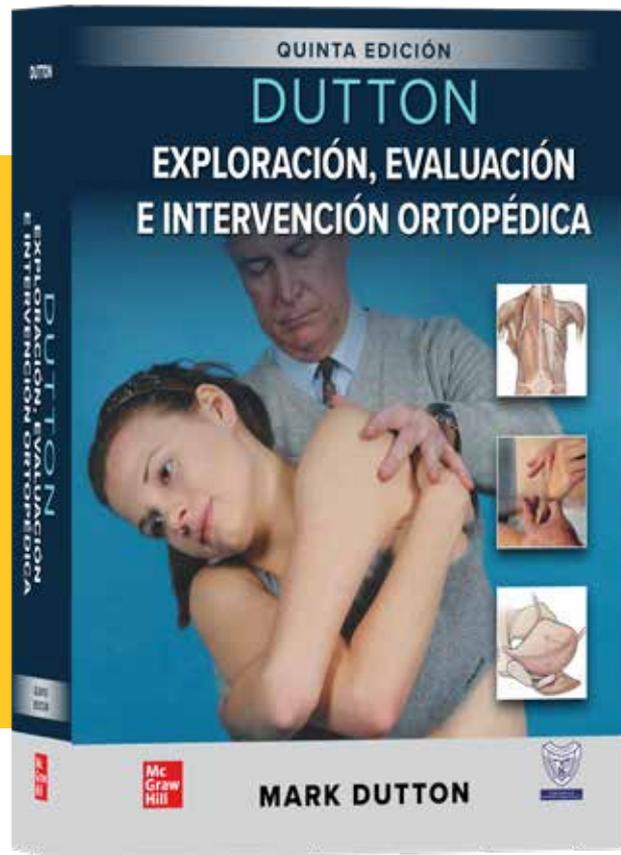


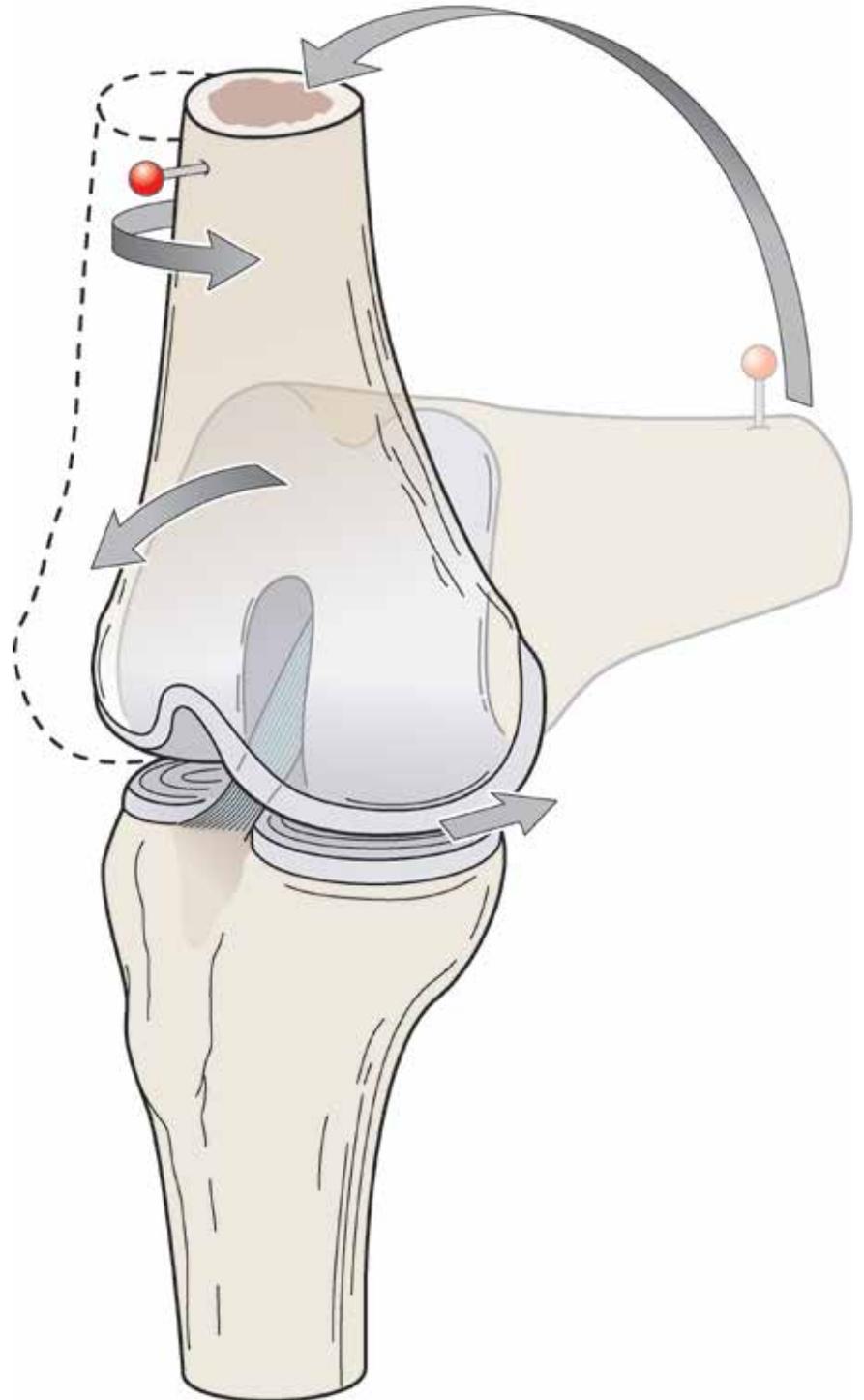
Capítulo de muestra

Sección 1:
Anatomía



SECCIÓN I

ANATOMÍA



CAPÍTULO 1

Sistema musculoesquelético

OBJETIVOS DEL APRENDIZAJE

Al finalizar este capítulo serás capaz de:

1. Describir los distintos tipos de tejido que conforman al sistema musculoesquelético.
2. Describir la mecánica tisular, así como las diferencias y similitudes estructurales entre músculos, tendones, fascia y ligamentos.
3. Describir los diferentes tipos de articulaciones y sus diversas características.
4. Definir las distintas terminologías utilizadas para describir la posición, los movimientos y las relaciones de las articulaciones.
5. Expresar definiciones de los términos biomecánicos de uso común.
6. Describir los diferentes planos del cuerpo.
7. Definir el centro de gravedad del cuerpo y su ubicación.
8. Describir los diferentes ejes del cuerpo y los movimientos que ocurren alrededor de ellos.
9. Definir los términos *movimiento osteocinémático* y *movimiento artrocinémático*.
10. Diferenciar entre los distintos tipos de movimiento que pueden ocurrir en las superficies articulares.
11. Describir la biomecánica básica del movimiento de las articulaciones en términos de sus relaciones cóncavo-convexas.
12. Enumerar los diversos tipos de palancas que se encuentran dentro del cuerpo y proporcionar ejemplos de cada una.
13. Describir la diferencia entre una cadena cinemática cerrada y una cadena cinemática abierta y cómo cada una puede influir en la prescripción de un ejercicio.
14. Definir los términos *encaje cerrado* y *encaje abierto*, así como el significado de cada uno.

PERSPECTIVA

