

Tema 6

Biomecánica del carpo y su aplicación clínica

Mireia Esplugas y Marc García Elías

I. Cinemática del carpo

La cinemática del carpo es la parte de la biomecánica que describe como cambia la alineación carpiana durante los movimientos de la muñeca.

La alineación carpiana depende de la orientación espacial de las carillas articulares, los ligamentos articulares y las inserciones de los músculos que controlan la movilidad.

La muñeca posee una gran movilidad. Esquematizaremos la alineación carpiana durante tres movimientos de la muñeca:

- las inclinaciones laterales,
- las desviaciones en el plano perpendicular al eje del antebrazo (flexo-extensión),
- las desviaciones en un plano oblicuo al eje del antebrazo (“dart throwing motion”).

I.1. Inclinación radial y cubital de la muñeca

1.1.1. Flexo-extensión de la primera hilera del carpo

La inclinación radial y cubital de la muñeca provoca una flexo-extensión de la hilera proximal del carpo.

- Inclinación radial: flexión de la hilera proximal del carpo. El escafoides se flexiona para adaptarse a la disminución del espacio que le queda entre la estiloides del radio y la segunda hilera del carpo y arrastra consigo toda la hilera proximal en flexión.
- Inclinación cubital: extensión de la hilera proximal del carpo. El escafoides se despliega arrastrado por la segunda hilera del carpo y arrastra consigo a toda la hilera proximal en extensión.

La inclinación radial y cubital de la muñeca induce movimiento tanto a nivel de la articulación radiocarpiana como de la mediocarpiana.

En condiciones normales, la hilera proximal pasa de la flexión en inclinación radial a la extensión en inclinación cubital con un movimiento suave, armónico y progresivo. Hablamos de disfunción cinemática de la hilera proximal del carpo cuando este movimiento deja de ser armónico, presentando resaltes bruscos cuando la muñeca llega a su inclinación cubital máxima (esta condición era antaño nombrada como “inestabilidad mediocarpiana”) (1).

1.1.2. Flexo-extensión dentro de la primera hilera del carpo (2,3)

A nivel de la articulación mediocarpiana, el movimiento de flexo-extensión de la hilera proximal del carpo se produce, principalmente, a nivel de la articulación existente entre semilunar y hueso grande (articulación lunocapitate). La morfología de dicha articulación depende del tipo de semilunar.

Existe dos tipos distintos de hueso semilunar (tipo 1 o 2) según el número de carillas articulares que dicho hueso presenta a nivel de la articulación mediocarpiana.

- El semilunar tipo 1, presente en un tercio de la población, tiene una sola carilla articular distal para el hueso grande.

- El semilunar tipo 2, presente en el resto de la población, tiene dos carillas articulares: una para el hueso grande y otra para el hueso ganchoso.

En los carpos con un semilunar tipo 2, la flexo-extensión de la primera hilera del carpo inducida por las desviaciones laterales de la muñeca, se asocia, también, a movimiento entre los huesos de la primera hilera. En estos casos, se habla de una flexo-extensión de la primera hilera del carpo “en columnas”.

En cambio, en los carpos con un semilunar tipo 1, la flexo-extensión de la primera hilera del carpo es en bloque, sin que se genere movimiento interóseo asociado. En estos casos, se habla de una flexo-extensión de la primera hilera del carpo “en fila”.

1.1.3. ¿Cómo se mueve la primera hilera del carpo cuando el ligamento escafosemilunar no actúa (roto o estirado)?

Siempre y cuando los ligamentos que unen el escafoides a la hilera distal del carpo (ligamento escafo-capitate y escafo-trapezotrapezoides) sigan intactos, el escafoides se moverá arrastrado por la segunda hilera del carpo mientras que el resto de la primera hilera del carpo no podrá flexionarse nunca y se mantendrá extendida siempre.

1.2. Flexo-extensión de la muñeca

Ningún tendón de los músculos que actúan sobre la movilidad de la muñeca se inserta sobre el carpo.

Los músculos motores de la muñeca se insertan en la base de los metacarpianos (*abductor pollicis longus* (APL), *extensor carpi radialis longus* (ECRL), *extensor carpi radialis brevis* (ECRB), *extensor carpi ulnaris* (ECU), *flexor carpi radialis* (FCR) excepto el *flexor carpi ulnaris* (FCU) que se inserta en el hueso pisiforme (considerado un hueso accesorio del carpo).

