

Comportamiento motor del miembro superior

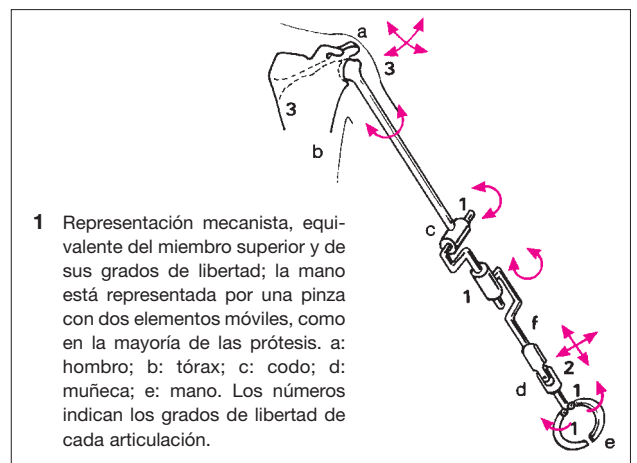
Y. Blanc
E. Viel

En el miembro superior, los métodos de análisis cinesiológico tomados de la cinemática y de la cinética no se han desarrollado tanto como en el miembro inferior. La magnitud de las rotaciones y la imposibilidad de medir correctamente la cinemática tridimensional del omóplato y los dedos siguen dando lugar a numerosas hipótesis en cuanto a la cinemática absoluta de los eslabones del miembro superior. Los datos cinéticos son muy escasos, y además son incontrolables, ya que generalmente se obtienen por deducción. Sólo la electromiografía (EMG) cinesiológica informa sobre las secuencias y la coordinación muscular a nivel del miembro superior. Es la única información objetiva, fácil de obtener sin causarle demasiada incomodidad a la persona, y adecuada para hacer estudios en situación de uso de la mano o la herramienta. Por todos estos motivos, en el presente artículo se han privilegiado las informaciones suministradas por la EMG, limitándose sin embargo a sus aspectos cualitativos a fin de simplificar su análisis.

Generalidades

El miembro superior constituye un sistema poliarticulado que tiene por límites el tórax y el pulpejo de los dedos. Las articulaciones intersegmentarias intermedias permiten que la mano entre en contacto con objetos o instrumentos a fin de asirlos, manipularlos o utilizarlos. Aunque de modo inespecífico, se suele asimilar el miembro superior a una cadena cinética (fig. 1) controlada por actividades musculares. Esta modelización simplificada y reductora tiene una connotación mecanista, sobre todo porque ignora la influencia que ejerce la visión sobre el comportamiento del miembro superior en los movimientos de aproximación y/o prensión. El análisis de las relaciones entre la visión y la sensibilidad cinestésica a lo largo de la maduración del sistema nervioso representa un importante capítulo del estudio neuropsicológico. Es probable que la relación entre somatognosia y sintonización de los sistemas perceptivos y motores visuales y manuales sea la condición previa para toda ejecución gestual, una vez que se ha establecido la ideación motora correspondiente a la finalidad de la acción. Luego, la realización depende de:

- las condiciones intrínsecas, como la motilidad articular, la fuerza, la resistencia muscular y eventualmente el dolor;
- las condiciones extrínsecas, es decir la posición de la persona con respecto al objeto y la altura, el volumen, el peso y la accesibilidad del mismo.



Cintura escapular

Se halla suspendida de la cabeza por la parte occipital del haz superior del trapecio, y de la columna vertebral por el resto de dicho haz, el levator scapulae y el rhomboideus. Las tensiones y/o las contracciones de los haces medianos e inferiores del trapecius, del serratus anterior, del pectoralis mayor y del pectoralis minor mantienen la cintura escapular apoyada contra el tórax. Los kinesiólogos, considerando que los músculos pectoralis minor y subclavicularis son accesorios en los movimientos gestuales, casi no han estudiado por EMG sus fases de actividad. La posición del omóplato y la orientación de la cavidad glenoidea dependen del equilibrio entre los músculos estabilizadores escapulares y los momentos de fuerza engendrados por la posición del miembro superior. Se trata de un equilibrio dinámico difi-

Yves BLANC: Moniteur-cadre de masso-kinésithérapie, laboratoire de cinésiologie, orthopédie, département de chirurgie, hôpital cantonal universitaire, CH-1211 Genève 14.

Eric VIEL: Docteur ès sciences, directeur de l'Ecole de cadres de kinésithérapie, «Bois Larris», 60260 Lamorlaye.

cil de estudiar, que cambia según el plano y el azimut de utilización de la mano, la velocidad de desplazamiento de los diferentes eslabones cinéticos, y el peso y el volumen de los objetos manipulados. Los estudios kinesiológicos mostraron que la cintura escapular y las articulaciones del hombro y del codo determinan, respectivamente, la orientación y la longitud del miembro superior en las maniobras de aproximación y prensión. Las articulaciones radiocubitales y de la muñeca acomodan el dedo y el pulgar según la posición, el volumen y el peso estimado del objeto, y según la manipulación prevista (la palabra «manipulación» se utiliza aquí en un sentido amplio, que abarca los conceptos de asir, desplazar y utilizar un objeto determinado).

Posición de reposo

El omóplato se sitúa entre la segunda y la séptima costilla. Crea un ángulo de 30 a 40° con el plano frontal, según la forma del tórax, y en proyección sobre el plano anteroposterior tiene una inclinación de 15° con respecto a la vertical. La posición de reposo de la cintura escapular sitúa el brazo a lo largo del cuerpo, en dirección groseramente vertical, en rotación interna de 5 a 10°. Visto desde atrás, el borde espinal del omóplato forma con la vertical un ángulo de vértice superior, de aproximadamente 3°, que indica una rotación axilar. Esta posición orienta la glena hacia arriba, factor importante de la estabilidad pasiva glenohumeral. La clavícula es oblicua hacia arriba y atrás, aproximadamente 10° con respecto a la horizontal y 30° con respecto al plano frontal.

Cinemática

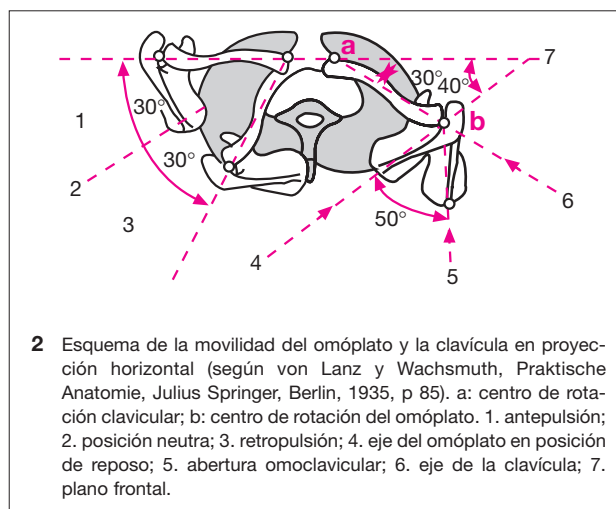
Para que la cinemática de la cintura escapular sea normal deben cumplirse dos condiciones: la integridad anatómica y la indolencia de las articulaciones esternocostoclavicular, acromioclavicular, omoserratorácica y glenohumeral. Esquemáticamente, se puede asimilar la clavícula a una varilla de regulación que, actuando como un rayo, mantiene el acromion a distancia del esternón. La movilidad potencial de las articulaciones esternocostoclavicular y acromioclavicular (fig. 2) es mucho mayor que la que se utiliza en la vida corriente. La rotación axial de la clavícula empieza a 55° de flexión y de abducción humerales. Inman [32] midió 40° (fig. 3 A), pero Rockwood [68], utilizando un método más preciso, registró 10° durante la elevación completa del brazo.

Durante la elevación del brazo, la clavícula se eleva aproximadamente 30°, valor máximo que se alcanza a partir de los 130° de flexión o de abducción del brazo (fig. 3 B). En realidad se trata de amplitudes indicativas, y lo que importa es recordar que se produce un desplazamiento clavicular. Por ahora no se cuenta con medios incruentos para efectuar un análisis cinemático tridimensional de la cintura escapular. Las correlaciones anatomoclínicas muestran que si la articulación acromioclavicular es móvil e indolora, una disminución en la movilidad de la clavícula modifica muy poco la movilidad máxima del brazo.

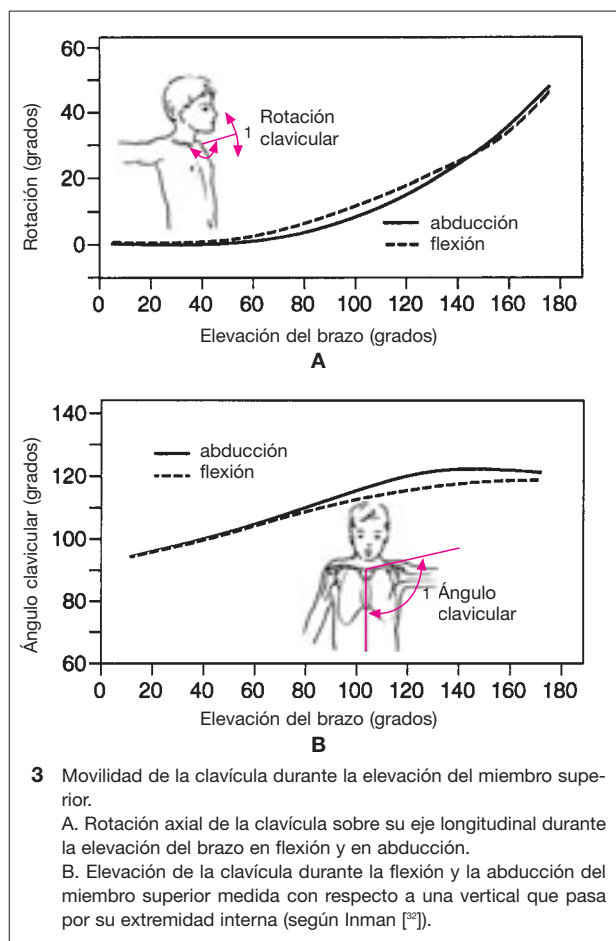
Articulación glenohumeral

Factores de cohesión glenohumeral

La subluxación inferior de la cabeza humeral se evita gracias a la participación de varios factores: la orientación de la glena, la dirección de los principales ligamentos glenohumerales, las actividades musculares posturales y el seudovacio intraarticular glenohumeral. Estos factores coexisten, y resulta imposible determinar en qué medida interviene cada uno de ellos.



2 Esquema de la movilidad del omóplato y la clavícula en proyección horizontal (según von Lanz y Wachsmuth, *Praktische Anatomie*, Julius Springer, Berlin, 1935, p 85). a: centro de rotación clavicular; b: centro de rotación del omóplato. 1. antepulsión; 2. posición neutra; 3. retropulsión; 4. eje del omóplato en posición de reposo; 5. abertura omoclavicular; 6. eje de la clavícula; 7. plano frontal.



3 Movilidad de la clavícula durante la elevación del miembro superior.
A. Rotación axial de la clavícula sobre su eje longitudinal durante la elevación del brazo en flexión y en abducción.
B. Elevación de la clavícula durante la flexión y la abducción del miembro superior medida con respecto a una vertical que pasa por su extremidad interna (según Inman [32]).

Orientación de la glena

Todavía no existe una buena explicación del mecanismo que previene la subluxación de la cabeza humeral hacia abajo [13, 54]. En 1959, Basmajian y Bazant [3] sugirieron que dicho mecanismo se basaría en la oblicuidad de la glena y su orientación hacia arriba (de 3 a 5° con respecto a la verticalidad). Tal oblicuidad cumpliría dos funciones: por un lado suministraría un apoyo inferior a la cabeza humeral, y por otro haría que ésta, al deslizarse, se aleje, poniendo en tensión la parte superior de la cápsula y del ligamento coracohumeral, así como los ligamentos glenohumerales medio e inferior [2]. Itoi et al [33], trabajando en preparaciones anatómicas, confirmaron la importancia que tienen la orientación de la glena y el mecanismo ligamentario de retención.

Pero Freedman [27], Poppen [61] y Perry [60] pusieron en tela de juicio la orientación de la cavidad glenoidea hacia arriba. En las condiciones de las pruebas radiográficas de Freedman [27] adoptadas por Poppen, la glena por lo general mira hacia abajo, con una oblicuidad de $5,29^\circ$, con $DE = \pm 6,77$ y extremos de -22° (oblicuidad hacia abajo) a $+12^\circ$ (oblicuidad hacia arriba). Sobre estas medidas influye la leve abducción que se le imprime al brazo para obtener placas de óptima calidad, y que lo alejan de la posición de reposo normal.

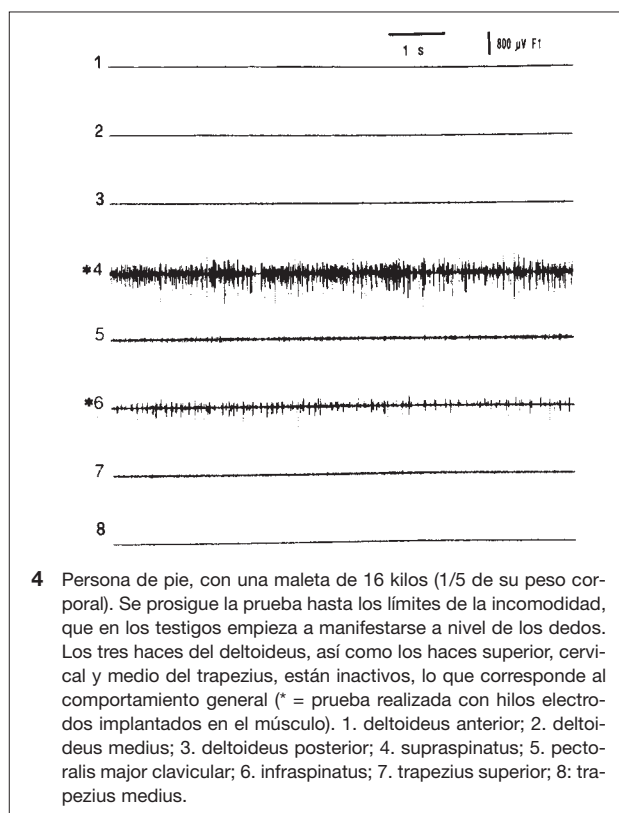
Actividades musculares posturales

Haciendo un análisis deductivo, Cotton [16] y Fairbank [23] sostuvieron que el miembro superior estaba suspendido por los músculos verticales escapulo-humerales: el deltoideus, el bíceps braquial y el tríceps braquial. Los registros electromiográficos de Basmajian y Bazant [3] demostraron que estos tres músculos no cumplen función alguna en la suspensión del miembro superior, ni siquiera cuando éste lleva una carga considerable. Pero sí registraron una moderada actividad del supraspinatus, que, por ser un músculo horizontal, no brinda una suspensión eficaz, sino que coapta la cabeza humeral dentro de la cavidad glenoidea [71]. Los registros de EMG cinesiológico practicados por los autores corroboran los resultados de Basmajian y Bazant [2] en personas normales y en otras que presentaban una inestabilidad glenohumeral con signo de la fosita positivo durante la tracción del húmero hacia abajo. La actividad postural del supraspinoso no es constante. Cuando existe, siempre es muy escasa, pero aumenta al llevar una carga. Los tres haces del deltoideus, el bíceps braquial y la porción larga del tríceps braquial, no presentan actividad eléctrica alguna, ni aun cuando la carga corresponde a 1/5 del peso corporal y se prosigue la prueba más allá del umbral de fatiga (fig. 4). La marcha cambia el comportamiento muscular. Los autores observaron que para transportar una maleta pueden emplearse dos estrategias. Una de ellas, que provoca una actividad fásica del deltoideus, consiste en caminar separando levemente el brazo del cuerpo para que la pierna no frote contra la maleta. La otra, que no solicita el deltoideus, exige una inclinación mucho mayor del tronco hacia el lado opuesto a la maleta, a fin de apoyar el antebrazo contra la cadera (fig. 5). En este caso parece muy probable que el peso sea soportado por los ligamentos [2] y por el freno del deslizamiento inferior de la cabeza humeral, que encuentra apoyo en la parte inferior de la cavidad glenoidea gracias a la coaptación provocada por la contracción constante del supraspinatus.