El adecuado desarrollo embrionario del sistema musculoesquelético requiere una morfogénesis coordinada de los tejidos fundamentales del organismo. En todo el cuerpo humano existen cuatro tipos principales de tejidos:

- ▶ **Epitelial.** Cubre todas las superficies internas y externas del cuerpo e incluye estructuras como la piel y el revestimiento interno de los vasos sanguíneos.
- ▶ **Conectivo.** El tejido conectivo (CT, *connective tissue*) incluye cuatro clases diferentes: el propio CT, hueso, cartílago y tejido sanguíneo. En el embrión, el tejido muscular y su fascia se forman como una diferenciación del mesodermo paraxial que se divide en somitas a cada lado del tubo neural y la notocorda. El cartílago y el hueso de la columna vertebral, así como las costillas, se desarrollan a partir del esclerotoma, que es la parte anterior (ventral) de la somita.^{1,2} El dermatomiotoma, que es el lado posterior (dorsal) de la somita, da lugar a la parte suprayacente de la dermis de la espalda, los músculos estriados del cuerpo y las extremidades.² El CT proporciona apoyo estructural y metabólico para otros tejidos y órganos del cuerpo.
- ▶ **Muscular.** Los músculos se clasifican por su función como voluntarios o involuntarios y por su estructura como lisos, estriados o cardíacos. Hay cerca de 430 músculos estriados en el cuerpo, cada uno de los cuales puede considerarse anatómicamente como un órgano separado. De estos 430 músculos, alrededor de 75 pares proporcionan la mayoría de los movimientos y posturas corporales.²
- ▶ **Nervioso.** Este tejido proporciona un modo de comunicación bidireccional entre el sistema nervioso central (cerebro y médula espinal) y los músculos, así como entre los órganos sensoriales y varios sistemas (véase capítulo 3).

