromion and Its Relationship to Rotator Cuff Tears. *Orthop Trans.* 1986;10:228.
60. Kitay GS, Iannotti JP, Williams GR et al. Roentgenographic assessment of acromial morphologic condition in rotator cuff impingement syndrome. *J Shoulder Elbow Surg.* 1995;4(6):441-8.
61. Banas MP, Miller RJ, Totterman S. Relationship between the lateral acromion angle and rotator cuff disease. *J Shoulder Elbow Surg.* 1995;4(6):454-61.
62. Balke M, Schmidt C, Dedy N et al. Correlation of acromial morphology with impingement syndrome and rotator cuff tears. *Acta Orthop.* 2013;84(2):178-83.
63. Basmajian JV, Bazant FJ. Factors preventing downward dislocation of the adducted shoulder joint. An electromyographic and morphological study. *J Bone Joint Surg Am.* 1959;41-A:1182-6.
64. Lukaszewicz AC, McClure P, Michener L et al. Comparison of 3-dimensional scapular position and orientation between subjects with and without shoulder impingement. *J Orthop Sports Phys Ther.* 1999;29(10):574-86.
65. Poppen NK, Walker PS. Normal and abnormal motion of the shoulder. *J Bone Joint Surg Am.* 1976;58(2):195-201.

66. Freedman L, Munro RR. Abduction of the arm in the scapular plane: scapular and glenohumeral movements. A roentgenographic study. *J Bone Joint Surg Am.* 1966;48(8):1503-10.
67. Ludewig PM, Cook TM, Nawoczenski DA. Three-dimensional scapular orientation and muscle activity at selected positions of humeral elevation. *J Orthop Sports Phys Ther.* 1996;24(2):57-65.
68. Plancher KD, Peterson RK, Johnston JC, Luke TA. The Spinoglenoid Ligament. *J Bone Joint Surg Am.* 2005; 87(2):361-5.
69. Prescher A, Klümpen T. Does the area of the glenoid cavity of the scapula show sexual dimorphism? *J Anat.* 1995;186,1:223-6.
70. Schleich C, Bittersohl B, Antoch G et al. Thickness Distribution of Glenohumeral Joint Cartilage: A Normal Value Study on Asymptomatic Volunteers Using 3-Tesla Magnetic Resonance Tomography. *Cartilage.* 2017;8(2):105-11.
71. Huber WP, Putz RV. Periarticular fiber system of the shoulder joint. *Arthroscopy.* 1997;13(6):680-91.
72. Kask K, Pöldoja E, Lont T et al. Anatomy of the superior glenohumeral ligament. *J Shoulder Elbow Surg.* 2010;19(6):908-16.
73. Collotte P, Nové-Josserand L. Arthroscopic anatomy of the middle glenohumeral ligament. *Surg Radiol Anat.* 2018;40(12):1363-70.
74. Ide J, Maeda S, Takagi K. Normal Variations of the Glenohumeral Ligament Complex: An Anatomic Study for Arthroscopic Bankart Repair. *Arthrosc – J Arthrosc Relat Surg.* 2004;20(2):164-8.
75. O'Brien SJ, Neves MC, Arnoczky SP et al. The anatomy and histology of the inferior glenohumeral ligament complex of the shoulder. *Am J Sports Med.* 1990;18(5):449-56.
76. Kolts I, Busch LC, Tomusk H et al. Anatomical composition of the anterior shoulder joint capsule. A cadaver study on 12 glenohumeral joints. *Ann Anat.* 2001;183(1):53-9.
77. Merila M, Heliö H, Busch LC et al. The Spiral Glenohumeral Ligament: An Open and Arthroscopic Anatomy Study. *Arthrosc – J Arthrosc Relat Surg.* 2008;24(11):1271-6.
78. Merila M, Leibecke T, Gehl HB et al. The anterior glenohumeral joint capsule: Macroscopic and MRI anatomy of the fasciculus obliquus or so-called ligamentum glenohumerale spirale. *Eur Radiol.* 2004;14(8):1421-6.