Seudovacío intraarticular glenohumeral

En 1901, trabajando sobre piezas anatómicas, Bugnion [8] demostró que la presión que existe dentro de la articulación glenohumeral es inferior a la atmosférica. Este vacío intraarticular relativo hace que el húmero pueda resistir a una tracción de 4 a 5 kilos. Cuando se lo suprime perforando la cápsula articular, la cabeza humeral se desliza de inmediato hacia abajo [42]. (Es importante señalar que durante esta experiencia no se respetó la orientación de la cavidad glenoidea hacia arriba.) Al restablecerse el pseudovacío la cabeza humeral vuelve a centrarse sin demora en la cavidad glenoidea. El descenso de la cabeza indica que el ligamento coracohumeral y la parte superior de la cápsula no están permanentemente tensos, como lo sugiere el hecho de que sea posible levantar los hombros sin que el húmero se coloque en abducción.

No hay modo de evaluar en qué medida interviene cada uno de los tres mecanismos mencionados. Sin embargo, la



4 Persona de pie, con una maleta de 16 kilos (1/5 de su peso corporal). Se prosigue la prueba hasta los límites de la incomodidad, que en los testigos empieza a manifestarse a nivel de los dedos. Los tres haces del deltoideus, así como los haces superior, cervical y medio del trapezius, están inactivos, lo que corresponde al comportamiento general (* = prueba realizada con hilos electrodos implantados en el músculo). 1. deltoideus anterior; 2. deltoideus medius; 3. deltoideus posterior; 4. supraspinatus; 5. pectoralis mayor clavicular; 6. infraspino; 7. trapezius superior; 8. trapezius medius.

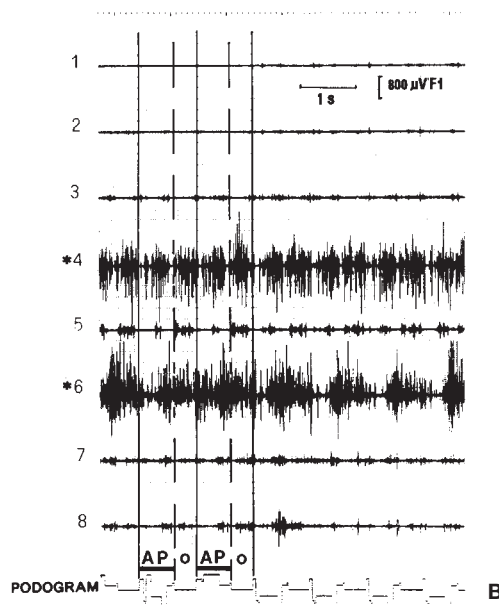
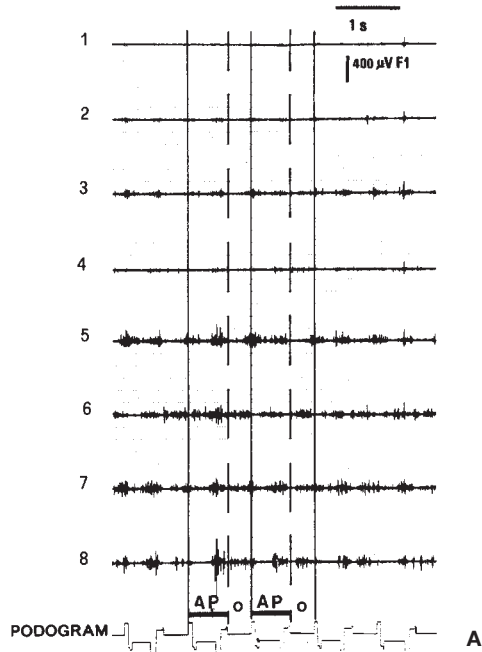
combinación potencialmente más eficaz es la orientación de la glena hacia arriba asociada a una contracción del supraspinatus, leve, pero con efecto de coaptación. Otro argumento a favor de Basmajian y Bazant [2] lo proveen algunos hemipléjicos, en los que se observa la concomitancia de una luxación inferior humeral con la glena orientada hacia abajo y una ausencia de actividad postural coaptadora del supraspinatus (Najenson et al [54], Chaco et al [13]).

Movilidad glenohumeral

Al elevar el brazo en el plano del omóplato (30° hacia adelante del plano frontal) la cápsula articular no sufre torsión alguna. Para ponerse la mano sobre la cabeza, un paciente con poca fuerza elegirá espontáneamente dicho plano [60]. En la globografía se observan con claridad las fronteras de la circunducción, pero no están representadas las rotaciones axiales humerales combinadas (fig. 6). Los «mecánicos» preconizan el uso de los ángulos de Euler [1, 52, 53, 58], de los ángulos cardánicos y de los «screw axis» para describir la cinemática humeral [66], pero el hecho de que no exista una correlación con los descriptivos y la terminología euclidiana de los clínicos limita mucho su alcance y su influencia. El empleo de los ángulos de Euler presupone una articulación sin traslación ni rodamiento, y ejes con movimientos perpendiculares entre sí. Por ello, An [1] recomienda el «screw axis», que resulta imprescindible cuando se considera la participación de los movimientos del omóplato en todos los desplazamientos del brazo.

Desplazamientos de la cabeza humeral

En los movimientos del brazo, la convexidad de la cabeza se desplaza dentro de la concavidad de la glena agrandada por el labrum. Los centros instantáneos de rotación (CIR) están situados en la cabeza humeral. Como consecuencia de la laxitud fisiológica, la cabeza no está fuertemente retenida

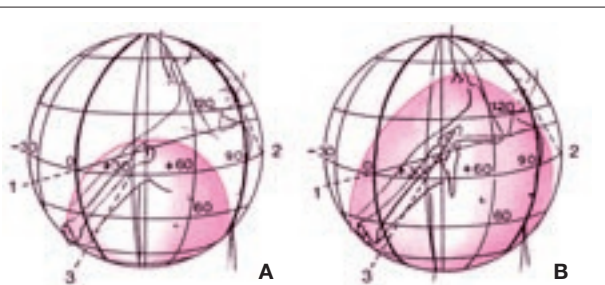


5 Electromiografía cinesiológica de una persona: (A) mientras camina a su velocidad habitual; (B) mientras transporta una maleta de 16 kilos a lo largo de un pasillo. El deltoides y el bíceps braquial están inactivos. La muy escasa actividad del haz posterior del deltoides y de la porción larga del tríceps braquial es igual a la observada sin maleta. La actividad de los músculos supraspinatus e infraspinatus se mide con electrodos implantados; la de los otros, con electrodos de superficie. Se observan dos estrategias para transportar carga. Según una de ellas, la persona inclina fuertemente el tronco del lado no portante y apoya el antebrazo contra la pelvis, solicitando muy poco la musculatura periscapular. Según la otra, la persona tiende a alejar la carga del cuerpo

mediante una abducción del húmero, lo que supone una fuerte sollicitación muscular del deltoides. Cuando se trata de transportar una carga a lo largo de grandes distancias prevalece la primera estrategia.

A: 1. deltoides anterior; 2. deltoides medius; 3. deltoides posterior; 4. bíceps braquial; 5. tríceps (porción larga); 6. trapecio superior; 7. trapecio medius; 8. trapecio inferior.

B: 1. deltoides anterior; 2. deltoides medius; 3. deltoides posterior; 4. supraspinatus; 5. pectoralis major clavicular; 6. infraspinatus; 7. trapecio superior; 8. trapecio medius. Ap: fase de apoyo; o: fase de oscilación; PODOGRAM: podograma (*: músculos estudiados mediante la implantación de hilos electrodos).



6 Representación globográfica (sin las rotaciones axiales) de la movilidad del brazo: (A), articulación glenohumeral sola; (B) articulación glenohumeral y cintura escapular combinadas (von Lanz y Wachsmuth, Praktische Anatomie, Julius Springer, Berlín, 1935, p. 93). 1. plano frontal; 2. plano sagital; 3. plano del omóplato.

brazo se considera que un deslizamiento de 3 mm hacia arriba es fisiológico. Cuando hay una insuficiencia del manguito de los rotadores (por ejemplo, por rotura), la cabeza puede deslizarse hacia arriba 1 cm o más. Dado que todos los movimientos de la vida cotidiana son tridimensionales, los CIR se agrupan en una o varias esferas, y resulta extremadamente difícil localizarlos.

Rotación externa del húmero

La rotación humeral externa «obligatoria», que posibilita la abducción completa [1], distiende los ligamentos glenohumerales inferiores [3], vuelve a centrar la cabeza en la cavidad glenoidea [2], y al mismo tiempo evita que el troquíter se enganche bajo la bóveda acromial. Registrando la actividad EMG de las dos porciones del bíceps braquial se observó que lo que en realidad activa la contracción del músculo es la posición del codo, del antebrazo y de la carga por desplazar, y no los movimientos glenohumerales. La participación de la porción larga de dicho músculo en la abducción y la rotación externa humeral es sólo una hipótesis que no encuentra confirmación clínica ni por EMG cuando los movimientos del antebrazo están bajo control.

En preparaciones anatómicas glenohumerales frescas en las que se conservó el manguito de los rotadores y se preservó la integridad capsuloligamentaria, la circunducción pasiva se acompaña de una rotación automática. Genoud y Hoffmeyer [28], en 10 preparaciones, midieron una rotación externa asociada máxima de $79^\circ \pm 12,3$ y una rotación interna de $11^\circ \pm 9$ cuando la circunducción se inicia por delante del omóplato. Si la circunducción se realiza de atrás hacia adelante, la rotación externa mide $43^\circ \pm 7,9$, y la interna $23,5^\circ \pm 13,2$. Dentro de este contexto, el método de

movilización humeral utilizado no influyó sobre la aparición y la amplitud de las rotaciones.

La rotación externa se acompaña de una fuerte contracción de la parte inferior del trapecio, probablemente para compensar el efecto de basculación axilar que sufre el omóplato al ser atraído por la parte posterior del deltoideus.

Fuerzas y estabilidad glenohumeral

Todos los modelos que se utilizan son incompletos, y las fuerzas glenohumerales calculadas tienen tan sólo un valor aproximativo [62], ya que hay demasiadas incógnitas musculares con respecto al número de ecuaciones, y la solución, por consiguiente, es «indeterminada». Las fuerzas resultantes casi siempre se estiman para diversos ángulos de abducción isométrica, en la situación en la que es más fácil establecer un modelo. Se calcula que el componente radial muscular compresivo es igual a 0,9 veces el peso del cuerpo cuando el brazo se encuentra a 90° de abducción, porque el momento del peso del miembro superior alcanza su nivel máximo [62]. El componente de cizallamiento hacia arriba llega a representar 0,4 veces el peso del cuerpo a 60° de abducción. Dado que la articulación carece de una estabilidad estructural intrínseca comparable a la de la cadera, la dirección de las fuerzas resultantes relativas a la superficie articular influye considerablemente sobre su estabilidad. Se observó que las luxaciones y subluxaciones voluntarias o involuntarias posteriores se producen y se reducen en un sector articular específico para cada persona. La cabeza «se escapa» hacia atrás porque la resultante movilizadora ya no está contrarrestada por el contacto entre la cabeza y la glena y/o por la tensión capsuloligamentaria (en particular la del ligamento glenohumeral inferior). El haz anterior del deltoideus es activo en toda elevación anterior y lateral del brazo, y en la dirección luxante más favorable, generalmente la inestabilidad se expresa en flexión y aducción humeral. Pese a una secuencia de contracción normal, los músculos infrapinatus y teres minor ya no resultan eficaces como barrera, porque cuando se produce o se reduce una luxación ninguno de los músculos periescapulares cambia su comportamiento EMG.

Ritmo escapulohumeral

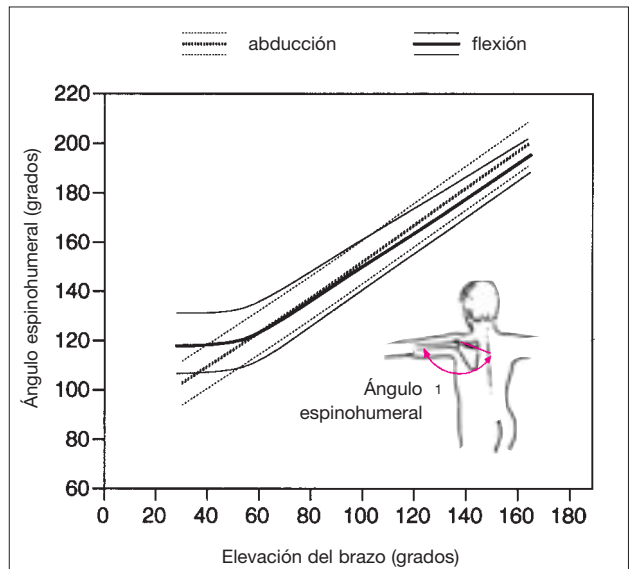
La elevación total del brazo es la suma de los movimientos glenohumerales y de los deslizamientos del omóplato sobre el tórax. El omóplato empieza a deslizarse en concomitancia con el desplazamiento del húmero, a razón de 3° en la articulación glenohumeral por cada 2° de deslizamiento del omóplato [19]. Sin embargo, este cociente promedio igual a 1,5:1 no es constante, ni tampoco se observa una relación lineal a lo largo de todo el movimiento (fig. 7) [60].