TEJIDO CONECTIVO

El tejido conectivo tiene una matriz suelta y flexible, denominada sustancia básica. Las células más comunes dentro de este CT son los fibroblastos, que producen colágeno, elastina y las fibras reticulares:

- El colágeno es un grupo de proteínas naturales. Se trata de una familia de proteínas de la matriz extracelular (ECM, *extracellular matrix*) que desempeñan un papel dominante en el mantenimiento de la integridad estructural de varios tejidos y en proporcionar resistencia a la tracción en los mismos. La ECM se forma a partir de subunidades de glicosaminoglicanos (GAG, *glycosaminoglycan*) que son largas cadenas de polisacáridos que contienen aminoazúcares y son hidrófilas en extremo, para permitir la rápida difusión de las moléculas solubles en el agua y la fácil migración de las células. Los proteoglicanos, componente principal de la ECM, son macromoléculas que consisten en una estructura proteica a la que se unen los GAG. Hay dos tipos de GAG: sulfato de condroitina y sulfato de queratina.² Las glicoproteínas, otro componente de la ECM, consisten en fibronectina y trombospondina, y funcionan como estructuras adhesivas para la reparación y la regeneración.^{2,3}
- Las fibras elásticas, como su nombre lo indica, están compuestas por una proteína llamada *elastina*, que proporciona propiedades elásticas a los tejidos en los que se encuentra.⁴ Las fibras de elastina pueden estirarse, pero casi siempre vuelven a su longitud original cuando se libera la tensión. Por tanto, estas mismas determinan los patrones de distensión y de retroceso en la mayoría de los órganos, incluida la piel, los pulmones, los vasos sanguíneos y el CT. Los haces de colágeno y elastina se combinan para formar una matriz de fascículos en el CT. Esta última está presente al interior de los haces de colágeno primario, así como en aquellos que los rodean.²
- Las fibras reticulares están compuestas por un tipo de colágeno que secretan las células reticulares. Estas fibras se entrecruzan para formar una malla fina, llamada reticulina, que actúa como soporte en la médula ósea, en los tejidos, en los órganos del sistema linfático y en el hígado.

Las diversas características del colágeno difieren según sea suelto o denso. Las especificaciones anatómicas y funcionales de estos dos tipos de colágeno se resumen en el **cuadro 1-1**. Las fibras colágenas y elásticas son escasas y están dispuestas de manera irregular en el CT suelto, pero se compactan en el CT denso.

En las siguientes secciones se describen los diversos tipos de CT con respecto al sistema musculoesquelético.

Fascia

La fascia, por ejemplo, la toracolumbar y la plantar, se considera un CT suelto que brinda soporte y protección a una articulación y actúa como una interconexión entre los

tendones, la aponeurosis, los ligamentos, las cápsulas, los nervios y los componentes intrínsecos del músculo.² La fascia puede clasificarse como fibrosa o no fibrosa, los componentes fibrosos consisten, sobre todo, en fibras de colágeno y elastina, mientras que la parte no fibrosa se trata de una sustancia básica amorfa.² Existen tres tipos diferentes de fascia, a saber, superficial, profunda y visceral. Se han desarrollado varios modelos biomecánicos tridimensionales del sistema fascial humano, que correlacionan el movimiento disfuncional con distintos valores anormales de tensión interrelacionados en toda la red de la fascia. En particular, se ha involucrado a la fascia profunda con el retorno venoso profundo, con un posible papel en la propiocepción y con la respuesta a la tracción mecánica inducida por la actividad muscular en diferentes regiones.⁵ Sin embargo, todavía hay poca evidencia para justificar tales afirmaciones. Los estudios histológicos de la fascia profunda de las extremidades muestran que está formada por fibras elásticas y de colágeno onduladas dispuestas en capas.⁶ Cada capa de colágeno está alineada en una dirección diferente, lo que permite cierto grado de estiramiento y capacidad de retroceso.

Tendones

Los tendones son CT densos y dispuestos de forma regular que unen el músculo con el hueso en cada extremo del músculo. A primera vista, los tendones parecen ser estructuras muy simples en forma de cuerda. Sin embargo, una inspección más detallada revela que la estructura y las propiedades del material de los tendones no son universales y, por tanto, ningún tendón puede tratarse de la misma manera que otro. Hoy en día, las imágenes médicas permiten a los médicos e investigadores caracterizar con mayor precisión las estructuras del tendón que le proporcionan su capacidad fisiológica. El tipo de célula predominante es el tenocito, un componente que es sensible al entorno de carga mecánica y es capaz de controlar la estructura del tendón.⁷

Las triples hélices que forman el colágeno (tropocolágeno) del tendón se juntan para crear las microfibrillas, que se intercalan para producir fibrillas, las cuales se unen para formar fibras, que se combinan para componer fascículos, que, a su vez, se agrupan para integrar un tendón.⁸ Este se adapta a un entorno de carga de alta resistencia a través de un diseño estructural de múltiples escalas: los enlaces de hidrógeno de los polipéptidos crean una fuerte estructura de triple hélice de una sola molécula de colágeno; los enlaces covalentes entrecruzados entre las moléculas de colágeno (fibrillas) permiten que las fibras de colágeno