79. Pouliart N, Somers K, Eid S, Gagey O. Variations in the superior capsuloligamentous complex and description of a new ligament. *J Shoulder Elbow Surg.* 2007;16(6):821-36.
80. Pouliart N, Somers K, Gagey O. Arthroscopic glenohumeral folds and microscopic glenohumeral ligaments: The fasciculus obliquus is the missing link. *J Shoulder Elbow Surg.* 2008;17(3):418-30.
81. Clark JM, Harryman DT. Tendons, ligaments, and capsule of the rotator cuff. Gross and microscopic anatomy. *J Bone Joint Surg Am.* 1992;74(5):713-25.
82. Arai R, Nimura A, Yamaguchi K et al. The anatomy of the coracohumeral ligament and its relation to the subscapularis muscle. *J Shoulder Elbow Surg.* 2014;23(10):1575-81.
83. Yang H-feng, Tang K-lai, Chen W et al. An anatomic and histologic study of the coracohumeral ligament. *J Shoulder Elbow Surg.* 2009;18(2):305-10.
84. Hashimoto T, Suzuki K, Nobuhara K. Dynamic analysis of intraarticular pressure in the glenohumeral joint. *J Shoulder Elbow Surg.* 1995;4(3):209-18.
85. Aszmann OC, Lee Dellon A, Birely BT, McFarland EG. Innervation of the human shoulder joint and its implications for surgery. *Clin Orthop Relat Res.* 1996;(330): 202-7.
86. Seo CM, Kim K, Jeon A et al. Clinical anatomy for the innervated pattern and boundary of the subdeltoid bursa. *Biomed Res Int.* 2018;2018.
87. Kennedy MS, Nicholson HD, Woodley SJ. Clinical anatomy of the subacromial and related shoulder bursae: A review of the literature. *Clin Anat.* 2017;30(2):213-26.
88. Duranthon LD, Gagey OJ. Anatomy and function of the subdeltoid bursa. *Surg Radiol Anat.* 2001;23(1):23-5.
89. Tomita Y, Ozaki J, Sakurai G et al. Neurohistology of the subacromial bursa in rotator cuff tear. *J Orthop Sci.* 1997;2(5):295-300.
90. Soifer TB, Levy HJ, Soifer FM et al. Neurohistology of the subacromial space. *Arthrosc – J Arthrosc Relat Surg.* 1996;12(2):182-6.
91. Vangsnest CT, Ennis M, Taylor JG, Atkinson R. Neural anatomy of the glenohumeral ligaments, labrum, and subacromial bursa. *Arthrosc J Arthrosc Relat Surg.* 1995;11(2):180-4.
92. Ide K, Shirai Y, Ito H, Ito H. Sensory nerve supply in the human subacromial bursa. *J Shoulder Elbow Surg.* 1996;5(5):371-82.
93. Sigholm G, Styf J, Körner L, Herberts P. Pressure recording in the subacromial bursa. *J Orthop Res.* 1988;6(1): 123-8.
94. Bagg SD, Forrest WJ. A biomechanical analysis of scapular rotation during arm abduction in the scapular plane. *Am J Phys Med Rehabil.* 1988;67(6):238-45.
95. Fey AJ, Dorn CS, Busch BP et al. Potential torque capabilities of the trapezius [abstract]. *J Orthop Sports Phys Ther.* 2007;37(1):A44-5.
96. Webb AL, O'Sullivan E, Stokes M, Mottram S. A novel cadaveric study of the morphometry of the serratus anterior muscle: one part, two parts, three parts, four? *Anat Sci Int.* 2018;93(1):98-107.
97. Nasu H, Yamaguchi K, Nimura A, Akita K. An anatomic study of structure and innervation of the serratus anterior muscle. *Surg Radiol Anat.* 2012;34(10):921-8.
98. Moseley JB, Jobe FW, Pink M et al. EMG analysis of the scapular muscles during a shoulder rehabilitation program. *Am J Sports Med.* 1992;20(2):128-34.
99. Ekstrom RA, Bifulco KM, Lopau CJ et al. Comparing the Function of the Upper and Lower Parts of the Serratus Anterior Muscle Using Surface Electromyography. *J Orthop Sports Phys Ther.* 2004;34(5):235-43.