Dado que resulta imposible medir la cinemática tridimensional escapular (3D), se han de considerar las «anomalías del ritmo escapular» como una entidad clínica cualitativa.

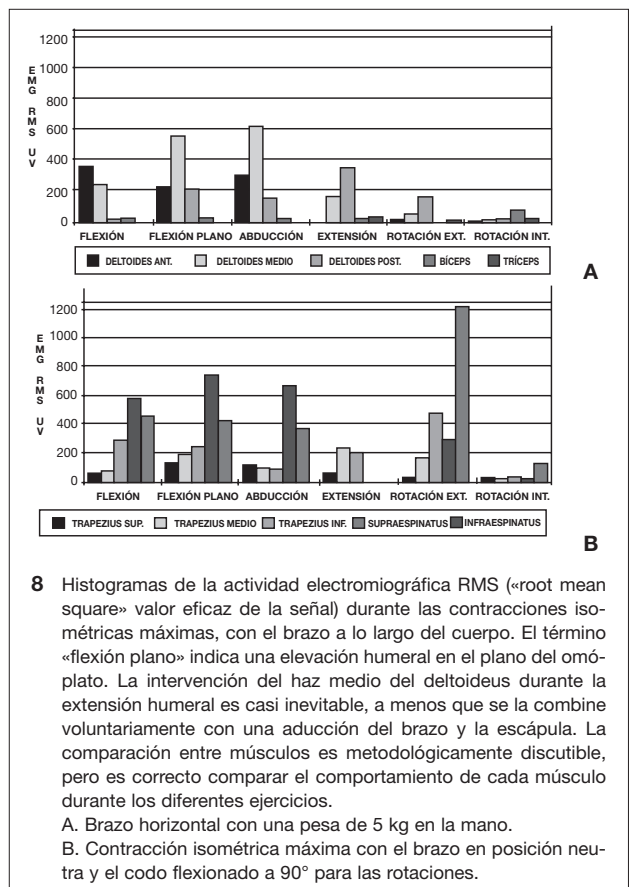
Actividades musculares (fig. 8 A, B)

Todas las afirmaciones que se enuncian a continuación están basadas en registros de EMG kinesiológica.

La movilidad del miembro superior depende más que nada de la fuerza y la resistencia de los tres haces del deltoideus, con punto fijo en el omóplato y la clavícula. La insuficiencia del trapecius, la del serratus anterior o la de los músculos del manguito de los rotadores tienen un efecto menos invalidante para el uso de la mano que la insuficiencia de los haces anterior y medio del deltoideus. Mediante una representación histográfica (fig. 8) se puede comparar la actividad de cada músculo en función de los ejercicios, y



7 Relación de las movibilidades del brazo y glenohumeral en la elevación del miembro superior. El ángulo espinohumeral representa el ángulo entre la espina del omóplato y el eje longitudinal del brazo. (Según Inman [63]).



8 Histogramas de la actividad electromiográfica RMS («root mean square» valor eficaz de la señal) durante las contracciones isométricas máximas, con el brazo a lo largo del cuerpo. El término «flexión plano» indica una elevación humeral en el plano del omóplato. La intervención del haz medio del deltoideus durante la extensión humeral es casi inevitable, a menos que se la combine voluntariamente con una aducción del brazo y la escápula. La comparación entre músculos es metodológicamente discutible, pero es correcto comparar el comportamiento de cada músculo durante los diferentes ejercicios.
 A. Brazo horizontal con una pesa de 5 kg en la mano.
 B. Contracción isométrica máxima con el brazo en posición neutra y el codo flexionado a 90° para las rotaciones.

definir así su nivel de participación. Sabiendo que existen ciertos límites metodológicos inherentes a la EMG, se deben interpretar con prudencia las pequeñas diferencias registradas entre los músculos. Pero aun así, los reeducadores pueden valerse de este tipo de histograma para seleccionar el ejercicio que tiene más posibilidades de reclutar tal o cual músculo o combinación muscular.

En reposo

Cuando los brazos cuelgan a lo largo del cuerpo en general no hay actividad en los músculos suspensorios de la cintura escapular y del miembro superior. Pero no ocurre exactamente lo mismo en algunas personas que presentan una muy leve contracción, permanente e inconsciente, del supraspinatus y de la porción occipital del haz superior del trapezius. Tal contracción desaparece de inmediato con la relajación activa.

Reacciones posturales anticipadas

Cualquier movimiento del miembro superior, aun cuando se limita a la articulación glenohumeral, provoca una adaptación postural anticipada, sin que influya la posición de pie o sentada del sujeto. Inmediatamente antes se registra una contracción de los músculos de los miembros inferiores y del tronco, contralateral con respecto al brazo que se eleva [79], lo que modifica la distribución de los apoyos sobre el suelo. Estas actividades EMG siempre aparecen un poco antes que las del deltoideus, y su distribución topográfica depende del plano de elevación del brazo. Las sinergias son estables y específicas del movimiento ejecutado, tanto en una misma persona a lo largo del tiempo como en diferentes personas. Puede considerarse que están «preprogramadas» y se activan a partir de una evaluación cognitiva de la tarea por realizar [34]. Estas actividades EMG anticipadas crean fuerzas de inercia que equilibran las del movimiento perturbador del equilibrio postural. Según Rojers et al [69], en los movimientos de aproximación, el biceps femoris ipsolateral se contrae antes que el deltoideus en el 96 % de las pruebas, y los paravertebrales contralaterales lo hacen en el 100 % de las pruebas. El hecho que esta anticipación sea 4 a 8 veces más precoz en los adultos jóvenes que en las personas de edad quizá guarde relación con la pérdida de velocidad de los movimientos.

Dualidad deltoideus-supraspinatus (cuadro I)

Desde el punto de vista funcional, el deltoideus representa tres músculos distintos (anterior, medio y posterior), que pueden ser sinérgicos, como en la abducción, o antagonistas, como en la flexión y la extensión humeral. La elevación en el plano del omóplato solicita principalmente los haces anterior y medio, mientras que el haz posterior, extensor-aductor, actúa cuando se quiere llevar la mano al bolsillo del pantalón o hacia el sacro. Cualquiera sea el plano de elevación, el supraspinatus o el deltoideus siempre son coactivos. En los movimientos rápidos se contraen sincrónicamente. En cambio, al comienzo de los movimientos lentos puede observarse un asincronismo aleatorio. No hay un músculo «de arranque», sino acciones estabilizadoras y dinámicas conjuntas y complementarias.

Los músculos del manguito de los rotadores tienen el mismo comportamiento temporal, y son sincrónicos con respecto a los recién mencionados.

Manguito de los rotadores

Está compuesto por cuatro músculos omohumerales (el subscapularis, el supraspinatus, el infraspinatus y el teres minor) que recubren parcialmente la parte superior de la articulación, de adelante hacia atrás. Además de actuar específicamente como rotadores humerales, varían la intensidad de su contracción durante los movimientos de elevación del brazo (fig. 9). La combinación de estas contracciones sinérgicas, cuyas fuerzas resultantes se orientan sucesivamente hacia arriba, horizontalmente y hacia abajo, refuerza la cohesión glenohumeral y mantiene centrada la cabeza humeral. Ello es coherente con el hecho de que una rotura masiva del manguito de los rotadores depara la pérdida de la abducción [38].

El supraspinatus y el infraspinatus intervienen activamente en todos los movimientos del húmero a partir de la posición de

reposo, salvo el primero en la rotación interna (fig. 10). Con excepción del subscapularis, dan lugar a un reclutamiento máximo en los movimientos que combinan la elevación y la flexión del codo, porque se oponen al momento rotador interno provocado por el peso del antebrazo y de la mano.

El subscapularis es activo en aducción rotación interna, pero también como freno de la rotación externa y de la extensión humeral en las posiciones «armadas» de los deportes de lanzamiento. Es sinergista de los otros rotadores internos: pectoralis major, teres major y latissimus dorsi [40, 41]. Como ocurre en todos los músculos planos, su actividad no siempre es homogénea. En rotación interna, la parte inferior es más activa que la superior, diferencia que se acentúa si el brazo pasa de 0° a 90° de abducción [36].

Es de destacar que, cualquiera sea la amplitud de la rotura del manguito, el esquema de actividad EMG casi no se modifica, o no lo hace en absoluto. Una vez más se comprueba que el programa se pone en marcha y se cumple sin gran influencia periférica.

Los bloques motores del deltoideus o del infraspinatus y el supraspinatus reducen la fuerza de abducción en un 50 % [14, 60], pero la fuerza del subscapularis y del teres minor alcanza para preservar el centrado de la cabeza humeral y permitir la abducción. En cambio, el bloqueo conjunto de ambos músculos impide la elevación del brazo; los músculos restantes no tienen fuerza suficiente para permitir el funcionamiento, así fuera elemental, de la articulación glenohumeral. Si el trapezius y el serratus anterior controlan la estabilidad del omóplato, todos estos músculos asociados al deltoideus pueden movilizar el húmero. Si los fijadores del omóplato están debilitados, este hueso se despega del tórax, mientras que los movimientos humerales carecen de fuerza y sufren una limitación aparente de su amplitud.

Bíceps braquial estabilizador de la cabeza humeral

Es probable que la porción larga del bíceps braquial participe en la estabilización de la cabeza humeral durante las flexiones del codo y/o las supinaciones poderosas [43]. Kumar et al [42], trabajando sobre especímenes, encontraron que después de haber seccionado la porción larga, la corta atrae el húmero hacia arriba, provocando un estrechamiento del espacio acromioclavicular igual a 3 mm como término medio, lo que equivale a un 15,5 %. Los registros EMG no muestran actividad de las porciones del bíceps con el brazo en elevación (fig. 8 A), salvo si está mal controlada la posición del antebrazo.

Actividades musculares alrededor de la cintura escapular

En reposo

Cuando no hay sollicitaciones físicas ni psicológicas, todos los músculos están relajados. Sin embargo, en algunas personas existe casi permanentemente, y de modo inconsciente, una contracción muy leve del haz occipital del trapezius superior. Para obtener la relajación basta con ordenarle que deje caer los brazos, lo que a veces hace que el acromion descienda unos milímetros.

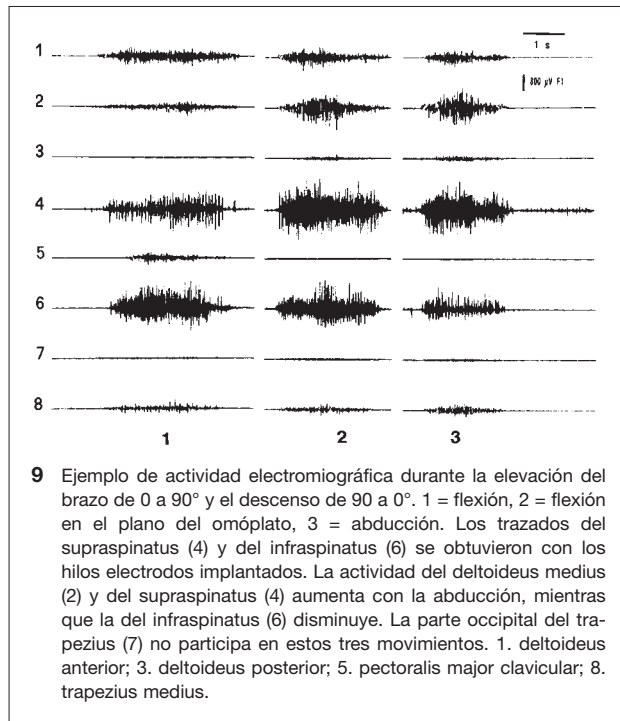
Durante la elevación del brazo

Puesto que el omóplato y la clavícula están suspendidos, su posición en reposo y su cinemática dependen del equilibrio entre los músculos que los vinculan directamente al tórax, a la columna vertebral y a la cabeza. La contracción de los músculos estabilizadores del omóplato es previa a la de los músculos motores del húmero (músculos del manguito de los rotadores y deltoideus). Las combinaciones se modulan

Cuadro I.– Participación muscular en diferentes movimientos y actividades (estimación electromiográfica).

	Supraspinatus	Deltoides		
		Anterior	Medio	Posterior
En reposo	±	-	-	-
Alzar hombros	+	-	-	-
Flexión	++	++	+	-
Elevación plano omóplato	++	+	++	±
Abducción	++	++	++	+
Rotación externa	++	-	-	±
Rotación interna	-	±	-	-
Sostener una carga	+	-	-	±
Llevar una carga	++	±	±	±

+ activo; ++ muy activo; ± actividad inconstante; - inactivo.



Cuando el miembro superior está en apoyo (bastones, transferencia), los músculos escapulares toracohumerales y omohumerales levantan el cuerpo entre los omóplatos e impiden que la cabeza humeral se sitúe bajo el acromion. Reis et al [67] estudiaron en 12 personas el músculo subclavius, que estabiliza la articulación esternoclavicular controlando la elevación de la clavícula, y le reconocieron esencialmente una función de ligamento activo. La actividad EMG funcional del pectoralis minor sigue siendo un misterio. Los músculos latissimus dorsi (partes externa y vertical), pectoralis major (parte esternocostal) y teres major levantan el cuerpo con punto fijo en el húmero [35]. Participan tan sólo en las actividades contra resistencia en las que existe un componente rotatorio interno, aductor, estático o dinámico. El teres major y la parte superior del latissimus dorsi también tienen una actividad muy marcada cuando se resiste a la extensión del brazo.

