

Terapia de mano basada en el razonamiento y la práctica clínica

RAQUEL CANTERO TÉLLEZ (coord.)



Tema 5

Biomecánica del antebrazo y aplicaciones prácticas

Mireia Esplugas y Marc García Elías

I. Introducción

El antebrazo es un conjunto de 4 articulaciones interrelacionadas formando una UNIDAD FUNCIONAL, que algunos llaman “articulación del antebrazo”, y que nos permite rotar axialmente el antebrazo, tanto interna (pronación) como externamente (supinación). Al movimiento total (de máxima pronación a máxima supinación) se le denomina movimiento de pronosupinación.

La pronosupinación puede realizarse sin carga, o bajo carga, siendo ésta una de las funciones más complejas de cuerpo humano.

Durante su valoración diagnóstica o terapéutica debe tenerse siempre en consideración la TOTALIDAD del antebrazo.

El antebrazo consta de:

- 2 huesos: radio y cúbito.

- 4 articulaciones:
 - ~ La radiohumeral (RH).
 - ~ La radiocubital proximal (RCP).
 - ~ La radiocubital distal (RCD).
 - ~ La cúbitocarpiana (CC).
- Sus estabilizadores estáticos ligamentosos:
 - ~ 2 complejos ligamnetosos para la RH.
 - ~ 2 para la RCP.
 - ~ 2 para la RCD.
 - ~ 3 para la CC.
- La membrana interósea entre radio y cúbito (MI) con sus 3 bandas (proximal, central y distal).
- El complejo del fibrocartílago triangular formado por:
 - ~ el disco articular.
 - ~ el ligamento radiocubital distal anterior (lig. RCD anterior).
 - ~ el ligamento radiocubital distal posterior (lig. RCD posterior).

- ~ el ligamento cúbito-piramidal (lig. CP).
- ~ el ligamento cubito-semilunar (lig. CS).
- ~ la vaina propia del músculo *extensor carpi ulnaris* (ECU).
- ~ el meniscoide cúbitocarpiano.

2. Cinemática del antebrazo

La cinemática del antebrazo es la parte de la biomecánica que describe qué tipo de movimientos aparece en cada una de las cuatro articulaciones del antebrazo durante la pronosupinación.

El antebrazo posee 8 grados de movilidad:

- Pronación-Supinación.
- Traslación dorsal-traslación volar de la unidad radiocarpiana respecto al cúbito.
- Traslación distal-traslación proximal de la unidad radio-carpiana respecto al cúbito.
- Traslación medial-traslación lateral del cúbito distal

Estas movi­lidades dependen, fundamentalmente, de la orientación espacial de: 1) las carillas articulares de las articulaciones RH, RCP, RCD y CC; 2) los ligamentos de las 4 articulaciones; 3) las diáfisis de radio y cúbito; 4) la membrana que se halla entre ambos (MI); y 5) la ubicación de las inserciones distales de los músculos que dan origen a la movilidad.

2.1. Cinemática de las articulaciones del antebrazo y de la diáfisis de radio y cúbito

Debiéramos conceptualizar ambas articulaciones radio cubitales proximal y distal (RCP y RCD) como los extremos de una articulación bicondílea, separados por las diáfisis de radio y cúbito. Siempre y cuando ambas diáfisis estén normoalineadas, en cada una de las articulaciones radiocubitales se generará un movimiento de rotación que dará origen a la pronosupinación del antebrazo.

Cualquier fractura diafisaria de radio y/o cúbito debe ser considerada una fractura articular que afectará a la rotación normal de las articulaciones RCP y/o RCD.

Cualquier mala alineación diafisaria del radio o de cúbito acarreará una mala alineación o incongruencia articular de las articulaciones radiocubitales y comportará un déficit de pronosupinación.

Cualquier fractura que diafisaria del cúbito o del radio debiera ser considerada una fractura articular de la unidad funcional del antebrazo.

A nivel del cúbito, cualquier acortamiento o defecto rotacional secundario a una fractura diafisaria, acarreará un defecto rotacional en el antebrazo.

Cualquier alteración de la curvatura fisiológica del radio dará lugar a una incongruencia de las articulaciones RCD y/o RCP que comportará una rotación reducida del antebrazo.

El eje de rotación de la unidad funcional RCP, diáfisis de radio y cúbito, RCD pasa por el centro de la cabeza del radio y la fovea del extremo distal del cúbito (en la base de la estiloides cubital). Es un eje oblicuo respecto al eje del antebrazo.