Debido a la localización de la inserción de los tendones distales musculares, la flexo-extensión de la muñeca se inicia siempre con la flexo-extensión de la hilera distal del carpo.

La hilera proximal del carpo no inicia su flexo-extensión hasta que la posición conseguida por la hilera distal pone en tensión a los ligamentos de la articulación mediocarpiana generando, secundariamente, fuerzas de compresión a nivel de la articulación mediocarpiana que arrastran a la hilera proximal.

La movilidad de la hilera proximal depende únicamente de la movilidad de la hilera distal del carpo: por ello la hilera proximal recibe el nombre de segmento intercalado.

La hilera proximal del carpo no inicia su movimiento de flexo-extensión hasta que la hilera proximal del carpo ya se halla o muy flexionada o muy extendida.

Alrededor de la posición neutra de la muñeca solo flexo-extensiona la articulación medio carpiana mientras que la radio carpiana casi no tiene movimiento. El escafoides y el semilunar empiezan a extenderse o a flexionarse solo en los últimos grados de movimiento.

La mayoría de la flexo-extensión de la muñeca se produce, principalmente, a nivel de la articulación mediocarpiana.

Sin embargo, la morfología y la angulación biplanar de la superficie articular distal de escafoides y semilunar (a nivel de la articulación mediocarpiana) así como la disposición de los ligamentos mediocarpianos provocan que la flexo-extensión pura de la articulación medio carpiana sea limitada.

Afin de que la flexión y la extensión de la articulación mediocarpiana sean máximas y sin restricciones, éstas deben producirse en un plano oblicuado al eje longitudinal del antebrazo. Este plano de movimiento es el llamado “dart throwing” (movimiento del lanzador de dardos).

1.3. Movimiento del lanzador de dardos de la muñeca

La muñeca sigue un eje de movimiento que se dirige desde la flexión combinada con la inclinación cubital de la muñeca hasta la extensión combinada a la inclinación radial.

Este movimiento se realiza a través de la acción de los músculos ECRL y FCU.

Es el movimiento más habitual de la muñeca, el que utilizamos para casi todas las actividades de la vida diaria

En un carpo sano, la primera hilera del carpo participa muy poco en este movimiento: escafoides y semilunar no rotan y solo se trasladan mínimamente.

En cambio, en los casos en que escafoides y semilunar se hallan desconectados por lesión del ligamento escafosemilunar, el escafoides rota sustancialmente mientras que el semilunar permanece inmóvil.

Por lo tanto, la cinemática del movimiento del lanzador de dardos es ligamento escafosemilunar dependiente (4).

2. Cinética del carpo

La cinética del carpo es la parte de la biomecánica que describe cómo se altera la alineación carpiana bajo carga, tracción o torsión de la muñeca.

Las fuerzas transmitidas sobre el carpo inducen 6 grados de movilidad de los huesos carpianos:

- Flexión-Extensión.
- Inclinación radial-Inclinación cubital.
- Rotación interna (pronación)
- Rotación externa (supinación) (5).

La muñeca es una articulación capaz de aguantar fuerzas de tracción, torsión y compre-

sión, en diferentes grados de rotación del antebrazo, sin colapsarse bajo ellas. Por lo tanto, la muñeca es una articulación estable bajo carga.

Estudiaremos la cinética del carpo en dos condiciones de aplicación fuerzas:

- Fuerzas de compresión axial.
- Fuerzas por la acción muscular.

2.1. Carga axial de la muñeca

Bajo una carga axial, el carpo adapta su alineación en busca de una coaptación articular que permita mantenerse estable. Si no lo consiguiera, el carpo sucumbiría bajo la carga y se colapsaría.

Hasta hace poco, se creía que una carga axial sobre un carpo sano generaba una alineación carpiana que venía tan solo determinada por la orientación espacial de las carillas articulares intercarpianas y de sus ligamentos articulares (6).

Sabemos actualmente, que dicha alineación depende también de los ligamentos cúbito carpianos, los radiocubitales distales y el radiopiramidal dorsal (7) y que la rotación del antebrazo la modifica.

Bajo una carga axial, el hueso escafoides se flexiona pivotando alrededor del ligamento radioescafo-capitate. La orientación espacial de este ligamento provoca que el escafoides, además de flexionarse, también rote en pronación intracarpiana.