CUADRO 1-1 Colágeno suelto y denso

Tipo de articulación	Ubicación anatómica	Orientación de la fibra	Especialización mecánica
Tejido conjuntivo irregular denso	Compone la capa fibrosa externa de la cápsula articular, forma ligamentos, hueso, aponeurosis y tendones	Fibras paralelas, estrechamente alineadas	Ligamento: une los huesos y restringe el movimiento no deseado en las articulaciones; resiste la tensión en varias direcciones Tendón: une el músculo al hueso
Tejido conjuntivo irregular suelto	Se encuentra en cápsulas, músculos, nervios, fascia y piel	Orientación aleatoria de la fibra	Proporciona soporte estructural

resistan fuerzas enormes; estas fibras se agrupan dentro de una ECM (fascículos) que limita la extensión de la infiltración neurovascular y maximiza la integridad mecánica, así como el agrupamiento de los fascículos en haces de fibras primarias, secundarias y terciarias que reduce el impacto del fallo local de las fibrillas en todo el tejido.^{9,10} La posición y la longitud de los tendones permiten que la masa muscular esté a una distancia óptima de la articulación sobre la que está actuando. Esto crea espacio, pero también permite que el tendón funcione como un brazo de palanca (véase Palancas más adelante), alejando el punto de acción del centro de rotación (COR, *center of rotation*), reduciendo así las fuerzas necesarias para el movimiento.⁷ De esta manera, debido a este diseño, los tendones proporcionan un cambio gradual en las características del material, lo que minimiza el desarrollo de áreas de concentración de estrés donde es probable que ocurra un fallo.

Los tendones deben tener la rigidez suficiente para permitir una transferencia de fuerza eficiente desde los músculos, lo que posibilita el movimiento articular, pero también deben incorporar un grado de elasticidad que les permita estirar y almacenar energía elástica.⁷ Otros tendones deben modular la contracción muscular con extrema precisión, para realizar actividades complejas como escribir.⁷ El grosor de cada tendón varía, pero es proporcional al tamaño del músculo del que se origina. La vascularización dentro del tendón es relativamente escasa, pero su extensión no es siempre la misma y los tendones con menor vascularización pueden ser más vulnerables tanto a la degeneración progresiva como a un potencial de curación reducido.¹¹ Dentro de los fascículos de los tendones, que se mantienen unidos mediante el CT suelto denominado *endotenón*, los componentes del colágeno se orientan de forma unidireccional. El endotenón contiene vasos sanguíneos, linfáticos y nervios, y permite movimientos longitudinales de los fascículos individuales cuando se aplican fuerzas de tracción a la estructura. El CT que rodea a los grupos de fascículos o a toda la estructura se llama *epitenón*. Este contiene los suministros vasculares, linfáticos y nerviosos del tendón. Una vaina peritendinosa (paratenón), que se compone del CT areolar suelto, además de fibras nerviosas sensoriales y autónomas, rodea todo el tendón.¹² Esta vaina consta de dos capas: una interna (visceral) y una externa (parietal) con puentes de conexión ocasionales (mesotenón). El paratenón está muy vascularizado y es responsable de una parte importante del suministro de sangre a través de una serie de vínculos transversales, que funcionan como conductos para que los vasos sanguíneos lleguen al tendón. Además, el suministro de sangre a este último proviene de otras dos fuentes: la unión musculotendinosa (MTJ, *musculotendinous junction*) y la inserción ósea.

PERLAS CLÍNICAS

Cuando el paratenón está revestido con células sinoviales de estructura variable se llama tenosinovio, pero cuando está cubierto con una vaina de doble capa que no tiene células sinoviales se conoce como tenovagio.²

Las propiedades mecánicas del tendón provienen de su estructura altamente orientada. Los tendones normales mues-

tran propiedades mecánicas viscoelásticas que confieren efectos en el tejido que dependen del tiempo y de la velocidad. En específico, los tendones son más elásticos a tasas de deformación más bajas y más rígidos a tasas más altas de carga de tracción (véase capítulo 2). Asimismo, se deforman menos que los ligamentos bajo una carga aplicada y, por tanto, pueden transmitir la misma del músculo al hueso.⁷

PERLAS CLÍNICAS

- ▶ A tasas de carga bajas, los tendones son más viscosos o dúctiles y, en consecuencia, pueden absorber más energía en comparación con tasas de carga altas.¹³
- ▶ A tasas de carga altas, los tendones se vuelven más frágiles y absorben menos energía, pero son más efectivos para transferir las cargas.¹³