100. Morais N, Cruz J. The pectoralis minor muscle and shoulder movement-related impairments and pain: Rationale, assessment and management. *Phys Ther Sport*. 2016;17:1-13.
101. Oatis CA. *Kinesiology*. 2nd ed. Lippincott Williams & Wilkins 2010.
102. Dugas JR, Campbell DA, Warren RF et al. Anatomy and dimensions of rotator cuff insertions. *J Shoulder Elbow Surg*. 2002;11(5):498-503.
103. Gates JJ, Gilliland J, McGarry MH et al. Influence of distinct anatomic subregions of the supraspinatus on humeral rotation. *J Orthop Res*. 2010;28(1):12-17.
104. Lake SP, Miller KS, Elliott DM, Soslowky LJ. Tensile properties and fiber alignment of human supraspinatus tendon in the transverse direction demonstrate inhomogeneity, nonlinearity, and regional isotropy. *J Biomech*. 2010;43(4):727-32.
105. Lee SB, Nakajima T, Luo ZP et al. The bursal and articular sides of the supraspinatus tendon have a different compressive stiffness. *Clin Biomech*. 2000;15(4):241-7.
106. Nakajima T, Hughes RE, An K-N. Effects of glenohumeral rotations and translations on supraspinatus tendon morphology. *Clin Biomech*. 2004;19(6):579-85.
107. Howell SM, Imobersteg AM, Seger DH, Marone PJ. Clarification of the role of the supraspinatus muscle in shoulder function. *J Bone Joint Surg Am*. 1986;68(3):398-404.
108. Phillips D, Kosek P, Karduna A. The contribution of the supraspinatus muscle at sub-maximal contractions. *J Biomech*. 2018;68:65-9.
109. Gerber C, Blumenthal S, Curt A, Werner CML. Effect of selective experimental suprascapular nerve block on abduction and external rotation strength of the shoulder. *J Shoulder Elbow Surg*. 2011;16(6):815-20.
110. De Witte PB, Werner S, ter Braak LM et al. The Supraspinatus and the Deltoid. Not just two arm elevators. *Hum Mov Sci*. 2014;33(1):273-83.
111. Otis JC, Jiang CC, Wickiewicz TL et al. Changes in the moment arms of the rotator cuff and deltoid muscles with abduction and rotation. *J Bone Joint Surg Am*. 1994;76(5):667-76.
112. Morag Y, Jamadar DA, Miller B et al. The subscapularis: Anatomy, injury, and imaging. *Skeletal Radiol*. 2011;40(3):255-69.
113. Wickham J, Pizzari T, Balster S et al. The variable roles of the upper and lower subscapularis during shoulder motion. *Clin Biomech*. 2014;29(8):885-91.
114. Halder A, Zobitz ME, Schultz F, An KN. Structural properties of the subscapularis tendon. *J Orthop Res*. 2000;18(5):829-34.
115. Kumar V, Balasubramaniam P. The role of atmospheric pressure in stabilising the shoulder. An experimental study. *J Bone Joint Surg Br*. 1985;67-B(5):719-21.
116. Itoigawa Y, Itoi E. Anatomy of the capsulolabral complex and rotator interval related to glenohumeral instability. *Knee Surgery, Sport Traumatol Arthrosc*. 2016;24(2):343-9.
117. Gohlke F, Essigkrug B, Schmitz F. The pattern of the collagen fiber bundles of the capsule of the glenohumeral joint. *J Shoulder Elbow Surg*. 1994;3(3):111-28.
118. Felli L, Bigliani L, Fiore M et al. Functional study of glenohumeral ligaments. *J Orthop Sci*. 2012;17(5):634-7.
119. Yang C, Goto A, Sahara W et al. In vivo three-dimensional evaluation of the functional length of glenohumeral ligaments. *Clin Biomech*. 2010;25(2):137-41.
120. Pagnani MJ, Warren RF. Stabilizers of the glenohumeral joint. *J Shoulder Elbow Surg*. 1994;3(3):173-90.
121. Alashkham A, Alraddadi A, Felts P, Soames R. Histology, vascularity and innervation of the glenoid labrum. *J Orthop Surg*. 2018;26(2):1-8.