Codo y pronosupinación

Gracias a la forma y las relaciones de las superficies articulares humerocubital y radiocubital, el codo tiene movilidad en flexión-extensión, con una muy leve lateralidad (aducción, abducción) posibilitada por la oblicuidad de los ejes instantáneos de rotación y un pequeño juego articular. El antebrazo gira sobre su eje longitudinal, orientando la muñeca solidaria del radio en pronación y supinación. Esta rotación afina el movimiento comenzado a nivel del hombro para colocar la mano en la posición adecuada. La relativa lateralidad del cúbito es fundamental para obtener una pronosupinación completa. Desde Duchenne [21], es clásico considerar que la pronación va acompañada de una leve abducción cubital, y la supinación, de una aducción. La combinación de flexión-extensión y lateralidad induce una rotación externa del cúbito (5°) al final de la flexión y una rotación interna de igual magnitud al principio de la flexión, independientemente de la amplitud de la pronosupinación [53]. La membrana interósea y sus diferentes refuerzos oblicuos (de la parte baja del cúbito hacia la cara posterior del radio y, al contrario, de la parte alta del cúbito hacia la cara anterior del radio) se oponen:

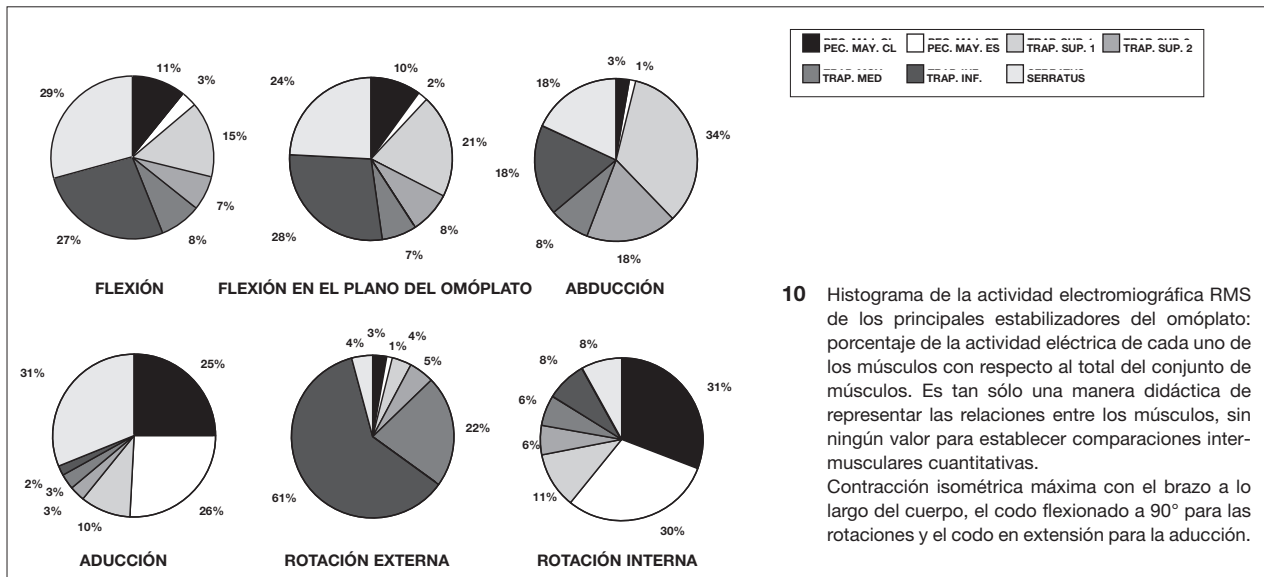
- a que ambos huesos se separen;
- a que la acción de empujar provoque un deslizamiento del radio en sentido proximal;
- a que el radio se deslice en sentido distal por efecto de la carga o la tracción.

En los esfuerzos de tracción es probable que la contracción de los músculos epitrocleares y epicóndíleos también actúe

cualitativa y cuantitativamente según el plan de desplazamiento del húmero (fig. 10). Los estabilizadores controlan la basculación axilar y la abducción del omóplato concomitante con las elevaciones del brazo. Cuanto más cerca del plano sagital se produce la elevación, más solicitado está el serratus anterior, como lo demuestra su mayor actividad EMG. Ésta es máxima cuando la elevación se combina con una aducción marcada del brazo, lo que determina un gran deslizamiento externo del omóplato. Decece progresivamente hacia la abducción. El haz superior del trapezius muestra un reclutamiento inverso, mientras que el del haz inferior es casi constante.

En la flexión, la abducción, la aducción y la rotación externa isométricas con el brazo a lo largo del cuerpo, el haz inferior del trapezius se muestra muy activo; la actividad del haz superior es máxima durante la abducción y menor en flexión. El haz medio generalmente es poco activo en los movimientos de elevación del brazo, pero en cambio se contrae fuertemente durante la rotación externa o la extensión horizontal del húmero.

Estas actividades son esenciales, permitiendo a la vez elevar el brazo y prevenir la subluxación inferior del húmero al orientar la glena hacia arriba. El elevador del omóplato [18,51] tiene fases de actividad semejantes a las del haz superior del trapezius.



10 Histograma de la actividad electromiográfica RMS de los principales estabilizadores del omóplato: porcentaje de la actividad eléctrica de cada uno de los músculos con respecto al total del conjunto de músculos. Es tan sólo una manera didáctica de representar las relaciones entre los músculos, sin ningún valor para establecer comparaciones intermusculares cuantitativas. Contracción isométrica máxima con el brazo a lo largo del cuerpo, el codo flexionado a 90° para las rotaciones y el codo en extensión para la aducción.

como refuerzo de la membrana interósea. En cambio, en los esfuerzos de empuje, el refuerzo de la membrana proviene de la cúpula radial apoyada contra el epicóndilo humeral, como lo demuestra el ascenso del radio, especialmente en empuje y pronación, después de la resección de la cabeza radial.

Actividades musculares en reposo

Cuando el miembro superior cuelga en reposo a lo largo del cuerpo, el codo presenta una flexión de 20 a 25° y el antebrazo una pronación de 15°, sin que haya ninguna contracción muscular. El antebrazo y la mano, que representan aproximadamente un 3 % del peso del cuerpo, se encuentran suspendidos del gancho del pico del olécranon.

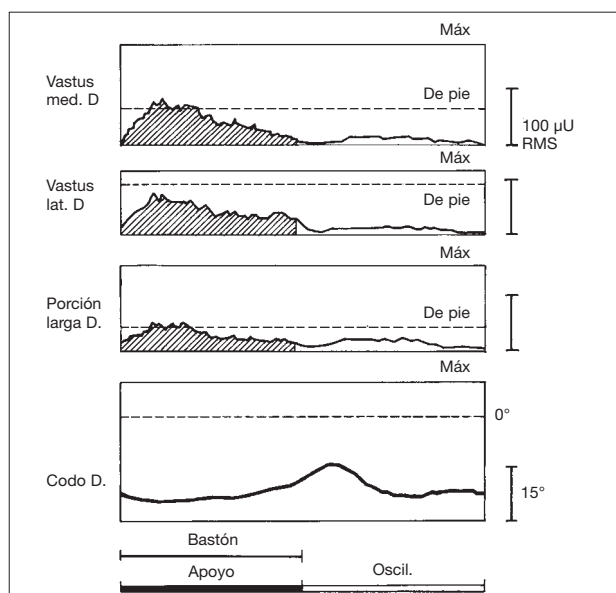
Flexión del codo

Contrariamente a lo que suele repetirse, los autores no observaron ningún esquema generalizable de actividad secuencial de los principales músculos flexores del codo (braquial, bíceps braquial, braquiorradial). La intensidad de la contracción depende de la velocidad, del peso del objeto y del grado de pronosupinación. Cuando el codo está flexionado en ángulo recto en contracción isométrica sin carga, con el antebrazo en pronación, por lo general sólo se halla contraído el braquial. En estas mismas condiciones, pero con el antebrazo en supinación, el bíceps (especialmente en su porción larga) se vuelve activo. Ahora bien, si la carga es considerable, todos los músculos están en actividad, aunque el orden de contracción y de relajación sea muy variable de una persona a otra.

El bíceps braquial no es supinador del antebrazo, salvo cuando la supinación encuentra una fuerte resistencia [4]. Se puede considerar que el braquiorradial es una reserva de fuerza activada por movimientos rápidos y/o contra una resistencia intensa. En flexión del codo, el pronator teres sólo interviene contra resistencia, cualquiera sea la posición del antebrazo.

Extensión del codo

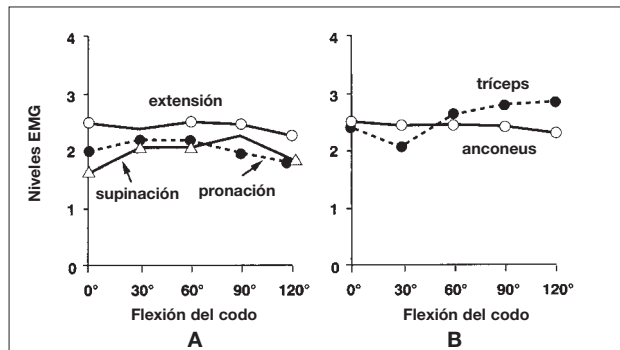
El tríceps braquial se emplea únicamente al empujar (fig. 11). El vastus medialis, extensor, interviene siempre, mientras que las otras dos porciones son reservas de fuerza. En la mayoría de los gestos que consisten en aproximar la mano a la boca, así como en los movimientos de prensión, manipulación o aproximación por debajo de la horizontal, la extensión del codo está controlada por una contracción excéntrica de los flexores. Cuando se practica una pronosupinación contra



11 Curvas electromiográficas (RMS) del tríceps braquial y goniograma del codo en flexión-extensión promediado durante la marcha pendular con dos bastones ingleses. El umbral «max» indica el nivel de EMG correspondiente al 100 % de la fuerza máxima voluntaria isométrica medida con un CYBEX II. El umbral «de pie» indica la actividad registrada en posición de pie inmóvil, pero con apoyo habitual sobre bastones. La activación de las tres porciones del tríceps braquial es diferente. Durante el apoyo sobre los bastones la movilidad del codo es muy escasa. La elevación del cuerpo, que oscila durante la mayor parte del apoyo sobre los bastones, se efectúa por elevación del tórax entre los omóplatos. Las porciones media e inferior del trapezius, el latissimus dorsi, la parte costal del pectoralis mayor y el serratus anterior son elevadores del cuerpo. Las partes anterior y media del deltoideus desplazan los bastones hacia adelante.

resistencia, siempre se observa la cocontracción modulada de los flexores-extensores del codo. Es probable que a partir de allí se haya inferido un concepto falso, según el cual el bíceps braquial siempre actuaría como supinador.

Duchenne [21] le atribuía al músculo anconeus las funciones de extensor del codo y abductor del cúbito durante la pronación. Ello fue confirmado, entre otros, por Travill [77], quien en el mismo estudio puso de manifiesto la actividad del anconeus durante la supinación contra resistencia (fig. 12). Tal vez intervenga como antagonista de la flexión del codo por el bíceps braquial y como sinergista del tríceps braquial.



12 Actividad electromiográfica del anconeus en diversos grados de flexión del codo.
 A. Durante la extensión, la pronación y la supinación del antebrazo.
 B. Comparación de la actividad del vastus medius, del triceps braquial y del anconeus durante la extensión del codo.
 Los niveles electromiográficos son gradaciones de categoría; 0 = no se detecta ninguna actividad eléctrica; 1 = indicios; 2 = actividad débil; 3 = actividad fuerte; 4 = actividad máxima. (Según Basmajian [7]).

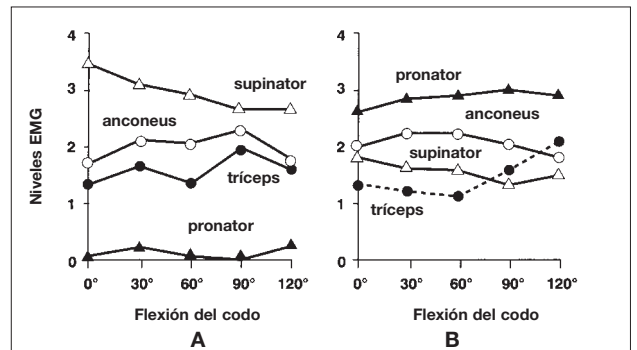
Pronación-supinación

El estudio electromiográfico de referencia es el que Travill y Basmajian realizaron en 1961 [77] con agujas coaxiales. Ambos músculos pronadores (el pronator quadratus y el pronator teres) son activos en pronación, cualquiera sea la posición del antebrazo y el codo (fig. 13). El pronator teres refuerza al pronator quadratus cuando se practica un movimiento rápido y/o contra una resistencia considerable.

El movimiento de supinación empieza y se mantiene gracias a la actividad del supinador brevis, mientras que el bíceps braquial sólo interviene contra resistencia cuando el codo está flexionado. Si el codo está en extensión, a la supinación del antebrazo se le suma una rotación externa del hombro. En los gestos que requieren mucha fuerza el codo se halla flexionado, y en lugar de la verdadera supinación se observa una aducción humeral. Según lo muestra la EMG cineiológica, el braquiorradial sólo es flexor del codo, y no un verdadero supinador o pronador. Tampoco es sinérgico de los músculos extrínsecos del pulgar que abren la primera comisura. Este concepto resulta particularmente importante para quienes trabajan en la readaptación de personas que han sido sometidas a tal tipo de intervención.

Muñeca

En posición de referencia, el eje del tercer metacarpiano prolonga el eje antebraquial pasando por el hueso grande del carpo. Los términos aducción y abducción resultan ambiguos, porque dependen de la pronosupinación de la mano. Los movimientos de la muñeca son la flexión y las desviaciones o inclinaciones radiales o cubitales. De su combinación nace la circunducción, que describe un cono irregular muy limitado del lado de la inclinación radial. Puede haber una rotación axial involuntaria alrededor del eje del hueso grande cuando se fija la mano para efectuar determinados movimientos de fuerza (atornillar o destornillar). La cinemática de las dos hileras de los huesos del carpo es complicada, por la morfología de las interlíneas mediocarpiana y carpometacarpiana, y la morfología del ligamento transversal del carpo [38]. La de la interlínea radiocarpiana corresponde a los grados de libertad de una articulación condílea.



13 Actividad de los músculos supinador, anconeus, triceps braquial y pronator durante los movimientos de pronación y supinación en diversos grados de flexión del codo.
 A. Actividad durante la supinación. Adviértase la importante actividad de los supinadores cuando el codo se encuentra en extensión; la actividad del bíceps, si la hay, no tiene ninguna eficacia mecánica sobre la supinación. El supinador es el único motor del movimiento. Se considera que la leve actividad del cubital y del triceps es estabilizadora del antebrazo.
 B. Actividad en pronación. La disociación triceps-anconeus indicaría que éste actúa como auxiliar en pronación para favorecer la desviación cubital. No hay explicación de la cocontracción de los supinadores. (Según Basmajian [7]).

Posición de la mano y de la muñeca

La posición de la muñeca depende de la pronosupinación, mientras que la de la mano depende de la muñeca. La prensión y la manipulación polidigitales se acompañan de una inclinación cubital radiocarpiana destinada a acercar el índice al eje antebraquial y aumentar la amplitud de la extensión de la muñeca. Esta desviación cubital parece producirse siempre, salvo cuando los dedos efectúan una prensión en forma de gancho.

Actividades musculares

Los músculos motores de la muñeca actúan sobre los metacarpianos. El flexor carpi ulnaris hace escala en el pisiforme, pero su tracción se ejerce sobre el quinto metacarpiano por medio de las fibras tendinosas directas y el ligamento pisometacarpiano.

Utilizando la electroestimulación selectiva de los músculos del antebrazo, Nathan [56] evaluó in vivo la orientación de sus vectores de tracción en contracción isométrica; dadas las condiciones de esta prueba, todos tienen un pequeño componente de pronación o de supinación. En la introducción ya se habló de las divergencias entre las acciones musculares reveladas por la electroestimulación y la secuencia de intervención gestual registrada por EMG.