La pronosupinación del antebrazo no se consigue con una simple rotación del radio alrededor del cúbito. Tanto el radio como el cúbito rotan alrededor del eje de rotación del antebrazo.

Si el cúbito estuviera rígido y solo se desplazara el radio, el rango total de pronosupinación se vería ligaramente reducido. A fin de conseguir la máxima pronosupinación, el cúbito distal se traslada medialmente en supinación y lateralmente en pronación. Esta traslación, de unos 9 mm en total, no se ejerce a base de tensar y destensar los ligamentos colaterales húmerocubitales, sino con rotación interna-externa del húmero.

2.2. Cinemática de la articulación radiocubital proximal (RCP)

La cabeza del radio es de morfología ovoide; la cavidad sigmoidea del radio sobre la que se articula es semiesférica. En pronación o supinación, la superficie de contacto entre ambas superficies articulares es mínima: en la superficie volar de la articulación cuando el antebrazo se halla en pronación; en su superficie dorsal cuando está en supinación.

La articulación RCP posee dos estabilizadores estáticos: el ligamento anular, con insercio-

nes en el cúbito, y que circunda la cabeza del radio y el ligamento cuadrado de Denucé, morfológicamente cuadrado, que une el cuello del radio al cúbito.

El ligamento de Denucé se tensa en pronación y supinación del radio y durante la traslación proximal del mismo.

2.3. Cinemática de la membrana interósea (MI)

Sobre ella se originan diversos grupos musculares, tanto en su cara volar como en su cara dorsal.

Posee 3 bandas fibrosas: la oblicua proximal (descrita por J. Weitbrecht), la central y la oblicua distal.

- La banda oblicua proximal:
 - ~ Se tensa en pronación del antebrazo y restringe la migración distal del radio (3).
 - ~ Está ricamente inervada por mecanorreceptores (4) y por lo tanto participa en el control neuromuscular de la estabilidad del antebrazo.
- La banda central:
 - ~ Banda de tejido conectivo denso, así tan resistente a la tracción que un ligamento cruzado anterior.
 - ~ Nace en el tubérculo interóseo del radio y se inserta sobre el cúbito en una área que coincide exactamente con el

eje de rotación del antebrazo; por ello se enrolla alrededor del cúbito durante la pronosupinación del antebrazo.

- ~ La banda central mantiene su máxima tensión en rotación neutra del antebrazo y se destensa muy poco en pronación (5).
 - ~ Por lo tanto, la banda central participa tanto en la estabilidad longitudinal y como en la transversal del antebrazo.
 - ~ Tiene, además, un rol importante en la transmisión de fuerzas desde el radio distal hacia el cúbito proximal (6).
 - ~ No contiene mecanorreceptores (4); no participa, pues, en el control neuromuscular de la estabilidad de la unidad funcional del antebrazo y solo deben otorgársele propiedades estabilizadoras mecánicas.
- La banda oblicua distal:
- ~ Solo está presente en el 40% de la población (7).
 - ~ Tiene propiedades estabilizadoras mecánicas pues se tensa en supinación del antebrazo (3).
 - ~ Cuando está presente, está ricamente inervada y contiene un importante número de mecanorreceptores (4); participa pues, también, en el control neuromuscular de la estabilidad de la unidad funcional del antebrazo.

2.4. Cinemática de la articulación radio-cúbito-carpiana (RCD-CC)

El radio distal se halla unido a la primera hilera de carpo mediante los ligamentos radiocarpianos formando la unidad radiocarpiana. Por lo tanto, durante la rotación del antebrazo, es la unidad radiocarpiana quien rota alrededor del cúbito siguiendo el eje de rotación del antebrazo. Así, el movimiento tendrá lugar tanto en la articulación RCD como en la CC a la vez: se originará, pues, en la articulación RCD-CC. Cualquier disfunción osteo-ligamentosa en cualquiera de ambas articulaciones dará lugar a un déficit de rotación del antebrazo.

Los estabilizadores estáticos locales de la articulación CC son los 3 ligamentos anteriores cúbito-carpianos que emergen del borde anterior del ligamento RCD anterior, y unen el cúbito al piramidal, al semilunar y, a veces, al hueso grande.

Cuando son incompetentes, el margen cubital del carpo se subluxa a volar, el cúbito a dorsal y se produce una supinación radiocarpiana. Estas tres malalineaciones comportarán una disfunción cinemática de la rotación del antebrazo y de la capacidad cinética del mismo de soportar cargas.

3. Cinética del antebrazo

La cinética del antebrazo es la parte de la biomecánica que describe cómo se adaptan los

huesos que forman el antebrazo en relación a las fuerzas que lo atraviesan.