122. Guanche CA, Noble J, Solomonow M, Wink CS. Periarticular neural elements in the shoulder joint. *Orthopedics*. 1999;22(6):615-7.
123. Witherspoon JW, Smirnova IV, McIlff TE. Neuroanatomical distribution of mechanoreceptors in the human cadaveric shoulder capsule and labrum. *J Anat*. 2014;225(3):337-45.
124. Jerosch J, Steinbeck J, Clahsen H et al. Function of the glenohumeral ligaments in active stabilisation of the shoulder joint. *Knee Surgery, Sport Traumatol Arthrosc*. 1993;1(3-4):152-8.
125. Morisawa Y. Morphological study of mechanoreceptors on the coracoacromial ligament. *J Orthop Sci*. 1998;3(2):102-10.
126. Diederichsen LP, Nørregaard J, Krogsgaard M et al. Reflexes in the shoulder muscles elicited from the human coracoacromial ligament. *J Orthop Res*. 2004;22(5):976-83.
127. Diederichsen L, Krogsgaard M, Voigt M, Dyhre-Poulsen P. Shoulder reflexes. *J Electromyogr Kinesiol*. 2002;12(3):183-91.
128. Jerosch J, Steinbeck J, Schröder M et al. Intraoperative EMG response of the musculature after stimulation of the glenohumeral joint capsule. *Acta Orthop Belg*. 1997;63(1):8-14.
129. Jerosch J, Castro WHM, Halm H, Drescher H. Does the glenohumeral joint capsule have proprioceptive capability? *Knee Surgery, Sport Traumatol Arthrosc*. 1993;1(2):80-4.
130. Voigt M, Jakobsen J, Sinkjaer T. Non-noxious stimulation of the glenohumeral joint capsule elicits strong inhibition of active shoulder muscles in conscious human subjects. *Neurosci Lett*. 1998;254(2):105-8.
131. Lippitt SB, Vanderhooft JE, Harris SL et al. Glenohumeral stability from concavity-compression: A quantitative analysis. *J Shoulder Elbow Surg*. 1993;2(1):27-35.
132. Halder AM, Kuhl SG, Zobitz ME et al. Effects of the glenoid labrum and glenohumeral abduction on stability of the shoulder joint through concavity-compression: An in vitro study. *J Bone Joint Surg Am*. 2001;83(7):1062-9.
133. Labriola JE, Lee TQ, Debski RE, McMahon PJ. Stability and instability of the glenohumeral joint: the role of shoulder muscles. *J Shoulder Elbow Surg*. 2014;14(1 Suppl S):325-38S.

134. Keating J, Waterworth P, Shaw-Dunn J, Crossan J. The relative strengths of the rotator cuff muscles. A cadaver study. *J Bone Joint Surg Br.* 1993;75-B(1):137-40.
135. Ward SR, Hentzen ER, Smallwood LH et al. Rotator cuff muscle architecture: Implications for glenohumeral stability. *Clin Orthop Relat Res.* 2006;(448):157-63.
136. Veeger HEJ, Van Der Helm FCT, Van Der Woude LHV et al. Inertia and muscle contraction parameters for musculoskeletal modelling of the shoulder mechanism. *J Biomech.* 1991;24(7):615-29.
137. Lee SB, Kim KJ, O'Driscoll SW et al. Dynamic glenohumeral stability provided by the rotator cuff muscles in the mid-range and end-range of motion: A study in cadavera. *J Bone Joint Surg Am.* 2000;82(6):849-57.
138. Kuechle DK, Newman SR, Itoi E et al. The relevance of the moment arm of shoulder muscles with respect to axial rotation of the glenohumeral joint in four positions. *Clin Biomech.* 2000;15(5):322-9.
139. Wattanaprakornkul D, Cathers I, Halaki M, Ginn KA. The rotator cuff muscles have a direction specific recruitment pattern during shoulder flexion and extension exercises. *J Sci Med Sport.* 2011;14(5):376-82.