Sinergias musculares

Todos los gestos y movimientos se realizan gracias a la contracción sinérgica o cocontracción de varios músculos. Ya en 1948, Tournay y Fessard [75], y más tarde Tournay y Pailard [76], estudiaron y describieron las sinergias entre el abductor pollicis y el extensor carpi radialis y entre el flexor de los dedos y el extensor de la muñeca. Tales sinergias se modulan durante la prensión, aunque el orden de reclutamiento no siempre es igual. La sinergia entre el extensor carpi radialis brevis y el flexor digitorum empieza con la toma del objeto, y el extensor carpi radialis longus por lo general participa cuando la fuerza de prensión o el peso del objeto

aumentan. Otro tanto ocurre entre el abductor digiti minimi y el flexor carpi ulnaris. Tales sinergias estabilizan y orientan la muñeca [45] en extensión y desviación cubital, colocando los dedos en la posición óptima según el tipo de prensión. Su importancia se vuelve patente en las dificultades de prensión provocadas por las paresias o las parálisis radiales.

Todos los músculos extensores de la muñeca, los extensores de los dedos, el abductor del pulgar, y en mucho menor medida los palmares, se contraen durante la presentación de la mano para tomar un objeto voluminoso [72]. La actividad alternada entre el agonista y el antagonista conforme a los principios de inhibición recíproca sólo se observa durante los movimientos rítmicos en flexión-extensión. Para que las transposiciones tendinosas de reanimación de la muñeca o de los dedos resulten funcionalmente eficaces es imprescindible respetar estas sinergias y tomar en consideración su cronometría. Los pobres resultados funcionales de la reanimación de la abducción del pulgar con el braquiorradial se explican por la ausencia de sinergias previas.

Mano

En 1867, Duchenne de Boulogne [21] había observado que la mano humana cambiaba radicalmente de actitud entre la posición de reposo (fig. 14 A) y la posición prensil (fig. 14 B) adoptada espontáneamente para tomar un objeto. Debiard [17], haciendo marcas en la piel, puso de manifiesto tales variaciones (fig. 14 C), que consisten en un alargamiento de la distancia entre la apófisis estiloides del radio y la cabeza del primer metacarpiano, con un acercamiento simultáneo entre dicha apófisis y la cabeza del segundo metacarpiano (cuadro II).

A partir de esta actitud de prensión es posible comprender el equilibrio dinámico viscoelástico que se establece de modo automático en una mano sana en posición de trabajo (fig. 15).

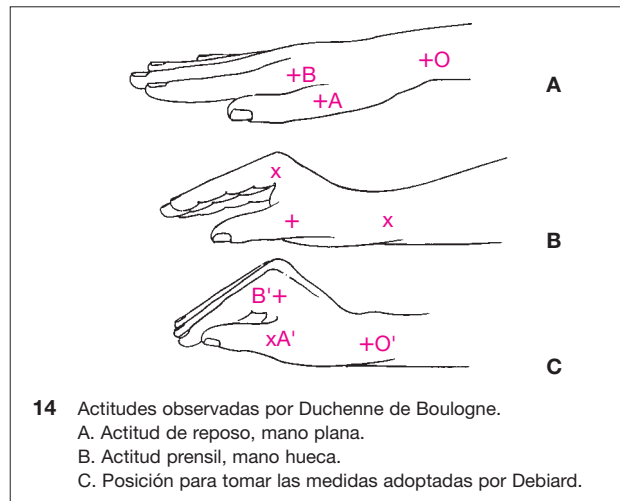
El funcionamiento armonioso de los dedos es difícil, especialmente en el momento de la extensión [7], y por otra parte requiere una velocidad diferencial de los segmentos digitales proximales y distales: en el mismo tiempo controlado (0,20 s), el ángulo que cubre la falange proximal es un 33 % mayor que el de la falange distal (fig. 16).

En realidad, para la flexión y la extensión, los dos sistemas que parecen ser antagónicos funcionan juntos. La mano colocada en actitud prensil se presenta como una sucesión de eslabones cinéticos no contiguos [44], ya que los tendones largos pasan a lo largo de los metacarpianos sin insertarse en ellos. Por consiguiente, entre los segmentos del esqueleto y la coordinación de las diferentes tracciones existe un equilibrio delicado, que puede romperse fácilmente. A fin de facilitar la comprensión se han separado arbitrariamente ambos sistemas, extensor y flexor (fig. 17). La interacción compleja de las actividades musculares se muestra en el cuadro II, donde se advierte la diferencia entre la flexión metacarpofalángica (lumbrical muy activo) y la flexión interfalángica (lumbrical en reposo) (cuadro III).

A partir de este comportamiento general, los músculos modulan su actividad según se utilice la mano para una actividad de fuerza («power grip» de Napier) o para una actividad fina («precision handling» de Napier) [35].

Actividades de fuerza

Participan todos los músculos intrínsecos, haciendo que los dedos giren sobre su eje longitudinal para que los pulpejos queden alineados con respecto a la superficie del objeto que va a tomarse y los músculos extrínsecos utilicen del mejor modo su potencia [50].

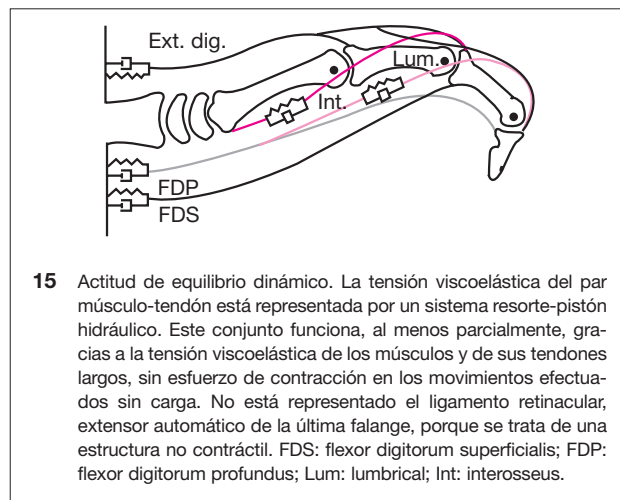


14 Actitudes observadas por Duchenne de Boulogne. A. Actitud de reposo, mano plana. B. Actitud prensil, mano hueca. C. Posición para tomar las medidas adoptadas por Debiard.

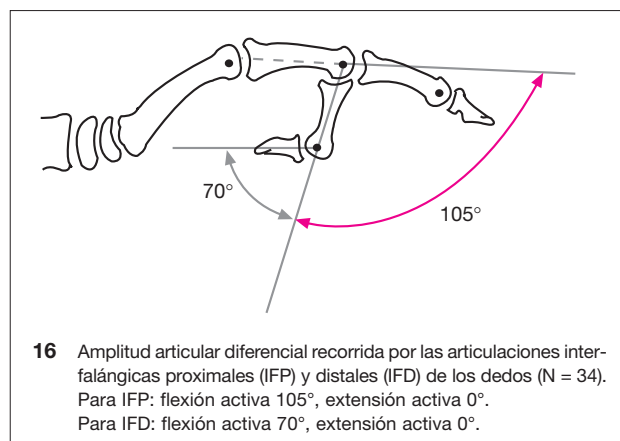
Cuadro II.- Diferencias de actitudes entre el reposo y el trabajo.

	X	DE
distancia A-0 reposo-A-0 trabajo =	5,5 mm	± 2,6
distancia A'-0' reposo-A'-0' trabajo =	7,2 mm	± 3,1

X = promedio; DE = desviación estándar.



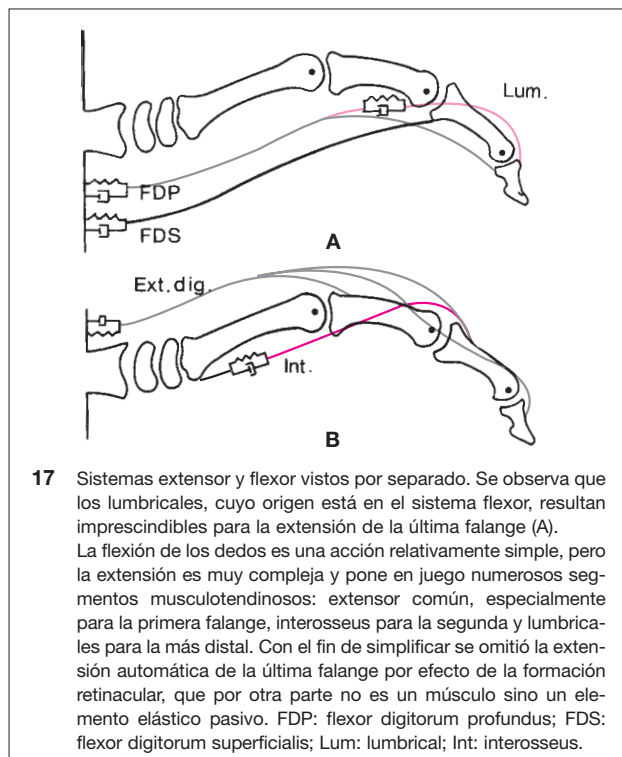
15 Actitud de equilibrio dinámico. La tensión viscoelástica del par músculo-tendón está representada por un sistema resorte-pistón hidráulico. Este conjunto funciona, al menos parcialmente, gracias a la tensión viscoelástica de los músculos y de sus tendones largos, sin esfuerzo de contracción en los movimientos efectuados sin carga. No está representado el ligamento retinacular, extensor automático de la última falange, porque se trata de una estructura no contráctil. FDS: flexor digitorum superficialis; FDP: flexor digitorum profundus; Lum: lumbrical; Int: interosseus.



16 Amplitud articular diferencial recorrida por las articulaciones interfalángicas proximales (IFP) y distales (IFD) de los dedos (N = 34). Para IFP: flexión activa 105°, extensión activa 0°. Para IFD: flexión activa 70°, extensión activa 0°.

Actividades finas

En una actividad que por lo general se limita a la flexión metacarpofalángica, el índice está particularmente solicitado. Hay una importante actividad a nivel de la «tríada tenar» (abductor pollicis brevis, flexor pollicis brevis y opponens pollicis) [50].



Músculos del pulgar

La cinemática esencialmente tridimensional de los movimientos de la columna del pulgar complica mucho su análisis. Hoy en día pueden comprenderse las sincronías del pulgar [74], y es aconsejable que todos los clínicos abandonen la visualización de los problemas por planos separados. En la pinza lateral en aducción hay una perfecta alineación funcional de los músculos tenares. La acción articular es simple, las fibras de los diferentes músculos se hallan perfectamente orientadas (fig. 18), y no hay casi ningún deslizamiento lateral sobre el objeto asido.

Para desarrollar su fuerza potencial, el adductor pollicis debe encontrar una resistencia firme del índice, controlada por el primer interóseo dorsal. La presión entre el pulgar y el borde lateral del índice representa por sí sola el 80 % de la fuerza disponible (cuadro IV).

Dado el carácter tridimensional de los movimientos, el adductor pollicis no sólo es poderoso en la aducción pura de la columna tenar, sino también en posición de oposición, porque el cuerpo carnoso utiliza el tendón del flexor indicis proprius como apoyo y reflexión de fuerzas. En cambio, el adductor pollicis no actúa en la flexión (cuadro V).

Actividades prensiles y posiciones articulares

Hace ya mucho tiempo, Schlesinger [70] describió las tres principales actividades de la mano que trabaja (fig. 19):

Tomas de fuerza

Requieren una fuerte flexión de las articulaciones interfalángicas [44]. Por ejemplo, cuando la cuchilla de zapatero encuentra una gran resistencia, los dedos internos se colocan en oposición al metacarpiano del pulgar para bloquear el mango del instrumento.

Tomas de habilidad

El pulgar va al encuentro del índice y el medio. Predomina la actividad de la articulación metacarpofalángica. Una

toma de habilidad típica es la que permite usar una mesa digital, con los dos dedos internos obligatoriamente replegados [78].

«Pinzas»

Por lo general oponen el pulgar al índice, y más raramente al medio. Su derivado directo, en ámbito clínico, es la «prueba de los anillos» descrita más abajo.

La actitud espontánea de los dedos en situación de trabajo varía según la toma. En una toma de fuerza los cuatro dedos están en flexión interfalángica, como se observa en el cuadro VI.

En estas tomas circulares la posición de la articulación interfalángica proximal (IFP) del índice difiere poco de la del meñique, pero hay grandes diferencias entre ambas metacarpofalángicas (MCP) y entre ambas interfalángicas distales (IFD) (fig. 20).

En cambio, en posición de escritura los dedos internos se repliegan para no molestar al pulgar y a los dedos externos, según se muestra en el cuadro VII.

El meñique está flexionado, mientras que la última falange del índice suele encontrarse en hiperextensión (fig. 20).

Para practicar la toma en trípode digital los dedos externos se disponen en extensión y los internos en marcada flexión (fig. 20).

Orientación de las herramientas según su uso

Conforme a la manera en que se utilice la mano (actividad de fuerza o actividad fina), los ángulos de ataque de la herramienta con respecto al eje largo del antebrazo pueden ser diametralmente opuestos (fig. 21). A veces se trata de una misma herramienta (por ejemplo, una cuchilla de zapatero) empleada de distintas maneras.

Fuerzas de presión disponibles según la actitud de los dedos

En el cuadro VIII se presentan los resultados obtenidos al explorar la fuerza de presión de la pinza tridigital, la de cuatro dedos en la palma de la mano, y por último la que ejercen únicamente los dedos internos contra la palma.

Adviértase que cuando sólo se aprietan los dos dedos internos contra la palma de la mano, es decir cuando se toma un objeto sin participación del índice ni del medio, se registra una mínima pérdida de fuerza. El anular y el meñique garantizan una toma de fuerza suficiente.

Fuerza disponible en la prueba de los anillos

El cuadro IX muestra que la toma pulgar-dedo sólo proporciona fuerza si se reclutan el índice y el medio. Los otros dos dedos, los internos, son muy débiles en oposición al pulgar, lo que debe considerarse como un fenómeno normal. Es lógico evaluar la fuerza disponible a nivel pulgar-índice y pulgar-medio.

La disminución de fuerza es espectacular a partir del anular. El hecho que el meñique tenga valores más altos se debe a la presencia de los músculos intrínsecos de la eminencia hipotenar. Las oposiciones pulgar/índice y pulgar/medio son eficaces, pero no debe probarse la fuerza de los otros dos dedos en oposición al pulgar, puesto que su función consiste en ejercer un bloqueo en la palma de la mano.