Los potentes ligamentos mediocarpianos que unen el escafoides a la hilera distal del carpo, arrastran a ésta en pronación.

En este momento, la morfología helicoidal de la superficie articular pirámido-ganchoso y la tensión de los ligamentos mediocarpianos cubitales arrastran al hueso piramidal en extensión y supinación.

Escafoides y semilunar rotan en sentidos contrarios hasta que se ponen en tensión los ligamentos interóseos escafosemilunar y lunopiramidal.

Finalmente, todo el carpo se traslada en dirección cubital siguiendo la inclinación de la superficie articular del radio hasta que se tensan los ligamentos que unen el radio al semilunar y al piramidal (5).

Si el ligamento escafosemilunar es incompetente (roto o destensado), el escafoides sucumbirá a la flexión, la pronación y la traslación dorsoradial mientras que el tándem piramidal-semilunar se mantendrán en extensión y supinación (8).

Si el ligamento lunopiramidal es incompetente, toda la hilera proximal del carpo se colocará en pronación y flexión, sobre todo si todos los demás ligamentos estabilizadores del hueso piramidal también son incompetentes (9).

Para contrarrestar todos estos desplazamientos óseos de adaptación a la carga axial, se requiere de todo un conjunto de ligamentos que se tensen de forma isodinámica con cada adaptación ósea intracarpiana para limitar su despla-

zamiento y permitir la coaptación del carpo y evitar así su colapso.

Los ligamentos que estabilizan el carpo bajo carga axial son los llamados Ligamentos Isodinámicos Anti-Pronación (10). Son los ligamentos: escafocapitate, escafosemilunar dorsal, escafopiramidal, lunopiramidal volar y radioescafofocapitate.

Forman un conjunto ligamentoso que abraza al carpo de forma helicoidal y evita la pronación excesiva de la hilera distal del carpo bajo la carga.

Los ligamentos anti-pronación se tensan isodinámicamente cuando la hilera distal del carpo pronada, el escafoides se flexiona y pronada, el piramidal se extiende y supina y el carpo se traslada cubitalmente para evitar el colapso carpiano.

Los ligamentos no son simples cables de unión interósea. Contienen diferentes tipos de mecanorreceptores que se activan cuando cada ligamento es puesto bajo tensión. Su activación pone en marcha los reflejos propioceptivos ligamento-musculares que dan lugar al control neuromuscular (11).

El control neuromuscular tiene como finalidad última evitar el colapso articular a través de la respuesta muscular tanto de los músculos agonistas y como de los antagonistas (12, 13).

El colapso del carpo bajo una carga axial no es causado por la lesión de un único ligamento. Solo aparecerá en caso de una deficiencia de gran parte del sistema ligamentoso anti-pronación.

La rotación del antebrazo modifica la alineación carpiana bajo la carga axial. Los ligamentos radiocubitales distales, los cúbitocarpianos y el ligamento radiopiramidal dorsal influyen en la estabilidad ligamentosa carpiana bajo carga axial.

La pronación del antebrazo invierte completamente la alineación que el carpo adopta bajo la carga axial, tanto si el ligamento escafosemilunar se halla íntegro como si no.

La supinación del antebrazo, tan solo la modifica cuando el ligamento escafosemilunar es incompetente (14).

2.2. Carga muscular de la muñeca

Los músculos motores de la muñeca no solo provocan su flexión, su extensión o su inclinación. Su contracción induce también una rotación la hilera distal del carpo en pronación (rotación interna) o en supinación (rotación externa) a través de la articulación mediocarpiana.

Podemos dividir a los músculos motores de la muñeca en dos grupos:

- Los músculos supinadores: APL, ECRL, ECRB.
- El músculo pronador intracarpiano: ECU (5,13).

Todos ellos, con su acción sobre la hilera distal del carpo y la articulación mediocarpiana,

controlan la posición de los huesos de la primera hilera carpiana, aunque ninguno de ellos se inserte sobre la misma:

- La pronación mediocarpiana alinea la articulación lunotriquetral y disalinea la escafolunar.
- La supinación mediocarpiana hace justo el contrario (5,13).