140. Wattanaprakornkul D, Halaki M, Cathers I, Ginn KA. Direction-specific recruitment of rotator cuff muscles during bench press and row. *J Electromyogr Kinesiol.* 2011;21(6):1041-9.
141. Boettcher CE, Cathers I, Ginn KA. The role of shoulder muscles is task specific. *J Sci Med Sport.* 2010;13(6):651-6.
142. Kronberg M, Nemeth G, Brostrom LA. Muscle activity and coordination in the normal shoulder. An electromyographic study. *Clin Orthop Relat Res.* 1990;(257):76-85.
143. Lieber RL. *Skeletal Muscle Structure, Function, and Plasticity.* Lippincott Williams & Wilkins 2011.
144. Halder AM, Zhao KD, O'Driscoll SW et al. Dynamic contributions to superior shoulder stability. *J Orthop Res.* 2001;19(2):206-12.
145. Itoi E, Motzkin NE, Morrey BF, An KN. Stabilizing function of the long head of the biceps in the hanging arm position. *J Shoulder Elbow Surg.* 1994;3(3):135-42.
146. Itoi E, Newman SR, Kuechle DK et al. Dynamic anterior stabilisers of the shoulder with the arm in abduction. *J Bone Joint Surg Br.* 1994;76(5):834-6.
147. Kumar VP, Satku K, Balasubramaniam P. The role of the long head of biceps brachii in the stabilization of the head of the humerus. *Clin Orthop Relat Res.* 1989;(244):172-5.
148. Malicky DM, Soslowsky LJ, Blasler RB, Shyr Y. Anterior glenohumeral stabilization factors: Progressive effects in a biomechanical model. *J Orthop Res.* 1996;14(2):282-8.
149. Pagnani MJ, Deng XH, Warren RF et al. Role of the long head of the biceps brachii in glenohumeral stability: a biomechanical study in cadavera. *J Shoulder Elbow Surg.* 1996;5(4):255-62.
150. Rodosky MW, Harner CD, Fu FH. The Role of the Long Head of the Biceps Muscle and Superior Glenoid Labrum in Anterior Stability of the Shoulder. *Am J Sports Med.* 1994;22(1):121-30.
151. Soslowsky LJ, Malicky DM, Blasler RB. Active and passive factors in inferior glenohumeral stabilization: A biomechanical model. *J Shoulder Elbow Surg.* 1997;6(4):371-9.
152. Youm T, ElAttrache NS, Tibone JE et al. The effect of the long head of the biceps on glenohumeral kinematics. *J Shoulder Elbow Surg.* 2009;18(1):122-9.
153. Yamaguchi K, Riew KD, Galatz LM et al. Biceps activity during shoulder motion: An electromyographic analysis. *Clin Orthop Relat Res.* 1997;(336):122-9.
154. Levy AS, Kelly BT, Lintner SA et al. Function of the long head of the biceps at the shoulder: Electromyographic analysis. *J Shoulder Elbow Surg.* 2001;10(3):250-5.
155. Giphart JE, Elser F, Dewing CB et al. The long head of the biceps tendon has minimal effect on in vivo glenohumeral kinematics: A biplane fluoroscopy study. *Am J Sports Med.* 2012;40(1):202-12.
156. Lee S, An K. Dynamic Glenohumeral Stability Provided by Three Heads of the Deltoid Muscle. 2002;(400):40-7.
157. Codman EA. *The Shoulder.* Boston, Thomas Todd 1934.
158. Robert-Lachaine X, Marion P, Godbout V et al. Elucidating the scapulo-humeral rhythm calculation: 3D joint contribution method. *Comput Methods Biomed Biomed Engin.* 2015;18(3):249-58.
159. Graichen H, Stammberger T, Bonel H et al. Glenohumeral translation during active and passive elevation of the shoulder – a 3D open-MRI study. *J Biomech.* 2000;33(5):609-13.
160. Matsuki K, Matsuki KO, Yamaguchi S et al. Dynamic in vivo glenohumeral kinematics during scapular plane abduction in healthy shoulders. *J Orthop Sports Phys Ther.* 2012;42(2):96-104.