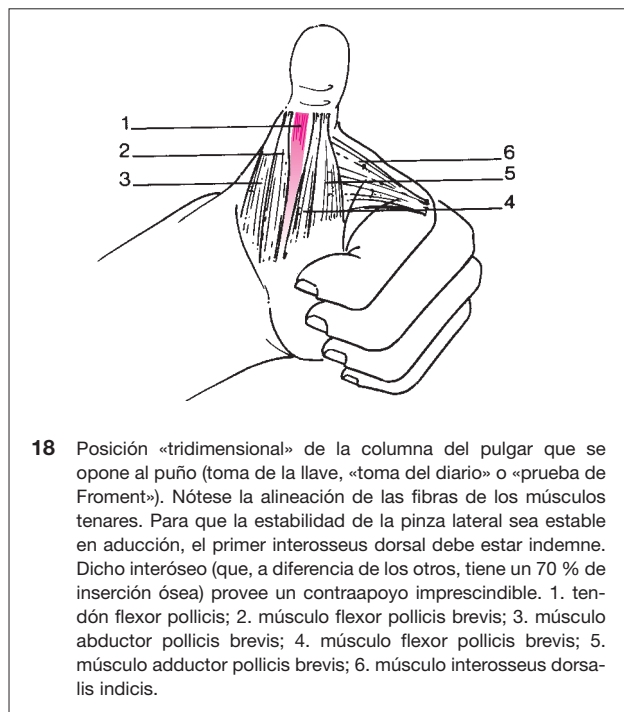
Los autores obtuvieron resultados semejantes a los publicados por Swanson et al [73] con respecto a las fuerzas de presión, y efectuaron estudios originales sobre el valor de la

Cuadro III.– Actividades musculares según los movimientos.

	Extensión	Flexión meta-falángica	Flexión inter-falángica	Apretar mango martillo	Apretar puño	Pinza pulgar-índice
Extensor digital común	1	0	2	0	0	1
Extensor del índice	2	1	2	1	1	0
Interóseo	0	1	0	3	3	0
Lumbrical	3	3	0	3	3	2
Flexor profundo de los dedos	0	0	2	2	2	2
Flexor superficial de los dedos	0	2	3	2	1	1

Código para la clasificación de la actividad EMG:

0 = no se detecta actividad; 1 = actividad débil; 2 = actividad moderada; 3 = actividad intensa.



Cuadro IV.– Fuerza de la pinza lateral pulgar-índice y pulgar-puño (mano derecha, personas del sexo masculino, N = 20, resultados en kgf).

Pulgar puño		Pulgar-índice solo		Pérdida de fuerza
X	DE	X	DE	
11,9	1,2	9,9	1,0	17 %

X = promedio; DE = desviación estándar.

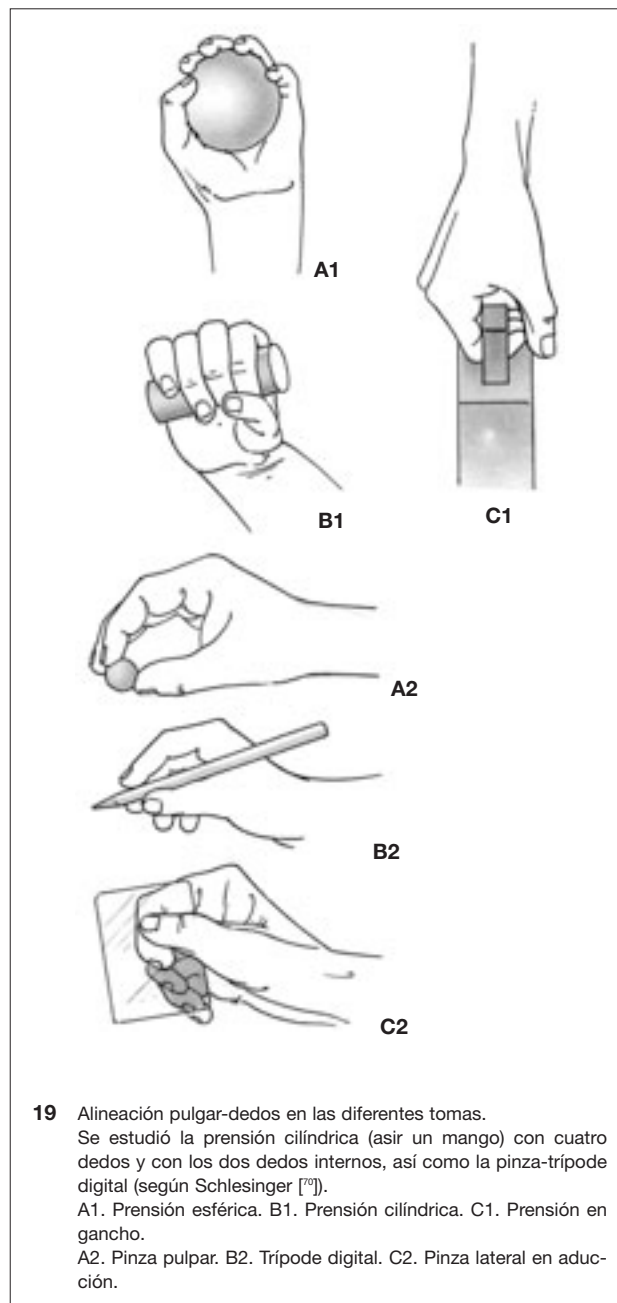
Cuadro V.– Actividad electromiográfica de los músculos del pulgar.

	Extensión	Flexión	Apretar objeto
Flexor largo del pulgar	0	2	1
Oponente del pulgar	2	0	3
Abductor corto del pulgar	1	0	2
Aductor del pulgar	0	0	2
Extensor largo del pulgar	1	2	0
Abductor largo del pulgar	0	1	0

«prueba de los anillos» y sobre las posiciones diferenciales de los dedos durante las diferentes tomas.

Sensibilidad

Es la guía de la actividad motora.

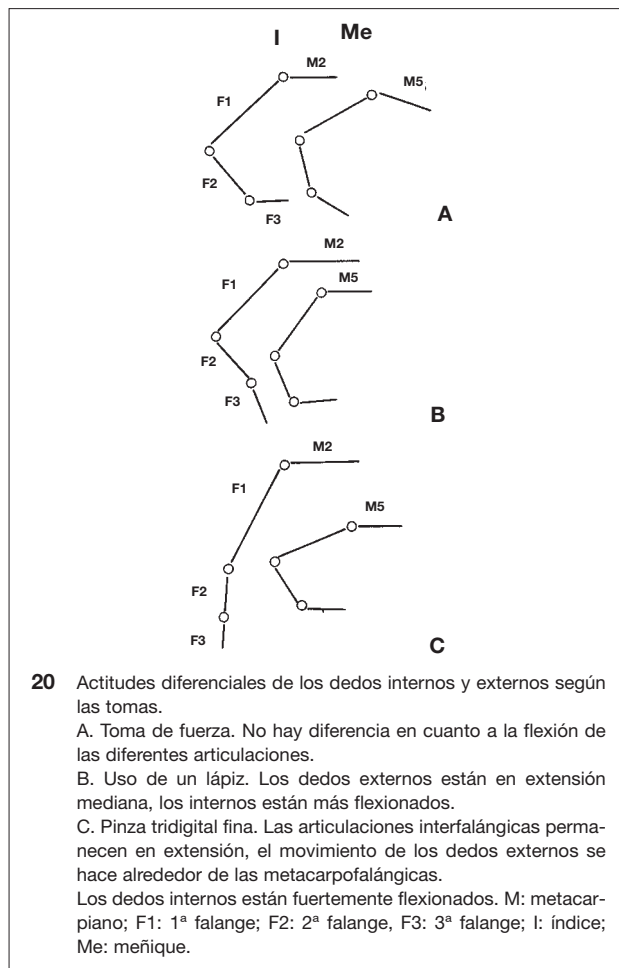


No se hará aquí una descripción completa de las sensaciones necesarias para poder ejercer la motricidad, que se detallan en otro sitio [65]. Al registrar las deformaciones de la piel creadas por las fuerzas de cizallamiento de la interfase dedo-objeto, los receptores cutáneos controlan la velocidad y la intensidad de la presión [57]. Cuando el objeto está apretado se percibe de modo más preciso la dirección del deslizamiento. Cuando éste cesa, se ha alcanzado la fuerza de presión óptima.

Cuadro VI.— Posición de las articulaciones del índice y el meñique (dedos extremos) en una toma cilíndrica de fuerza, (N = 40), personas del sexo masculino, 28 -32 años (en grados goniométricos).

	Índice		Meñique	
	X	DE	X	DE
Metacarpofalángica	75,5°	± 10,2	44,7°	± 11,9
Interfalángica proximal	78,1°	± 8,1	63,7°	± 8,1
Interfalángica distal	49,2°	± 7,4	77,5°	± 12,0

X = promedio; DE = desviación estándar.



Resumen de las actividades musculares EMG de la mano

Prensión poderosa

La fuerza proviene principalmente de los músculos flexores extrínsecos de los dedos. Los interóseos intervienen para flexionar las articulaciones metacarpofalángicas [4, 6, 46, 48]. Todos los músculos tenares son activos, salvo en la toma en gancho.

Tomas finas

Los músculos extrínsecos de los dedos proveen la fuerza de prensión a nivel falángico [47], mientras que los interóseos actúan sobre la posición de la primera falange [49]. También son activos los lumbricales, a los que se les atribuye una función de extensor interfalángico [48], y que según una hipótesis podrían actuar como regulador cibernético entre flexores y extensores [65].

La tríada de los músculos tenares (flexor pollicis brevis, opponens pollicis y abductor pollicis brevis) decide la posición del primer metacarpiano, mientras que el adductor pollicis colabora con el flexor pollicis longus para obtener la aducción del primer metacarpiano.

En la toma terminolateral pulgar-índice, el primer interóseo dorsal estabiliza el índice; el flexor pollicis brevis es el más activo de los músculos tenares [4].

Oposición pulgar-dedos

Se toma como referencia el estudio efectuado por Forrest y Basmajian [25] sobre los músculos tenares e hipotenares durante la oposición del pulgar a nivel de la cara lateral de la tercera falange y del pulpejo de cada dedo, sin y con presión. Durante la oposición sin presión (fig. 22 A), el más activo es el músculo opponens pollicis. Adviértase que los hipotenares se contraen a partir de la oposición al anular. La oposición con presión (fig. 22 B) requiere una considerable actividad del flexor pollicis brevis [26] de entrada, a la que se le suma la de los hipotenares a partir de la oposición pulgar-pulpejo del medio. Debe destacarse que cuanto mayor es la rotación hacia dentro del primer metacarpiano por influencia del opponens pollicis, mayor es la flexión y aducción del quinto metacarpiano con respecto al plano de la mano por acción del opponens digiti minimi. La cocontracción de ambos oponentes aumenta la curva del arco transversal metacarpiano, con lo que se facilita la toma de las esferas y de los discos.

Conductas de prensión

Son comportamientos motores que tienen por meta la comunicación (aproximación) o la utilización (prensión). Durante una prensión efectuada con control visual, la posición de los dedos y el pulgar depende de la forma, la posición, el tamaño y la textura del objeto por tomar, y del uso que se le va a dar. Además, la cronometría de los dedos debe coordinarse con la de las otras articulaciones del miembro superior, que colocarán la mano en contacto con el objeto. Esta tarea corresponde al tiempo de transporte balístico [15]. Para soltar el objeto se empieza por relajar la presión mediante la desconstrucción progresiva de los flexores extrínsecos de los dedos. Luego se abre la pinza por contracción concomitante progresiva de los extensores de los dedos.

Observando repetidamente la prensión funcional se advierte que los dedos se abren al mismo tiempo que se acomoda la muñeca, cuando empieza el transporte de la mano. Son operaciones claramente anticipadas, que se efectúan sólo bajo control visual. La utilización tras la toma del objeto agrega nuevas informaciones táctiles y cinestésicas. Sin visión y sin conocer el tamaño y la orientación del objeto, la mano no se coloca en la posición adecuada. Primeramente

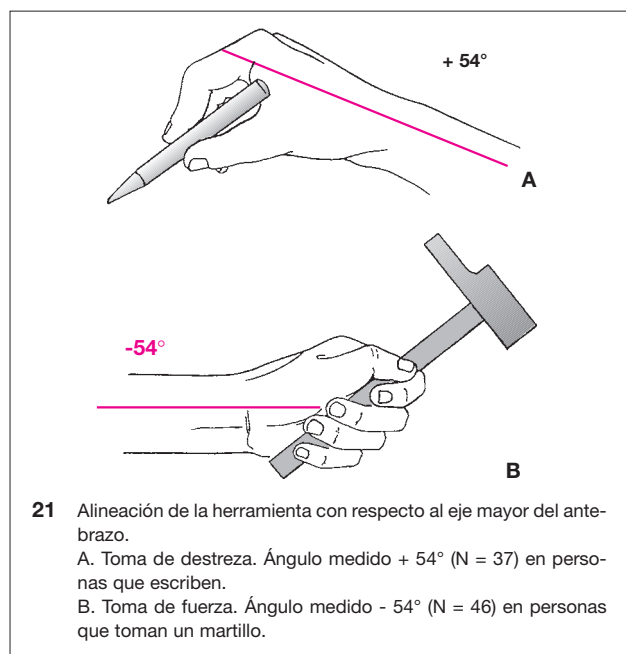
Cuadro VII.– Posición de los dedos para tomar el lápiz de digitalizar, (N = 38), personas del sexo masculino, de 24 a 32 años (grados goniométricos).

	Índice		Meñique	
	X	DE	X	DE
Metacarpofalángica	48,9°	± 12,3	64,9°	± 14,7
Interfalángica proximal	66,3°	± 19,6	53,5°	± 19,1
Interfalángica distal	- 3,0°	± 25,4	36,0 °	± 11,6

X = promedio; DE = desviación estándar.

Cuadro VIII.– Fuerza disponible en tres tipos de toma, (N = 40), personas de sexo masculino, mano derecha (kgf).

	X	DE	Pérdida de fuerza
Toma tridigital	8,10	± 0,51	5,4 %
Apretar con cuatro dedos	47,9	± 1,5	
Apretar con los dos dedos internos	45,3	± 1,8	



hay que localizar la meta, luego reconocerla por el tacto, y por último elaborar la toma a partir de la memoria cinestésica. La toma de un objeto móvil depende esencialmente de la visión y la capacidad de integración de la velocidad, de la trayectoria de la mano y del objeto para estimar el punto de encuentro. La presión también depende de la velocidad a la que los dedos se cierran, y por consiguiente de la integración táctil del pulpejo de los dedos que ordenan la relajación de los extensores y la contracción de los flexores. Las secuencias motoras corresponden a engramas motores pre-programados por las condiciones de automatización derivadas de una práctica altamente repetitiva y en ciertas condiciones de predictibilidad. Por ejemplo, una cigarrera sólo alcanza la destreza y la calificación necesarias después de haber fabricado 3 millones de habanos [39].

El ajuste terminal del movimiento, es decir la preparación para la toma, se modula a través de reafirmaciones sensoriales, visuales y cinestésicas. La vista analiza la distancia dedo-objeto o dedo-meta resultante del transporte. Esta retroalimentación terminal tiene un efecto de refuerzo que desencadena el proceso de toma o de contacto.