Por tanto, la carga del tendón se puede incrementar de dos maneras cuando se prescribe ejercicio: por la carga externa o por la velocidad del movimiento.¹³

Los pacientes con tendinopatía presentan tendones más gruesos, pero con menor capacidad de almacenamiento de energía, lo que significa que, para la misma carga, sus tendones muestran tensiones más altas que las de individuos sanos.¹⁴ Las propiedades materiales y estructurales del tendón aumentan desde el nacimiento hasta la madurez y luego disminuyen desde la madurez hasta la vejez.⁸ Aunque los tendones resisten bien las fuerzas de tracción intensas, soportan menos las fuerzas de corte y proporcionan poca resistencia a una fuerza de compresión (véase capítulo 2). Además de la parte principal del tendón que soporta la carga, existe una extensa red de septos (endotendones), donde se localizan, sobre todo, los nervios y los vasos.¹⁴

Un tendón se puede dividir en las siguientes tres secciones fundamentales¹⁵:

Unión hueso-tendón. En la mayoría de las interfaces tendón-hueso las fibras de colágeno se insertan de forma directa en el hueso, en una transición gradual de la composición del material. La unión física del tendón con el hueso se conoce como entesis¹⁶ y es una interfaz vulnerable a las lesiones agudas y crónicas.^{7,17} Una de las funciones de la entesis es absorber y distribuir la concentración de estrés que se produce en la unión en un área más amplia.

- ▶ La sustancia media del tendón. Las lesiones por uso excesivo pueden ocurrir en la sustancia media del tendón, pero no con tanta frecuencia como en la entesis.
- ▶ Unión músculo-tendinosa (MTJ). La MTJ es el lugar en que se une el músculo con el tendón. La MTJ comprende numerosas interdigitaciones entre las células musculares y el tejido del tendón, que se asemejan a dedos entrelazados.

Ligamentos

Los ligamentos esqueléticos son bandas fibrosas de CT denso que conectan los huesos a través de las articulaciones. Los ligamentos pueden nombrarse a partir de los huesos en los que se insertan (coracohumeral), por su forma (deltoides del tobillo) o por sus relaciones entre sí (cruzado).¹⁸ La estructura macroscópica de un ligamento varía según la

ubicación (intraarticular o extraarticular y capsular) y la función.¹⁹ Los ligamentos que aparecen como bandas blancas densas o cordones de CT están compuestos principalmente por agua (alrededor de 66%) y colágeno (sobre todo colágeno tipo I [85%] pero con pequeñas cantidades de tipo III) que constituye la mayor parte del peso seco.² El colágeno de los ligamentos tiene una organización menos unidireccional que la de los tendones, pero su modelo estructural aún proporciona rigidez (resistencia a la deformación, véase capítulo 2). Pequeñas cantidades de elastina (1% del peso seco) están presentes en los ligamentos, con excepción del amarillo y el nucal de la columna, que contienen más. La organización celular de los ligamentos los hace ideales para soportar cargas de tracción y para tensar o aflojar las articulaciones en diferentes posiciones. A nivel microscópico, las fibras de colágeno (fascículos) estrechamente espaciadas se alinean a lo largo del eje largo del ligamento y se organizan en una serie de haces delimitados por una capa celular, el endoligamento y todo el ligamento está encerrado en una capa biocelular neurovascular conocida como epiligamento.¹⁸ Los ligamentos contribuyen a la estabilidad de la función articular al prevenir el movimiento excesivo, actuar como guías o controles para dirigir el movimiento y proporcionar información propioceptiva para la función articular a través de las terminaciones nerviosas sensoriales (véase capítulo 3) y como uniones a la cápsula articular.² Muchos ligamentos comparten funciones. Por ejemplo, mientras que el ligamento cruzado anterior de la rodilla se considera la restricción principal para la traslación anterior de la tibia en relación con el fémur, los ligamentos colaterales y la cápsula posterior de la rodilla también ayudan en esta función (véase capítulo 20).¹⁸ La distribución vascular y nerviosa de los ligamentos no es homogénea. Por ejemplo, la mitad del ligamento es típicamente avascular, mientras que los extremos proximal y distal disfrutan de un abundante suministro de sangre. De manera similar, los extremos de inserción de los ligamentos están más innervados que la sustancia media.

Cartílago

El tejido del cartílago se presenta en tres formas: hialino, elástico y fibrocartílago.

- El cartílago hialino, también conocido como articular, cubre los extremos de los huesos largos y permite que se produzca un movimiento casi sin fricción entre las superficies de una articulación diartrodial (sinovial). El cartílago articular es un material viscoelástico altamente organizado compuesto por células llamadas *condrocitos*, agua y una ECM.