161. Braman JP, Engel SC, LaPrade RF, Ludewig PM. In vivo assessment of scapulohumeral rhythm during unconstrained overhead reaching in asymptomatic subjects. *J Shoulder Elbow Surg.* 2009;18(6):960-7.
162. Crosbie J, Kilbreath SL, Hollmann L, York S. Scapulohumeral rhythm and associated spinal motion. *Clin Biomech.* 2008;23(2):184-92.
163. Scale PS. Shoulder Function and 3-Dimensional Kinematics in People With Shoulder Impingement Syndrome Before and After a 6-Week Exercise Program. 2004;84(9):832-48.
164. McClure PW, Michener LA, Sennett BJ, Karduna AR. Direct 3-dimensional measurement of scapular kinematics during dynamic movements in vivo. *J Shoulder Elbow Surg.* 2001;10(3):269-77.
165. Sahara W, Sugamoto K, Murai M et al. The three-dimensional motions of glenohumeral joint under semi-loaded condition during arm abduction using vertically open MRI. *Clin Biomech.* 2007;22(3):304-12.
166. Yoshizaki K, Hamada J, Tamai K et al. Analysis of the scapulohumeral rhythm and electromyography of the shoulder muscles during elevation and lowering: Comparison of dominant and nondominant shoulders. *J Shoulder Elbow Surg.* 2009;18(5):756-63.
167. Ebaugh DD, Spinelli BA. Scapulothoracic motion and muscle activity during the raising and lowering phases

- of an overhead reaching task. *J Electromyogr Kinesiol.* 2010;20(2):199-205.
168. Stokdijk M, Eilers PHC, Nagels J, Rozing PM. External rotation in the glenohumeral joint during elevation of the arm. *Clin Biomech.* 2003;18(4):296-302.
  169. Kozono N, Okada T, Takeuchi N et al. In vivo kinematic analysis of the glenohumeral joint during dynamic full axial rotation and scapular plane full abduction in healthy shoulders. *Knee Surgery, Sport Traumatol Arthrosc.* 2017;25(7):2032-40.
  170. Wickham J, Pizzari T, Stansfeld K et al. Quantifying "normal" shoulder muscle activity during abduction. *J Electromyogr Kinesiol.* 2010;20(2):212-22.
  171. Hawkes DH, Khaiyat OA, Howard AJ et al. Patterns of muscle coordination during dynamic glenohumeral joint elevation: An EMG study. *PLoS One.* 2019;14(2):1-16.
  172. Levy O, Mullett H, Roberts S, Copeland S. The role of anterior deltoid reeducation in patients with massive irreparable degenerative rotator cuff tears. *J Shoulder Elbow Surg.* 2008;17(6):863-70.
  173. Reed D, Cathers I, Halaki M, Ginn KA. Does changing the plane of abduction influence shoulder muscle recruitment patterns in healthy individuals? *Man Ther.* 2016;21(2):63-8.
  174. Heuberger P, Kranzl A, Laky B et al. Electromyographic analysis: shoulder muscle activity revisited. *Arch Orthop Trauma Surg.* 2015;135(4):549-63.
  175. Alpert SW, Pink MM, Jobe FW et al. Electromyographic analysis of deltoid and rotator cuff function under varying loads and speeds. *J Shoulder Elbow Surg.* 2000;9(1):47-58.
  176. Reed D, Cathers I, Halaki M, Ginn K. Does supraspinatus initiate shoulder abduction? *J Electromyogr Kinesiol.* 2013;23(2):425-9.
  177. Bouisset S, Richardson J, Zattara M. Do anticipatory postural adjustments occurring in different segments of the postural chain follow the same organisational rule for different task movement velocities, independently of the inertial load value? *Exp Brain Res.* 2000;132(1):79-86.
  178. Roren A, Nguyen C, Zauderer J et al. Arm elevation involves cervical spine 3-D rotations. *Ann Phys Rehabil Med.* 2020;63(4):372-5.