Todos ellos son el eslabón del intrincado control propioceptivo y neuromuscular que estabiliza dinámicamente, a través del sistema sensorimotor, a las articulaciones intracarpianas:

Cuando la muñeca es sometida a una carga axial (que induce una pronación mediocarpiana), se activan los músculos supinadores intracarpianos y se inhiben los músculos pronadores mediocarpianos (12).

La pronosupinación del antebrazo modifica la forma en la que los músculos controlan la cinética del carpo, tanto si los ligamentos escafosemilunares están intactos como si no lo están (7).

2.2.1. Efecto de la carga muscular de la muñeca sobre la cinética carpiana

2.2.1.1. En rotación neutra de antebrazo

La carga simultánea de todos los músculos motores de la muñeca (APL, ECRL, FCU, FCR,

ECU) conlleva una supinación mediocarpiana, una supinación del escafoides y una extensión del piramidal (5,6,13).

La carga aislada de los músculos APL y ECRL induce una supinación mediocarpiana y una extensión del escafoides (5,13).

La carga aislada del músculo ECU provoca una pronación mediocarpiana que alinea la articulación piramidal-ganchoso induciendo una extensión del hueso piramidal (9).

La carga aislada del músculo ECU provoca una pronación mediocarpiana que desalinea la articulación escafosemilunar (9).

La carga simultánea de los músculos extensores radiales de la muñeca (ECRL, ECRB) y de los músculos supinadores intracarpianos (APL, ECRL, ECRB) induce una supinación mediocarpiana que alinea el espacio escafosemilunar (7).

La carga simultánea de los músculos inclinadores cubitales de la muñeca (ECU y FCU) desalinea el espacio articular escafosemilunar cuando su ligamento es deficiente (7).

2.2.1.2. *En pronación de antebrazo (7).*

La carga aislada de los músculos APL y ECRL induce una supinación mediocarpiana.

La carga aislada del músculo ECRB induce una mala alineación del espacio escafolunar.

La carga aislada del músculo ECU induce una mala alineación del espacio escafosemilunar cuando su ligamento es incompetente.

La carga simultánea de todos los 6 músculos motores de la muñeca (APL, ECRL, ECRB, FCU, FCR, ECU) provoca una intensa supinación del escafoides y de la articulación mediocarpiana.

El efecto de supinación mediocarpiana de los músculos supinadores intracarpianos (APL, ECRL, ECRB) y de los músculos extensores radiales de la muñeca (ECRL, ECRB) se ve muy intensificada con su carga simultánea.

La carga simultánea de los músculos que inclinan la muñeca a cubital (ECU y FCU) induce una mala alineación del espacio articular escafosemilunar cuando su ligamento es deficiente.

2.2.1.3. *En supinación de antebrazo (7)*

Ningún músculo cargado de forma aislada o de forma conjunta consigue alinear la articulación escafosemilunar.

3. Aplicación clínica

En el tratamiento de las lesiones ligamentosas intracarpianas debemos tener en cuenta tanto la cinética como la cinemática del carpo, aunque ambas conviven en la vida real.

3.1. Aplicación clínica de la cinética carpiana

El músculo ECU es el único capaz de controlar una flexión anómala de la primera hilera del

carpo. Por lo tanto, en la disfunción de la hilera proximal del carpo en flexión, que se manifiesta clínicamente durante las inclinaciones laterales de la muñeca, la potenciación del músculo ECU es beneficiosa.

En los pacientes con patología de los ligamentos escafosemilunar o lunopiramidal, las inclinaciones laterales precoces de la muñeca no son beneficiosas, sobre todo en los pacientes que poseen un semilunar tipo 2.

En los pacientes afectados de una fractura de la superficie distal del radio, las inclinaciones de la muñeca beneficiarán la movilidad de la articulación radio carpiana sin infligir fuerzas de carga axial que pudieran afectar a la reducción de la superficie articular.

En los pacientes con lesiones de los ligamentos interóseos de la hilera proximal del carpo, la flexo-extensión completa de la muñeca debiera postponerse hasta que se hayan superado las fases de reparación tisular ligamentosa. Debiera, sin embargo, alentarse la flexo-extensión submáxima de la muñeca, para generar movilidad precoz tanto en la articulación radiocarpiana como en la articulación mediocarpiana.