PERLAS CLÍNICAS

Los condrocitos son células especializadas responsables del desarrollo del cartílago y del mantenimiento de la ECM; estos producen agregano, proteína de enlace y hialuronano que son depuestos en la ECM, donde se agregan de forma espontánea.² El agregano junto con el colágeno forman un material compuesto fuerte, poroso, permeable y reforzado con fibras. Los condrocitos detectan cambios mecánicos en la matriz circundante a través de los filamentos intracitoplasmáticos y los cilios cortos en la superficie de las células.¹⁹

- El cartílago articular, el más abundante dentro del cuerpo, carece de vasos sanguíneos, linfáticos y de nervios.² La mayoría de los huesos del cuerpo se forman primero como cartílago hialino y luego se convierten en hueso mediante un proceso llamado *osificación endocondral*. El cartílago articular sirve para distribuir las fuerzas articulares sobre una gran área de contacto, disipando así las fuerzas asociadas con la carga. Esta distribución de fuerzas permite que este tipo de cartílago permanezca sano y por completo funcional durante décadas de vida. El grosor normal del mismo está determinado por las presiones de contacto a través de la articulación; cuanto más altas son las presiones máximas, más grueso es el cartílago.¹⁹ Por ejemplo, la rótula tiene el cartílago articular más grueso del cuerpo.
- Este tipo de cartílago se puede subdividir en cuatro zonas distintas con morfología celular, composición biomecánica, orientación del colágeno y propiedades estructurales diferentes, de la siguiente manera:
 - *Zona superficial*. Se encuentra adyacente a la cavidad articular y comprende entre 10 y 20% del espesor del cartílago articular; funciona para proteger las capas más profundas del estrés por cizallamiento. Las fibras de colágeno dentro de esta zona están compactas y alineadas en paralelo a la superficie articular. Esta área permanece en contacto con el líquido sinovial y maneja la mayoría de las propiedades de tracción del cartílago.
 - *Zona media (de transición)*. Esta proporciona un puente anatómico y funcional entre las zonas superficial y profunda; de igual manera, la orientación de las fibrillas de colágeno está organizada en forma oblicua. Esta zona comprende de 40 a 60% del volumen total del cartílago. En cuanto a funcionalidad, la zona media es la primera línea de resistencia a las fuerzas de compresión.
 - *Capa profunda o radial*. La capa profunda comprende 30% del volumen de la matriz. Se caracteriza por fibras de colágeno alineadas en forma radial y perpendiculares a la superficie de la articulación, y tienen un alto contenido de proteoglicanos. Con respecto a su función, la zona profunda es la encargada de proporcionar la mayor resistencia a las fuerzas de compresión.
 - *Línea de calcificación (zona de área)*. La línea de calcificación distingue la zona profunda del cartílago calcificado, el área que evita la difusión de nutrientes desde el tejido óseo hacia el cartílago.
- El cartílago elástico (amarillo) es un CT muy especializado que se encuentra principalmente en lugares como el oído externo y partes de la laringe.
- El fibrocartílago, también conocido como cartílago blanco, funciona como un amortiguador tanto en las articulaciones que soportan su peso como en las que no lo hacen. Su gran contenido de fibra, reforzado con numerosas fibras de colágeno, lo hace ideal para resistir gran estrés en todas las direcciones. El fibrocartílago es un tejido avascular, alinfático y aneural que obtiene su nutrición mediante un sistema de doble difusión.² Entre los ejemplos de fibrocartílago se incluyen la sínfisis del pubis, el disco intervertebral y los meniscos de la rodilla.

CUADRO 1-2 Estructura general del hueso			
Sitio	Comentario	Afectaciones	Resultado
Epífisis	Se desarrolla principalmente bajo presión La apófisis se forma bajo tracción Forma los extremos de los huesos Apoya la superficie articular	Displasias epifisarias Traumatismo de superficie articular Lesión por uso excesivo Daño en el suministro de sangre	Articulaciones distorsionadas Cambios degenerativos Desarrollo fragmentado Necrosis avascular
Fisis	Placa epifisaria o de crecimiento Responde al crecimiento y a las hormonas sexuales Vulnerable antes de la aceleración del crecimiento Mecánicamente débil	Displasia fisaria Trauma Epífisis deslizada	Baja estatura Crecimiento deformado o angulado, o detención del crecimiento
Metáfisis	Remodelación del extremo del hueso expandido El hueso esponjoso se cura rápidamente Vulnerable a la osteomielitis Facilita la unión del ligamento	Osteomielitis Tumores Displasia metafisaria	Formación de secuestro Forma de hueso alterada Crecimiento distorsionado
Diáfisis	Forma el eje del hueso Gran superficie para el origen muscular Hueso cortical compacto significativo Fuerte en compresión	Fracturas Displasias diafisarias Curación más lenta que en la metáfisis	Capaz de remodelar la angulación No se puede remodelar la rotación Encapsulamiento con infección La displasia da densidad y forma alteradas

Reproducido con permiso de Reid DC. *Sports Injury Assessment and Rehabilitation*. New York, NY: Churchill Livingstone; 1991.