  179. Takasaki H, Hall T, Kaneko S et al. Cervical segmental motion induced by shoulder abduction assessed by magnetic resonance imaging. *Spine (Phila Pa 1976).* 2009;34(3):122-6.
  180. Neer CS. Impingement lesions. *Clin Orthop Relat Res.* 1983;173:70-7.
  181. Giphart JE, van der Meijden OAJ, Millett PJ. The effects of arm elevation on the 3-dimensional acromiohumeral distance: A biplane fluoroscopy study with normative data. *J Shoulder Elbow Surg.* 2012;21(11):1593-600.
  182. Lawrence RL, Sessions WC, Jensen MC et al. The effect of glenohumeral plane of elevation on supraspinatus subacromial proximity. *J Biomech.* 2018;79:147-54.
  183. An KN. Kinematic analysis of human movement. *Ann Biomed Eng.* 1984;12(6):585-97.
  184. Jahn S, Seror J, Klein J. Lubrication of Articular Cartilage. *Annu Rev Biomed Eng.* 2016;18(1):235-58.
  185. Blaimont P, Taheri A, Vanderhofstadt A. Déplacement des centres instantanés de rotation de l'épaule au cours de l'abduction. *Rev Chir Orthop Reparatrice Appar Mot.* 2005;91(5):399-406.
  186. Meskers CGM, Van Der Helm FCT, Rozendaal LA, Rozing PM. In vivo estimation of the glenohumeral joint rotation center from scapular bony landmarks by linear regression. *J Biomech.* 1997;31(1):93-6.
  187. Saha AK. [Zero position of the glenohumeral joint: its recognition and clinical importance]. *Ann R Coll Surg Engl.* 1958;22(4):223-6.
  188. Stokdijk M, Nagels J, Rozing PM. The glenohumeral joint rotation centre in vivo. *J Biomech.* 2000;33(12):1629-36.
  189. Massimini DF, Boyer PJ, Papannagari R et al. In-vivo glenohumeral translation and ligament elongation during abduction and abduction with internal and external rotation. *J Orthop Surg Res.* 2012;7(1):29.
  190. Duca CJ De, Forrestt WJ. Force Analysis of Individual Muscles Acting Simultaneously on the Shoulder Joint During Isometric Abduction. *J Biomech.* 1973;385-93.
  191. Boyer PJ, Massimini DF, Gill TJ et al. In vivo articular cartilage contact at the glenohumeral joint: Preliminary report. *J Orthop Sci.* 2008;13(4):359-65.
  192. Royer PJ, Kane EJ, Parks KE et al. Fluoroscopic assessment of rotator cuff fatigue on glenohumeral arthrokinematics in shoulder impingement syndrome. *J Shoulder Elbow Surg.* 2009;18(6):968-75.
  193. Chopp JN, O'Neill JM, Hurley K, Dickerson CR. Superior humeral head migration occurs after a protocol designed to fatigue the rotator cuff: A radiographic analysis. *J Shoulder Elbow Surg.* 2010;19(8):1137-44.
  194. Deutsch A, Altchek DW, Schwartz E et al. Radiologic measurement of superior displacement of the humeral head in the impingement syndrome. *J Shoulder Elbow Surg.* 1996;5(3):186-93.
  195. Millett PJ, Giphart JE, Wilson KJ et al. Alterations in Glenohumeral Kinematics in Patients with Rotator Cuff Tears Measured with Biplane Fluoroscopy. *Arthrosc – J Arthrosc Relat Surg.* 2016;32(3):446-51.
  196. San Juan JG, Kosek P, Karduna AR. Humeral head translation after a suprascapular nerve block. *J Appl Biomech.* 2013;29(4):371-9.
  197. Howell SM, Galinat BJ, Renzi AJ, Marone PJ. Normal and abnormal mechanics of the glenohumeral joint in the horizontal plane. *J Bone Joint Surg Am.* 1988;70(2):227-32.
  198. Lempereur M, Leboeuf F, Brochard S et al. In vivo estimation of the glenohumeral joint centre by functional methods: Accuracy and repeatability assessment. *J Biomech.* 2010;43(2):370-4.