El antebrazo recibe cargas de todo tipo. Tanto si son el resultado de una fuerza que se transmite centrípetamente (del carpo hacia el codo) o centrífugamente (del codo hacia el carpo), las cargas van a producir unos desplazamientos que serán distintos, según sea la posición del antebrazo en el momento de la carga:

- Si es una carga axial sobre la unidad carpo-radio con el antebrazo vertical, el radio distal tendrá un gran protagonismo.
- Si el antebrazo está en posición horizontal quien tendrá el protagonismo será la cabeza del cúbito.

Las fuerzas de compresión vertical ponen a prueba la estabilidad longitudinal del antebrazo; las de carga horizontal ponen a prueba su estabilidad transversal.

3.1. Cinética del antebrazo durante la carga axial extrínseca sobre la muñeca

En condiciones normales, el antebrazo debe permitirnos mantener una carga axial sobre la muñeca sin que dicha carga colapse las articulaciones radiocubitales distal o proximal, en cualquier grado de rotación del antebrazo.

Ello se consigue distribuyendo las cargas axiales aplicadas sobre el radio distal hacia el cúbito proximal. De esta forma, la propia mor-

fología troclear en forma de gancho de la articulación cúbito-humeral facilita una mayor estabilidad longitudinal del antebrazo que la de la articulación radiocubital proximal de tipo trocoide.

Además, el ligamento trifascicular (deltoide) de la cara interna del codo está mejor diseñado para evitar el colapso articular que el ligamento cuadrado de Denucé, monoplanar, que une el cúbito al radio proximal o que el ligamento anular.

Los estudios biomecánicos clásicos de los efectos cinéticos de la carga axial sobre el antebrazo, fueron realizados sobre extremidades cadavéricas con el codo en extensión y bloqueo del varo-valgo de la articulación de dicha articulación (7). Posteriormente se empezó a valorar las transmisiones de fuerza de carga axial con el codo a 90° de flexión, sin bloqueo del varo-valgo fisiológico del codo asociado a la flexo-extensión y en diferentes grados de rotación del antebrazo (8-10).

Los resultados experimentales no acaban de ser uniformes, aunque sí pueden extraerse tres conclusiones:

- La carga axial del antebrazo tensa las bandas central y oblicua distal de la membrana interósea.
- Tras la carga axial ejercida en extensión de codo, las fuerzas máximas de presión articular se recogen a nivel de la articulación cúbito-humeral (más concretamente

la articulación entre apófisis coronoides y húmero). Este redireccionamiento de las fuerzas entre radio y cúbito se produce a través de la banda central de la MI (5), y comporta una migración proximal del cúbito que puede poner en riesgo su integridad osteoligamentosa si la energía de la carga axial es extrema

- En valgo de codo, la banda central de la MI se halla destensada y la banda oblicua proximal no es suficientemente potente para redireccionar las fuerzas de carga hacia la articulación cúbito-humeral (11); las presiones articulares se concentran en la articulación radiohumeral y el radio migra proximalmente.

El redireccionamiento de fuerzas de carga hacia la articulación cúbito-humeral es mayor en rotación neutra de antebrazo que en pronación o supinación (12).

La carga axial del antebrazo en valgo de codo y en pronación o supinación de antebrazo acarrea importantes fuerzas de compresión a nivel de la articulación radiohumeral que ponen en riesgo su estabilidad y su integridad osteoligamentosa.

3.2. Cinética del antebrazo durante la carga sobre la mano en posición horizontal del antebrazo

En condiciones normales, el antebrazo debe permitirnos mantener una carga a nivel de la mano, en posición horizontal del antebrazo, sin que dicha carga colapse las articulaciones radio-cúbito-carpiana o radiocubital proximal, en cualquier grado de rotación del antebrazo.

Según el grado de rotación del antebrazo, la fuerza transversal que atravesará la articulación radiocubital distal será más de tipo compresivo (en posición neutra) o de tipo “cizallamiento” en máxima pronación y supinación.

En rotación neutra, la articulación radiocubital distal es intrínsecamente estable: la superficie de contacto entre radio y cúbito es máxima y las fuerzas de compresión articular generadas por la carga también son máximas.

Cuando la superficie articular de contacto disminuye, tanto en pronación como en supinación, las fuerzas de compresión articular generadas por la carga, también son menores apareciendo, en cambio, unas importantes fuerzas de cizallamiento articular con efecto subluxante que pondrán a prueba a todos los mecanismos estabilizadores estáticos y dinámicos de la articulación radio cubital distal.