En las pruebas de presión o de aproximación rápida (transporte balístico inferior a 200 milisegundos) los resultados muestran un deterioro cualitativo (dispersión de los errores) y cuantitativo (aumento del número de errores)

Cuadro IX.– Fuerza de presión entre el pulgar y cada uno de los 4 dedos sucesivamente, (N = 20), personas de sexo masculino, mano derecha (en kgf).

	X	DE
Pulgar/índice	7,4	± 1,0
Pulgar/medio	7,2	± 0,9
Pulgar/anular	3,4	± 0,7
Pulgar/meñique	3,7	± 0,7

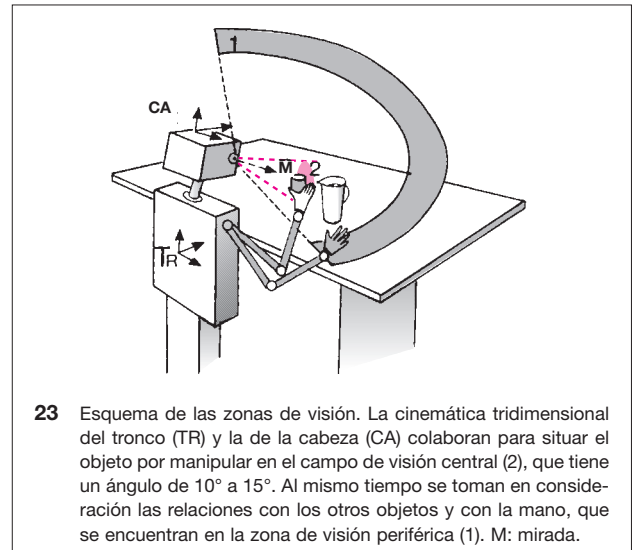
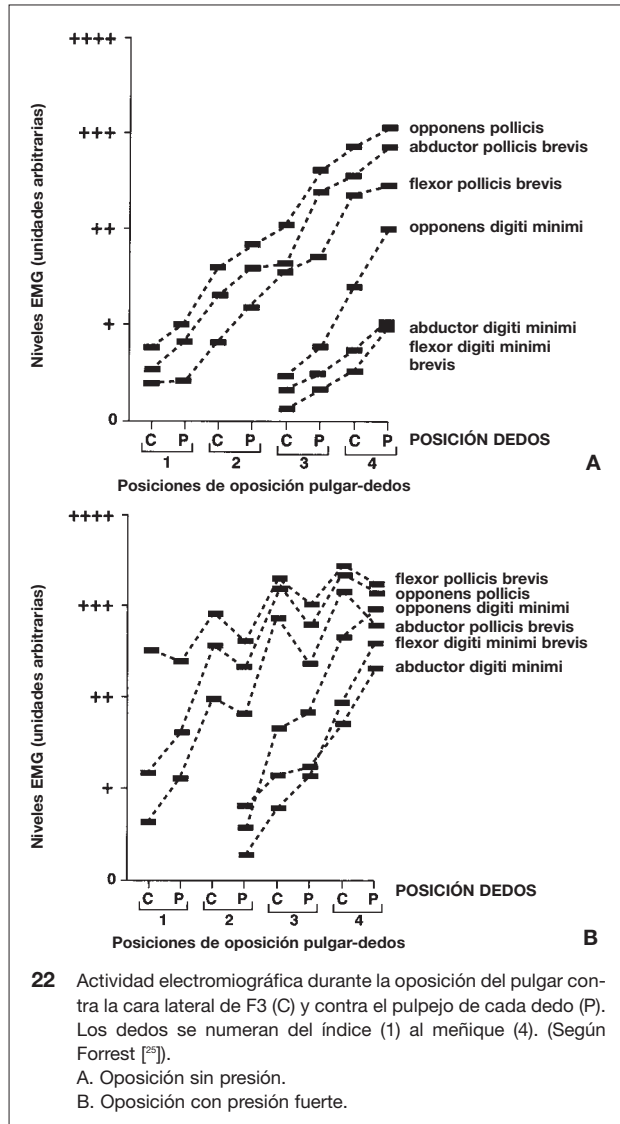
X = promedio, DE = desviación estándar.

que lleva a marrar la meta). Las correcciones de trayectoria a partir de informaciones cinestésicas tienen una latencia superior o igual a 150 ms. La duración normal del movimiento varía entre 200 y 700 ms, de modo que a través de las reafirmaciones sensoriales se produce una retroalimentación esencial para la presión de un objeto móvil.

Coordinación ojo-mano

En una situación simple, donde se trata de alcanzar un objeto inmóvil situado fuera del campo de visión central, se utiliza una gran cantidad de informaciones perceptivas (fig. 23), tales como las posiciones respectivas del tronco, la cabeza y la mano, la dirección de la mirada con respecto a la cabeza y la de la mano y el objeto dentro del campo visual. Si el objeto queda fuera del campo de la fovea, la primera tarea consiste en focalizar la mirada sobre él, desplazando el ojo. A veces es preciso rotar la cabeza hacia el objeto. La latencia del movimiento de los ojos (sacudidas) varía según la lejanía del objeto con respecto a la línea media del cuerpo, mientras que la latencia de la orientación de la cabeza es mayor para los objetos próximos a la línea media que para los que se encuentran lejos de ella (351,7 ms para un desplazamiento lateral de 10°; 305,7 ms para uno de 40° [5]). Tal diferencia podría deberse a la latencia mecánica de los músculos cervicales. Si un objeto excéntrico se mueve hacia la derecha de 10 a 40 cm, la latencia de los movimientos de la mano pasa de 340 a 360 ms, mientras que la duración de los movimientos del ojo varía de 68 a 125 ms. Es importante destacar que a partir de 30 cm de excentricidad, el transporte de la mano se inicia antes de que la mirada se haya fijado (final de la primera sacudida). Esta primera sacudida dura 250 ms. El movimiento de la mano le sigue 100 ms después [63,64].

La precisión de la trayectoria no se perturba si durante el transporte la mano está escondida, pero la meta, fija o móvil, se halla a la vista. De ello se deduce que las informaciones visuales (imagen retiniana y posición del ojo) que localizan la meta son comparadas a las informaciones cinestésicas



se le presenta un objeto en su campo visual periférico, y más aún si se lo agita, el niño le dirige la mirada, y lanza hacia el objeto su miembro superior en abducción-flexión del hombro, con la mano cerrada. Según Hatwell [29], nunca se produce la presión del objeto, y el índice de contacto es inferior al 5%. A partir de las 13 a 16 semanas la mano se abre durante el lanzamiento, con fijación visual de la meta. Entre las 12 y las 24 semanas el lactante trata de asir los objetos o las imágenes que se le pongan a su alcance, tanto más cuanto más cerca se encuentren. Field [24] considera que este comportamiento es una prueba de discriminación de las profundidades de ángulo de visión tridimensional. En cuanto al transporte de la mano, lactantes y niños presentan una alternancia de períodos en los que predominan los automatismos del programa motor con otros en los que predominan los controles sensoriales.

Poco a poco el control visual cobra mayor importancia. Si hay un suficiente control motor de las extremidades y la relación espacial mano-objeto está integrada, dicho control visual guía el movimiento [22]. En el 2º año, el transporte balístico se automatiza, y disminuye la parte del control visual. Ya hay un buen control de la disposición previa de los dedos en función de la orientación del objeto, que ha comenzado hacia los 4 meses [31]. El desplazamiento del miembro superior impone una postura asimétrica que requiere cocontracciones diferentes a uno y otro lado del eje corporal.

Este ajuste postural también depende de la localización del objeto. Cuando el móvil está a la derecha del niño sentado, el tronco se incurva hacia la izquierda y la cabeza gira hacia el objeto. Si el objeto cruza la línea media, la postura se invierte. Este comportamiento corresponde a la «inversión de fases entre los movimientos del tronco y la posición angular del móvil» descrita por Bullinger [11, 12]. En los pacientes con problemas motores cerebrales y en los autistas, las dificultades perceptivas o de integración sensorial dificultan, e incluso anulan la fase de transporte balístico o de presión [9, 10], requisito imprescindible cuando el tronco está erguido. Existen muy pocos estudios acerca de la evolución de la coordinación visuomotora entre los 2 y los 5 años. A partir de los 7 años está adquirida la dirección de aproximación, pero persisten numerosos errores de amplitud, especialmente bajo control visual de la relación mano-objeto. No se sabe si se trata de un déficit de las aferencias cinestésicas o de su integración.

tésicas y eferentes de los comandos motores [59]. Si la mirada permanece fija sobre un objeto (por ejemplo, un vaso) y la persona debe asir otro objeto (una botella) situado a 45° o 60° hacia la derecha, la trayectoria del brazo y el antebrazo se vuelve más lenta en la fase de aproximación a la botella (fig. 24).

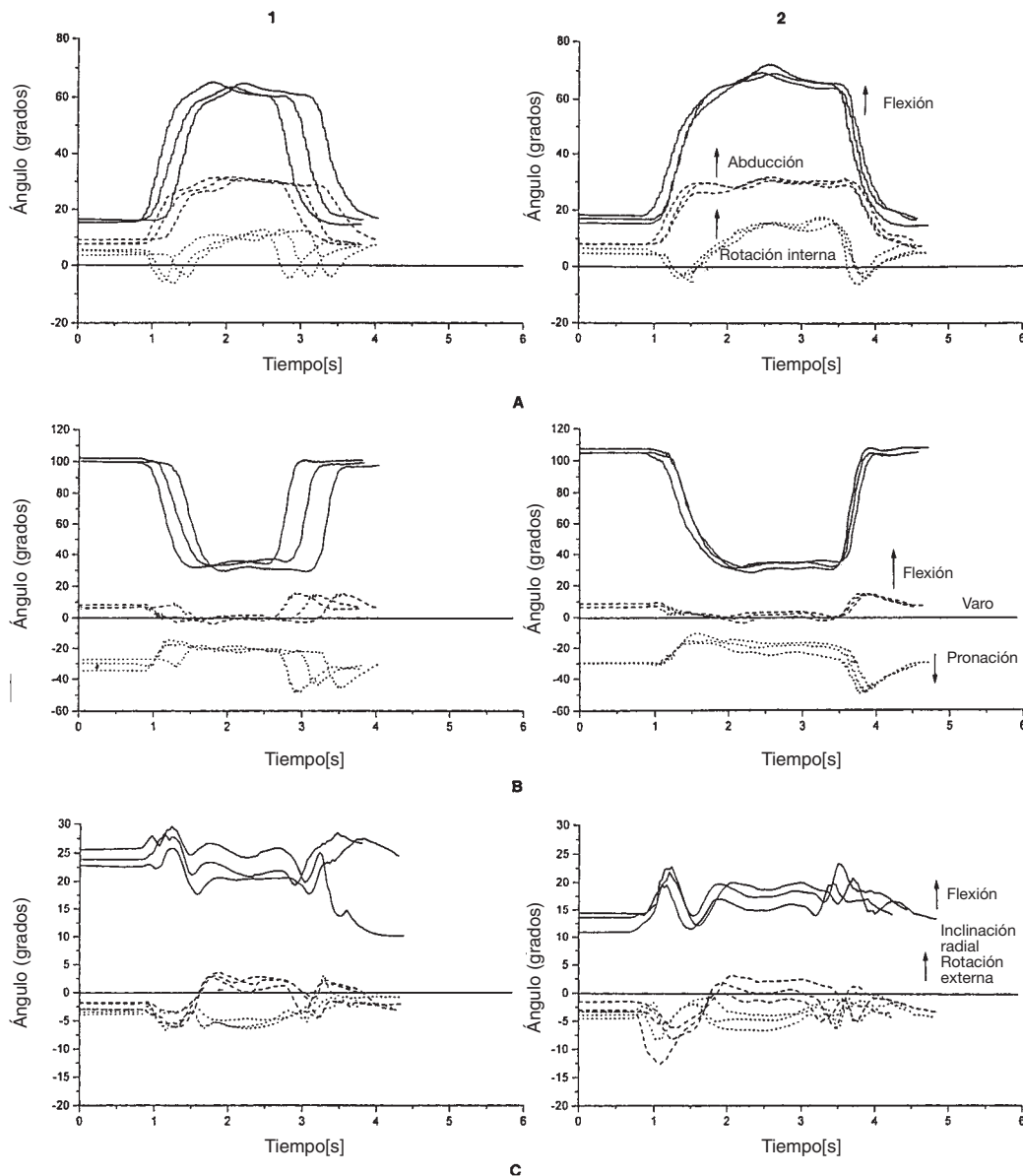
Conductas de presión en el niño

Preferencias manuales

Desde muy temprano, a partir de ciertos índices tónicos, se observan en el lactante comportamientos de lateralización que pueden prefigurar las estrategias eficaces de utilización de una u otra mano. No demora en manifestarse la preferencia manual, que se refuerza progresivamente mediante el aprendizaje, hasta lograr mejores resultados en cuanto a fuerza, destreza y rapidez [34]. Según las medidas morfométricas del cerebro, in vivo, la mano dominante va asociada a un predominio volumétrico del hemisferio cerebral opuesto [37].

Transporte balístico

Así como en el recién nacido existe el reflejo de «marcha», se observa también unaseudopresión innata que desaparece entre la 3ª y la 7ª semana. Cuando a un recién nacido



24 Cinemática en 3 dimensiones (3D) relativa: (A) del brazo con respecto al tórax; (B) del antebrazo con respecto al brazo; (C) de la mano representada por el 3º metacarpiano-antebrazo. La persona debía tomar una botella (3 intentos consecutivos), levantarla y volver a apoyarla. En reposo, la persona está sentada delante de una mesa, y su mano descansa sobre el borde de ésta. La persona mira la botella, situada 60° a la derecha de su plano sagital mediano (1) en la zona de visión central; (2) la persona mira recto hacia adelante, y entonces la botella queda en su campo de visión periférica. En 2, el movimiento es más lento y las amplitudes son mayores.

A. Cinemática 3D en el conjunto de la cintura escapular. — flexión; - - - abducción; rotación interna.
 B. Movilidad 3D del codo y el antebrazo en pronosupinación. — flexión; - - - - varo; pronación.
 C. Movilidad 3D de la muñeca. — flexión; - - - inclinación radial; rotación externa.

Prensión y utilización

El control de la amplitud lleva al contacto mano-objeto. A los 4 ó 5 meses se observa un frenado progresivo que controla la amplitud a fin de que la mano entre en contacto con el objeto suavemente. Para que la prensión sea eficaz sin control visual hay que esperar hasta los 12 meses. Las tomas poco precisas corresponden a los períodos en que predomina el programa motor (período balístico), mientras que en los períodos con predominio sensorial hay un

100 % de aciertos [29]. En cuanto a la utilización del objeto, por lo general se considera que en los niños de 9 a 11 años ya es equivalente a la de los adultos.