Hueso

- ▶ El hueso es una forma de CT muy vascularizada, compuesta por colágeno, fosfato cálcico, agua, proteínas amorfas y células. Es el más rígido de los CT (cuadro 1-2). A pesar de lo anterior, el hueso es un tejido dinámico que experimenta un metabolismo y una remodelación constantes. El colágeno del hueso se produce de la misma manera que el del ligamento y el tendón, pero por medio de una célula diferente, el osteoblasto. A nivel anatómico macroscópico, cada hueso tiene una morfología distinta que comprende tanto al hueso cortical como al esponjoso. El primero se encuentra en la capa exterior, mientras que el segundo se ubica dentro de las regiones epifisarias y metafisarias de los huesos largos, así como en todo el interior de los huesos cortos. El desarrollo esquelético se produce de dos formas:
- ▶ Osificación intramembranosa. Las células madre mesenquimales dentro del mesénquima o la cavidad medular de un hueso inician el proceso de osificación intramembranosa. Este tipo de osificación ocurre en el cráneo y en los huesos faciales y, parcialmente, en las costillas, la clavícula y la mandíbula.
- ▶ Osificación endocondral. El primer sitio de osificación ocurre en el centro primario de osificación, que se encuentra en medio de la diáfisis (eje). Casi al momento del nacimiento, aparece un centro de osificación secundario en cada epífisis (extremo) de los huesos largos. Entre el hueso formado por los centros de osificación primario y secundario, el cartílago persiste como placas epifisarias (de crecimiento) entre la diáfisis y la epífisis de un hueso largo. Este tipo de osificación ocurre en los huesos apendiculares y axiales.

El pericondrio que rodea el cartílago se convierte en el periostio. Los condrocitos en el centro primario de osificación

comienzan a crecer (hipertrofia) y secretan fosfatasa alcalina, una enzima esencial para la deposición de los minerales. A continuación, se produce la calcificación de la matriz y la apoptosis (un tipo de muerte celular que involucra una secuencia programada de eventos que elimina ciertas células) de los condrocitos hipertróficos. Esto crea cavidades dentro del hueso. Hoy en día, se desconoce el mecanismo exacto de la hipertrofia y de la apoptosis de los condrocitos. Los condrocitos hipertróficos (antes de la apoptosis) también secretan una sustancia llamada *factor de crecimiento de las células endoteliales vasculares* que induce la formación de vasos sanguíneos desde el pericondrio. Los vasos sanguíneos que forman el brote perióstico invaden la cavidad que dejaron los condrocitos y se ramifican en direcciones opuestas a lo largo del eje. Estos vasos transportan células osteoprogenitoras y hematopoyéticas dentro de la cavidad, las últimas forman la médula ósea más adelante. Los osteoblastos, que se diferencian de las células osteoprogenitoras que ingresan a la cavidad a través del brote perióstico, utilizan la matriz calcificada como andamio y comienzan a secretar osteoide que forma el hueso trabecular. Los osteoclastos, formados por macrófagos, descomponen el hueso esponjoso para construir la cavidad medular (médula ósea).

La función del hueso es proporcionar soporte, mejorar la función de palanca, proteger las estructuras vitales, proporcionar uniones tanto para los tendones como para los ligamentos y almacenar minerales, particularmente calcio. Los huesos también pueden servir como puntos de referencia útiles durante la fase de palpación en la exploración. La fuerza del hueso está relacionada directamente con su densidad. Para el médico, es importante la diferencia entre el hueso en proceso de maduración y el hueso maduro. La placa epifisaria o de crecimiento de un hueso en proceso de maduración se puede dividir en las siguientes cuatro zonas distintas:²⁰

- ▶ Zona de reserva. Produce y almacena la matriz.

- ▶ Zona proliferativa. Produce la matriz y es el sitio para el crecimiento longitudinal de las células óseas.
- ▶ Zona hipertrófica. Se subdivide en zona de maduración, degenerativa y de calcificación provisional. Dentro de la zona hipertrófica es donde se prepara la matriz para la calcificación y donde al final esta se calcifica. La zona hipertrófica es la más susceptible de lesionarse debido al bajo volumen de la matriz ósea y a la gran cantidad de células inmaduras en desarrollo en esta región.²
- ▶ Metáfisis ósea. Es la parte del hueso que crece durante la niñez.