Si tras la reparación ligamentosa escafosemilunar, la articulación escafolunar se halla firmemente estabilizada, la movilidad de la muñeca en el plano oblicuo del “dart throwing” puede iniciarse desde las primeras etapas de la rehabilitación postoperatoria. Al contrario, si la estabilidad posquirúrgica de la articulación es du-

da, debiera retrasarse hasta pasada la fase de reparación tisular.

3.2. Aplicación clínica de la cinemática carpiana

La pronación del antebrazo ofrece la máxima protección a la articulación escafosemilunar. Es la posición idónea durante el tratamiento propioceptivo y de control muscular encaminados a la estabilización dinámica de dicha articulación.

La supinación del antebrazo pone en riesgo continuo la alineación de la articulación escafosemilunar: es su rotación de antebrazo enemiga.

La competencia de los ligamentos radiocubitales distales, los cubitocarpianos y el ligamento radiopiramidal dorsal influyen en la estabilidad carpiana bajo carga muscular.

La potenciación isométrica de los músculos ECRL y ECRB en pronación del antebrazo puede estabilizar dinámicamente el espacio escafosemilunar.

La potenciación isométrica del músculo APL en rotación neutra del antebrazo puede estabilizar dinámicamente el espacio escafosemilunar.

La potenciación isométrica del músculo ECU en rotación neutra o supinación del antebrazo puede estabilizar el espacio lunopiramidal.

La potenciación isométrica del músculo ECU desestabiliza el espacio escafolunar en cualquier rotación del antebrazo.

4. Conclusiones finales

Si el sistema sensorimotor del paciente funciona correctamente, la rotura de un ligamento intracarpiano puede ser asintomática; en este caso, puede no estar indicada su reparación quirúrgica.

El tratamiento de la inestabilidad ligamentosa intracarpiana no debe basarse solo en los li-

gamentos. Los músculos tienen un importante rol estabilizador. El control neuromuscular puede evitar la necesidad de la reparación quirúrgica ligamentosa.

En caso de no poder evitarse la indicación quirúrgica, el control neuromuscular de la inestabilidad intracarpiana tiene un papel fundamental tanto en el período prequirúrgico como en el postoperatorio.

5. Referencias

1. Garcia-Elias M. The non-dissociative clunking wrist: a personal view. *J Hand Surg Eur.* 2008; 33: 698-711.
2. Craigen MA, Stanley JK. Wrist kinematics. Row, column or both? *J Hand Surg Br.* 1995; Apr 20(2):165-70.
3. Ardouin L, Garcia-Elias M. Relationship between midcarpal inclination angle and scaphoid kinematic. *Chir. Main.* 2012; Jun 31(3): 138-41.
4. Garcia-Elias M, Alomar X, Monill J. Dart-throwing motion in patients with SL instability: a dynamic 4D TC study. *J Hand Surg Eur.* 2014; May 39(4): 346-52.
5. Salvà-Coll G, Garcia-Elias M, León-López M, Llusà-Pérez M, Rodríguez-Baeza A. Effects of forearm muscles on carpal stability. *J Hand Surg Eur.* 2011; 36: 553-559.
6. Kobayashi M, Garcia-Elias M, Nagy L y cols. Axial loading induces rotation of the proximal carpal row bones around unique screw-displacement axes. *J Biomech.* 1997; 30:1165-1167.
7. Esplugas M. Tesis doctoral: Influència de la pronosupinació del avant-braç sobre l'eficàcia estabilitzadora dels músculs que controlen la cinètica carpiana. Estudi experimental en el cadàver humà, abans i després de seccionar els lligaments escafolunars. Universitat de Barcelona.
8. Salvà-Coll G, Garcia-Elias M, Hagert E. Scapholunate instability: proprioception and neuromuscular control. *J Wrist Surg.* 2013; 2: 136-140.
9. León-López M, Salvà-Coll G, Garcia-Elias M, Lluch-Bergadà A, Llusà-Pérez M. Role of the extensor carpi ulnaris in the stabilization of the lunotriquetral joint. An experimental study. *J Hand Ther.* 2013; 26: 312-317.
10. Garcia-Elias M, Puig de la Bellacasa I, Shouten C. Carpal ligaments: a functional classification. *Hand Clinics.* 2017;33 (3): 511-520.
11. Hagert E, Garcia-Elias M, Forsgren S. General innervation pattern and sensory corpuscles in the scapholunate interosseous ligament. *Cells Tissues Organs.* 2004; 177: 47-54