En supinación del antebrazo los estabilizadores de la articulación radio cubital distal puestos en tensión son el ligamento radio cubital dis-

tal dorsal, la cápsula articular volar y el músculo pronador cuadrado.

En pronación del antebrazo se tensan el ligamento radio cubital distal volar, la cápsula articular dorsal y el tendón del músculo ECU con su vaina propia.

Todas estas estructuras están ricamente inervadas y contienen numerosos mecanorreceptores (13,14).

La información mecánica que detectan dichos mecanorreceptores al ser sometidos a tensión se transmite eléctricamente al sistema nervioso central y a los músculos agonistas y antagonistas que participan en el control neuromuscular de la estabilidad de la articulación radiocubital distal.

Los músculos agonistas participan en la estabilización dinámica de la articulación radiocubital distal al generar fuerzas que aumentan la compresión a nivel articular. Son: el músculo *brachialis* (B), el músculo *abductor pollicis longus* (APL), el músculo *extensor pollicis brevis* (EPB), el músculo *pronator quadratus* (PQ) y el músculo *extensor carpi ulnaris* (ECU).

Los músculos antagonistas estabilizan dinámicamente a la articulación al disminuir la intensidad de las fuerzas de carga y cizallamiento que ésta soporta. Son: el músculo *brachioradialis* (Br) y el músculo *triceps* (T).

Así pues, los músculos que estabilizan dinámicamente la articulación radiocubital distal pueden ser lejanos (músculos que actúan sobre la articulación del codo) o locales. Algunos (B,

ECU, Br y T) se originan proximales al codo. Otros (APL, EPB y PQ) se originan sobre la propia membrana interósea.

APL, EPB y PQ se originan en las zonas próximas a las bandas de la membrana interósea con densa población de mecanorreceptores: podrán, pues, participar en los reflejos propioceptivos cortos, ligamento-musculares, de estabilización articular.

La estabilidad del antebrazo a la carga puede mejorarse con un tratamiento propioceptivo y de potenciación muscular.

Para ello, el sistema nervioso periférico del paciente debe ser normo funcionante (C5, C6, C7, nervio musculocutáneo, nervio radial, nervio interóseo anterior y nervio cubital).

La potenciación muscular debiera focalizarse tanto en la musculatura del codo (Br, B, T, ECU) como en la de la muñeca (PQ) y el pulgar (APL, EPB).

El tratamiento propioceptivo debiera realizarse a nivel del codo, de la radiocubital distal y de la muñeca, en diferentes grados de rotación del antebrazo.

4. Aplicaciones prácticas

El antebrazo es una unidad funcional, que no permite ser valorada y tratada cual si sus elementos fueran independientes los unos de los otros.

Su funcionalidad debe ser siempre valorada y desde un punto de vista cinemático (movimiento) y cinético (carga).

Del mismo modo, el paciente verbalizará su disfunción como: dolor y/o limitación de la movilidad y/o pérdida de fuerza.

La disfunción cinemática del antebrazo repercute en los movimientos de pronosupinación.

La disfunción cinética del antebrazo altera la forma en que se transmiten las cargas a través de la muñeca según sea el grado de pronosupinación existente.

Durante la inspección física del paciente, la protrusión dorsal de la extremidad distal del cúbito cuando el antebrazo se halla pronación puede ser secundaria a una disfunción de la articulación radiocubital distal o a una de la articulación cubito carpiana. La presencia de una supinación asociada de la articulación radio carpiana ayudará a diferenciarlas.

El tratamiento propioceptivo y de potenciación muscular de la disfunción de las articulaciones del antebrazo requiere de una integridad del sistema nervioso y de la normotensión de las diversas estructuras ricas en mecanorreceptores (banda oblicua proximal, banda oblicua distal, complejo del fibrocartilago triangular, ligamentos cúbitocarpianos).

El tratamiento de control neuromuscular del antebrazo debe incluir a los músculos del codo.

La inmovilización postoperatoria de la articulación radiocubital distal o de la cúbitocarpiana con una férula tipo Münster, permite el trabajo muscular concéntrico precoz de los músculos del codo (T, B, Br) y del pulgar (APL, EPB) combinado con el trabajo isométrico precoz de los músculos PQ y ECU.

En etapas pre o posquirúrgicas, el PQ debiera ser potenciado en supinación de antebrazo y el ECU en pronación del mismo (siguiendo el plano del *reverse-dart throwing*) (15).

Durante la inmovilización, el tratamiento propioceptivo precoz puede iniciarse a través de programas de “Cross-Education”. Tras su retirada, puede iniciarse los programas de trabajo propioceptivo consciente e inconsciente (16).