Cualquier referencia a este artículo debe incluir la mención: BLANC Y. et VIEL E. – Comportement moteur du membre supérieur. – Encycl. Méd. Chir. (Elsevier, Paris-France), Kinésithérapie-Rééducation fonctionnelle, 26-012-D-10, 1994, 16 p.

Bibliografía

- [1] **AN KN, BROWNE AO, KORINEK S, TANAKA S, MORREY BF.** Three-dimensional kinematics of glenohumeral elevation. *J Orthop Res* 1991; 9: 143-149
- [2] **BASMAJIAN JV.** Weight-bearing by ligaments and muscles. *Can J Surg* 1961; 4: 166-170
- [3] **BASMAJIAN JV, BAZANT FJ.** Factors preventing downward dislocation of the adducted shoulder joint. *J Bone Joint Surg* 1959; 41 A: 1182-1186
- [4] **BASMAJIAN JV, DE LUCA CJ.** Muscles Alive. Their function revealed by electromyography (5th ed). Williams & Wilkins. Baltimore. 1985
- [5] **BIGUER B, JEANNEROD M, PRABLANC C.** The coordination of eye, head, and arm movements during reaching at a single visual target. *Exp Brain Res* 1982; 46: 301-304
- [6] **BLANC Y.** Electromyographie de l'action des muscles interosseux et lombricaux. Feuilles de Biomécaniques. *J Kinésithérapie* septembre-octobre. 1971; 193: 13-17
- [7] **BUCHNER HJ, HINES MJ, HEMAMI H.** A dynamic model for finger interphalangeal coordination. *J Biomech* 1988; 21: 459-468
- [8] **BUGNION E.** L'articulation de l'épaule chez les animaux et chez l'homme. CR Assoc Anat 3^e session. Lyon. 1901; pp 93-104
- [9] **BULLINGER A.** Locomotion, posture et manipulation manuelle chez l'enfant autiste. In: Lelord G, Muh JP, Petit M, Sauvage D eds. Autisme et troubles du développement global de l'enfant. Expansion Scientifique Française. Paris. 1989; pp 38-43
- [10] **BULLINGER A.** Approche de la perception, la perception visuelle. In: Les difficultés perceptives chez l'enfant IMC et l'enfant né prématuré. Association des Paralysés de France. 1990; pp 1-15
- [11] **BULLINGER A.** Les fonctionnements sensori-moteurs, matériaux pour la « croissance cérébrale ». In: Seron X ed. Psychologie et cerveau. Actes du Colloque de l'APSLF. Presses Universitaires de France. Paris. 1990; pp 77-91
- [12] **BULLINGER A.** Posture control during reaching. In: Bloch H, Bertenthal B eds. Nato ASI series volume: Sensory-Motor Organization and Development in Infancy and early childhood. Dordrecht. Kluwer. 1990; pp 315-320
- [13] **CHACO J, WOLF E.** Subluxation of the glenohumeral joint in hemiplegia. *Am J Phys Med* 1971; 50: 139-143
- [14] **COLACHIS SC, STROHM BR.** Effect of suprascapular and axillary nerve blocks on muscle force in upper extremity. *Arch Phys Med Rehabil* 1971; 52: 22-29
- [15] **CONTI P, BEAUBATON D.** Utilisation des informations visuelles dans le contrôle du mouvement: étude de la précision des pointages chez l'homme. Le Travail Humain. 1976; 1: 19-32
- [16] **COTTON FJ.** Subluxation of the shoulder downward. *Boston Med Surg J* 1921; 185: 405-407
- [17] **DEBIARD C.** Mesures de la position dynamique de la main. Mémoire MCMK. Bois-Larris. 1991
- [18] **DE FREITAS V, VITTI M, FURLANI J.** Electromyographic analysis of the levator scapulae and rhomboideus major muscle in movements of the shoulder. *Electromyogr Clin Neurophysiol* 1979; 19: 335-342
- [19] **DEMPSTER WT.** Mechanisms of shoulder movement. *Arch Phys Med Rehabil* 1965; 46 A: 49-70
- [20] **DIMNET J, CARRET JP, GONON GP, FISHER LP, UEZAKI N.** Etude cinématique de la scapulo-humérale. Journées de l'épaule. Lyon. 1978; pp 19-30
- [21] **DUCHENNE DE BOULOGNE GB.** Physiologie des mouvements. Fac simile ed 1867. *Am Med Phys No special* 1967; 872 p
- [22] **ELLIOTT JM, CONNOLLY KJ.** A classification of manipulative hand movements. *Dev Med Child Neurol* 1984; 26: 283-296
- [23] **FAIRBANK TJ.** Fracture-subluxations of shoulder. *J Bone Joint Surg* 1948; 30 B: 454-460
- [24] **FIELD J.** Relation of young infants' reaching behavior to stimulus distance and solidity. *Dev Psychol* 1976; 12: 444-448
- [25] **FORREST WJ, BASMAJIAN JV.** Functions of human thenar and hypothenar muscles: an electromyographic study of twenty-five hands. *J Bone Joint Surg* 1965; 47 A: 1585-1594
- [26] **FORREST WJ, KHAN MA.** Electromyography of the flexor pollicis brevis and adductor pollicis in twenty hands: a preliminary report (Transactions of the Internat Soc EMG Kines, Montréal 1968). *Electromyography* 1968; 8 (suppl): 49-53
- [27] **FREEDMAN L, MUNRO RH.** Abduction of the arm in the scapular plane: scapular and glenohumeral movements. *J Bone Joint Surg* 1966; 18 A: 1503-1510
- [28] **GENOUD P, HOFFMEYER P.** Quantification of three dimensional passive circumduction of the glenohumeral joint (A cadaveric study). Proceedings of the XIVth Congress of the International Society of Biomechanics. Paris. 1993; pp 462-463
- [29] **HATWELL Y.** Toucher l'espace. Presses Universitaires de Lille. Lille. 1986; 374 p
- [30] **HATWELL Y, ORLIAGUET JP.** L'organisation spatiale d'un observateur stationnaire. *Psychol Franc* 1986; 31: 7-13
- [31] **HOFSTEN von C, FAZEL-ZANDY S.** Development of visually guided hand orientation in reaching. *J Exp Child Psychol* 1984; 38: 208-219
- [32] **INMAN VT, SAUNDERS JR, ABBOT LC.** Observations on the function of the shoulder joint. *J Bone Joint Surg* 1944; 26: 1-30
- [33] **ITOI E, MOTZKIN NE, MORREY BF, AN KN.** Scapular inclination and inferior stability of the shoulder. *J Shoulder Elbow Surg* 1992; 1: 131-139
- [34] **JEANNEROD M.** Corrélatifs fonctionnels de la préférence manuelle. *Pédiatrie* 1990; 45: 157-163
- [35] **JONSSON B, OLOFSSON BM, STEFFNER L Ch.** Function of the teres major, latissimus dorsi and pectoralis major muscles. *Acta Morphol Neerl-Scand* 1972; 9: 275-280
- [36] **KADABA MP, COLE A, WOOTTEN ME et al.** Intramuscular wire electromyography of the subscapularis. *J Orthop Res* 1992; 10: 394-397
- [37] **KERTESZ A, POLK M, BLACK SE, HOWELL J.** Anatomical asymmetries and functional laterality. *Brain* 1992; 115: 589-605
- [38] **KLINE SC, BEACH V, MOORE JR.** The transverse carpal ligament. *J Bone Joint Surg* 1992; 74 A: 1478-1485
- [39] **KOTTKE FJ, HALPERN D, EASTON JK, OZEL AT, BURRILL CA.** The training of coordination. *Arch Phys Med Rehabil* 1978; 59: 567-572
- [40] **KRONBERG M, BROSTRÖM LA, NEMETH G.** Differences in shoulder muscle activity between patients with generalized joint laxity and normal controls. *Clin Orthop* 1991; 269: 181-192
- [41] **KRONBERG M, NEMETH G, BROSTRÖM LÄ.** Muscle activity and coordination in the normal shoulder. An electromyographic study. *Clin Orthop* 1990; 257: 76-85
- [42] **KUMAR VP, BALASUBRAMANIAM P.** The role of atmospheric pressure in stabilising the shoulder: an experimental study. *J Bone Joint Surg* 1985; 67 B: 719-721
- [43] **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* 1989; 244: 172-175
- [44] **LANDSMEER JM, LONG C.** The mechanism of finger control, based on electromyograms and location analysis. *Acta Anat* 1965; 60: 330-347
- [45] **LIVINGSTON RB, PAILLARD J, TOURNAY A, FESSARD A.** Plasticité d'une synergie musculaire dans l'exécution d'un mouvement volontaire chez l'homme. *J Physiologie* 1951; 43: 605-619
- [46] **LONG C.** A theory of hand control based on EMG findings. Proceedings 6th Intl. Congress of Physical Medicine. 1972; pp 290-297
- [47] **LONG C, BROWN ME.** Electromyographic kinesiology of the hand: muscles moving the long finger. *J Bone Joint Surg* 1964; 46 A: 1683-1706
- [48] **LONG C, BROWN ME.** Electromyographic kinesiology of the hand. Part III. Lumbricalis and flexor digitorum profundus to the long finger. *Arch Phys Med* 1962; 43: 450-460
- [49] **LONG C, BROWN ME, WEISS G.** Electromyographic kinesiology of the hand. Part II. Third dorsal interosseus and extensor digitorum of the long finger. *Arch Phys Med* 1960; 42: 559-565
- [50] **LONG C, CONRAD PW, HALL EA, FURLER SL.** Intrinsic - extrinsic muscle control of the hand in power grip and precision handling. *J Bone Joint Surg* 1970; 52 A: 853-867
- [51] **LONGO BULL M, DE FREITAS V, VITTI M.** Electromyographic study of the trapezius (pars superior) and levator scapulae muscles in circumduction and pendular oscillation of the arm. *Electromyogr Clin Neurophysiol* 1984; 24: 511-519
- [52] **MORREY BF, AN KN.** Biomechanics of the shoulder. In: Rockwood C, Matsen F eds. The shoulder. Saunders. Philadelphia. 1990; pp 208-245
- [53] **MORREY BF, CHAO EY.** Passive motion of the elbow joint, a biomechanical analysis. *J Bone Joint Surg* 1976; 58 A: 501-508
- [54] **NAJENSON Th, PIKIELNY SS.** Malalignment of the gleno-humeral joint following hemiplegia. *Ann Phys Med* 1965; 8: 96-99
- [55] **NAPIER JR.** The prehensile movements of the human hand. *J Bone Joint Surg* 1956; 38 B: 902-913
- [56] **NATHAN RH.** The isometric action of the forearm muscles. *J Biomech Eng* 1992; 114: 162-169
- [57] **NORRSELL U, OLAUSSON H.** Human, tactile, directional sensibility and its peripheral origins. *Acta Physiol Scand* 1992; 144: 155-161
- [58] **PEARL ML et al.** A system for describing positions of the humerus relative to the thorax and its use in the presentation of several functionally important arm positions. *J Shoulder Elbow Surg* 1992; 1: 113-117
- [59] **PELISSON D, PRABLANC C, GOODALE MA, JEANNEROD M.** Visual control of reaching movements without vision of the limb. *Exp Brain Res* 1986; 62: 303-311
- [60] **PERRY J.** Biomechanics of the shoulder. In: Rowe CR ed. The shoulder. Churchill Livingstone. New York. 1988; pp 17-34
- [61] **POPPEL NK, WALKER PS.** Normal and abnormal motion of the shoulder. *J Bone Joint Surg* 1976; 58 A: 195-201
- [62] **POPPEL NK, WALKER PS.** Forces at the glenohumeral joint in abduction. *Clin Orthop* 1978; 135: 165-170
- [63] **PRABLANC C, ECHALLIER JE, JEANNEROD M, KOMILIS E.** Optimal response of eye and hand motor systems in pointing at a visual target. II: Static and dynamic visual cues in the control of hand movement. *Biol Cybern* 1979; 35: 183-187
- [64] **PRABLANC C, ECHALLIER JF, KOMILIS E, JEANNEROD M.** Optimal response of eye and hand motor systems in pointing at a visual target. I: Spatio-temporal characteristics of eye and hand movements and their relationships when varying the amount of visual information. *Biol Cybern* 1979; 35: 113-124
- [65] **RABISCHONG P.** Physiologie de la sensation. In: Tubiana ed. Traité de Chirurgie de la Main. Paris. Masson. 1980; 464-491
- [66] **RAIKOVA R.** A general approach for modelling and mathematical investigation of the human upper limb. *J Biomech* 1992; 25: 857-867
- [67] **REIS FP, de CAMARGO AM, VITTI M, de CAVALRHO CA.** Electromyographic study of the subclavius muscle. *Acta Anat* 1979; 105: 284-290
- [68] **ROCKWOOD CA, MATSEN FA.** The shoulder (Vol 1). Saunders. Philadelphia. 1990
- [69] **ROGERS MW, KUKULKA CG, SODERBERG GL.** Age-related changes in postural responses preceding rapid self-paced and reaction time arm movements. *J Gerontol* 1992; 47: 159-165
- [70] **SCHLESINGER G.** Der mechanische Aufbau der künstlichen Glieder. In: Ersatzglieder und Arbeitshilfen. Springer Verlag. Berlin. 1919
- [71] **SIMARD TG.** Effets de la position des segments du membre supérieur sur l'activité myoelectrique de l'épaule. *Union Med Can* 1973; 102: 1562-1566
- [72] **SINKJAER T, HAYASHI R.** Regulation of wrist stiffness by the stretch reflex. *J Biomech* 1989; 22: 1133-1140
- [73] **SWANSON AB, MATEV IB, DEGROOT G.** The strength of the hand. *Inter-Clin Info Bull* 1974; 13/10: 1-8
- [74] **TOFT R, BERME N.** Biomechanical analysis of the joints of the thumb. *J Biomech* 1980; 13: 353-360
- [75] **TOURNAY A, FESSARD A.** Etude électromyographique de la synergie entre l'abducteur du pouce et le muscle cubital postérieur. *Rev Neurol* 1948; 80: 631
- [76] **TOURNAY A, PAILLARD J.** Nouvelles recherches électromyographiques sur les synergies musculaires normales. Analyse polygraphique. *Rev Neurol* 1952; 86: 165-169
- [77] **TRAVILL A, BASMAJIAN JV.** Electromyography of the supinators of the forearm. *Anat Rec* 1961; 139: 557-560
- [78] **VIEL E, GREENBLATT A.** Statistical analysis of differential attitudes of digits during precision pinch and power grip. *VA Report* 1979; 330: 79
- [79] **ZATTARA M.** Ajustement posturaux anticipateurs associés aux mouvements du membre supérieur [Thèse]. Université Paris-Sud. 1982; 134 p.