  199. Young RW. The ontogeny of throwing and striking. *Hum Ontog.* 2009;3(1):19-31.
  200. Roach NT, Venkadesan M, Rainbow MJ, Lieberman DE. Elastic energy storage in the shoulder and the evolution of high-speed throwing in Homo. *Nature.* 2013;498(7455):483-6.
  201. Roach NT, Lieberman DE. Upper body contributions to power generation during rapid, overhand throwing in humans. *J Exp Biol.* 2014;217(12):2139-49.

202. Lombardo MP, Deane RO. Born to throw: The ecological causes that shaped the evolution of throwing in humans. *Q Rev Biol.* 2018;93(1):1-16.
203. Fleisig GS, Barrentine SW, Escamilla RF, Andrews JR. Biomechanics of Overhand Throwing with Implications for Injuries. *Sport Med.* 1996;21(6):421-37.
204. Fleisig GS, Escamilla RF, Andrews JR et al. Kinematic and kinetic comparison between baseball pitching and football passing. *J Appl Biomech.* 1996;12(2):207-24.
205. Fleisig GS, Andrews JR, Dillman CJ, Escamilla RF. Kinetics of Baseball Pitching with Implications About Injury Mechanisms. *Am J Sports Med.* 1995;23(2):233-9.
206. Feltner M, Dapena J. Dynamics of the Shoulder and Elbow Joints of the Throwing Arm during a Baseball Pitch. *Int J Sport Biomech.* 2016;2(4):235-59.
207. Rash GS, Shapiro R. A three-dimensional dynamic analysis of the quarterback's throwing motion in American football. *J Appl Biomech.* 1995;11(4):443-59.
208. Meyer KE, Saether EE, Soiney EK et al. Three-dimensional scapular kinematics during the throwing motion. *J Appl Biomech.* 2008;24(1):24-34.
209. Miyashita K, Kobayashi H, Koshida S, Urabe Y. Glenohumeral, scapular, and thoracic angles at maximum shoulder external rotation in throwing. *Am J Sports Med.* 2010;38(2):363-8.
210. Roach NT, Venkadesan M, Rainbow MJ, Lieberman DE. Elastic energy storage in the shoulder and the evolution of high-speed throwing in Homo. *Nature.* 2013;498(7455):483-6.
211. Kuhn JE, Huston LJ, Soslowky LJ et al. External rotation of the glenohumeral joint: ligament restraints and muscle effects in the neutral and abducted positions. *J Shoulder Elbow Surg.* 2015;14(1 Suppl S):395-48S.
212. Elser F, Braun S, Dewing CB et al. Anatomy, function, injuries, and treatment of the long head of the biceps brachii tendon. *Arthrosc – J Arthrosc Relat Surg.* 2011;27(4):581-92.
213. Krupp RJ, Kevern MA, Gaines MD et al. Long head of the biceps tendon pain: differential diagnosis and treatment. *J Orthop Sports Phys Ther.* 2009;39(2):55-70.
214. Kuhn JE, Lindholm SR, Huston LJ et al. Failure of the biceps superior labral complex: A cadaveric biomechanical investigation comparing the late cocking and early deceleration positions of throwing. *Arthrosc – J Arthrosc Relat Surg.* 2003;19(4):373-9.
215. Pradhan RL, Itoi E, Hatakeyama Y et al. Superior labral strain during the throwing motion. A cadaveric study. *Am J Sports Med.* 2001;29(4):488-92.
216. DiGiovine NM, Jobe FW, Pink M, Perry J. An electromyographic analysis of the upper extremity in pitching. *J Shoulder Elbow Surg.* 1992;1(1):15-25.
217. Gowan ID, Jobe FW, Tibone JE et al. A comparative electromyographic analysis of the shoulder during pitching. *Am J Sports Med.* 1987;15(6):586-90.
218. Kuhn JE. Throwing, the Shoulder, and Human Evolution. *Am J Orthop.* 2016;45(3):110-4.
219. Dillman CJ, Fleisig GS, Andrews JR. Biomechanics of pitching with emphasis on shoulder kinematics. *J Orthop Sports Phys Ther.* 2015;18(2):402-8.