Una vez alcanzada la potenciación muscular de PQ, ECU, APL y EPB, puede iniciarse la activación muscular refleja que permitirá el trabajo propioceptivo consciente e inconsciente simultáneo (17).

Las terminaciones nerviosas que predominan en el complejo del fibrocartilago triangular y en los ligamentos cúbitocarpianos son los nociceptores: por ello, el principal síntoma de la disfunción de la articulación radiocubital distal y de la cúbitocarpiana es el dolor mecánico. Dicho dolor traduce la persistencia de una disfunción articular durante o tras el tratamiento (3).

5. Referencias

1. Casanovas X, Ferreres A, Del Valle M, Perez-Abad M, Noriego D, Rodríguez-Baeza A. Study of intraarticular pressures in the elbow. *Journal of biomechanics*. 2019.
2. Casanovas X, Ferreres A, Del Valle M, Perez-Abad M, Noriego D, Rodríguez-Baeza A. Design of a biomechanical model for the study of intra-articular pressures in the elbow joints. Aceptado para publicación en el *Journal of Wrist Surgery*.
3. Manson TT, Pfaeffle HJ, Herdon JH y cols. Forearm rotation alters interosseous ligament strain distribution. *J Hand Surg Am*. 2000; 25(6); 1058-63.
4. Rein, S., Esplugas, M., Garcia-Elias, M., Magin, T.M., Randau, T.M., Siemers, F. and Philipps, H.M. (2020), Immunofluorescence analysis of sensory nerve endings in the interosseous membrane of the forearm. *J. Anat.*, 236: 906-915.
5. Dodds SD, Yeh PC, Slade III JF. Essex-Lopresti Injuries. *Hand Clin*. 2008; 24: 125-137.
6. Arimitsu S, Moritomo H, Kitamura T, Berglund LJ, Zhao K, An KN y cols. The Stabilizing Effect of the Distal Interosseous Membrane on the Distal Radioulnar Joint in an Ulnar Shortening Procedure: A Biomechanical Study. *J Bone Joint Surg*. 2011; 93 (21): 2022-2030.
7. Halls AA, Travill A. Transmission of pressures across the elbow joint. *Anat Rec*.1964; 150: 243-247.
8. Morrey B.F AKN. Stability of the elbow Osseous constraints. *J Shoulder Elb Surg*. 2005;14(Suppl S):174S-178S.
9. Chantelot C., Wavreille G., Dos Remedios C., Landejerit B., Fontaine C. HH. Intra-articular compressive stress of the elbow joint in extension: an experimental study using Fuji films. *Surg Radiol Anat*. 2008;30(2):103-11.
10. 10. Lim Y.W., van Riet R.P., Mittal R. BGI. Pattern of osteophyte distribution in primary osteoarthritis of the elbow. *J Shoulder Elbow Surg*. 2008;17(6):963-6.
11. Markolf KL, Dunbar AM, Hannani K. Mechanisms of load transfer in the cadaver forearm: role of the interosseous membrane. *J Hand Surg Am*. 2000; 25(4): 674-682.
12. Pfaeffle HJ, Stabile KJ, Li ZM y cols. Reconstruction of the interosseous ligament restores normal forearm compressive load transfer in cadavers. *J Hand Surg (Am)*. 2005; 30(2): 319-325.
13. Rein S, Semisch M, Garcia-Elias M, Lluch A, Zwipp H, Hagert E. Immunohistochemical Mapping of Sensory Nerve Endings in the Human Triangular Fibrocartilage Complex. *Clin Orthop Relat Res*. 2015; 473: 3245–3253.
14. Semisch M, Hagert E, Garcia-Elias M, Lluch A, Rein S. Histological assessment of the triangular fibrocartilage complex. *J Hand Surg Eur*. 2016; 41(5): 527-533.
15. Garcia-Elias M. Wrist biomechanics and Instability: Wrist dart-throwing motion updated en

IFSSH Scientific Committee on Anatomy and Biomechanics. 2013.

16. Magnus C, Arnold CM, Johnston G, Dal-Bello Haas V, Basran J, Krentz J y cols. Cross-Education for Improving Strength and Mobility After Distal Radius Fractures: A Randomized

Controlled Trial. Archives of Physical Medicine and Rehabilitation. 2013; 94: 1247-1255.

17. Hagert E. Proprioception of the Wrist Joint: A Review of Current Concepts and Possible Implications on the Rehabilitation of the Wrist. J Hand Therapy. 2010; 23(1): 2-17.