Tejido del músculo estriado

Los músculos estriados constituyen alrededor de 30 a 40% de la masa corporal total y tienen muchas funciones vitales, como la generación de movimiento, la protección, la respiración, la regulación térmica y el metabolismo.²¹ La microestructura y la composición este tipo de músculo se han estudiado con detalle. El tipo de tejido conocido como *músculo estriado* consiste en células musculares individuales que trabajan juntas para producir el movimiento de las palancas óseas. Una sola célula muscular es larga y cilíndrica y se llama *fibra muscular o miofibra*. Esta última es la parte más importante de la composición del músculo estriado²² y la integridad, así como la función de esta pueden verse afectadas por diferentes traumatismos como tensión, contusión,

laceración, inmovilización, daño muscular inducido por distensión (contracciones excéntricas), isquemia y otros (véase capítulo 2).²¹ Debido a que los núcleos de las miofibras son posmitóticos terminales (es decir, ya no pueden dividirse), la regeneración muscular está asegurada por una población de células madre musculares adultas llamadas células satélites.^{21,23}

PERLAS CLÍNICAS

Las células satélites son esenciales para la regeneración muscular después de una lesión y también contribuyen a la hipertrofia muscular.²¹

Todos los músculos, según su tamaño, están formados por miles, y en algunos casos por cientos de miles, de fibras musculares que están envueltas en una vaina de CT llamada *epimisio* (figura 1-1). A medida que las células musculares se diferencian dentro del mesoderma, las miofibras individuales se cubren con una envoltura de CT llamada *endomisio*. Los haces de miofibras que forman un músculo completo (fascículo) están encerrados en el *perimisio* (figura 1-1), el cual continúa hasta la fascia profunda. Esta relación permite a la fascia reunir todas las fibras de una unidad motora y, por tanto, adaptarse a las variaciones de forma y de volumen de cada músculo, de acuerdo con la contracción muscular y con las modificaciones intramusculares induci-

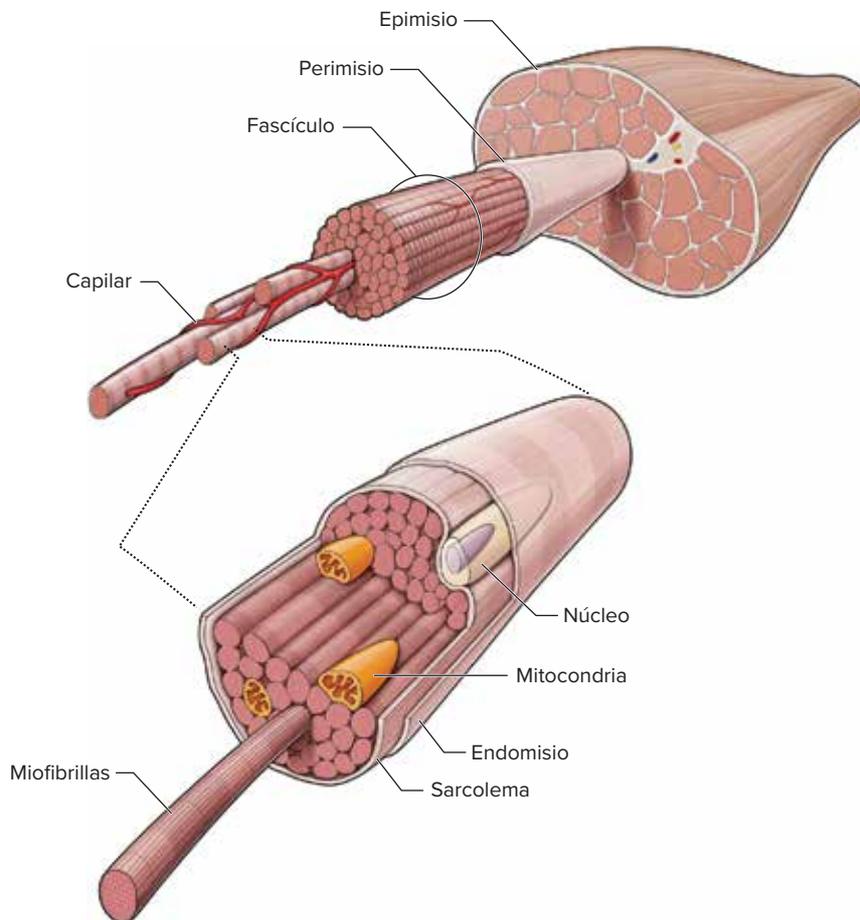


FIGURA 1-1 Estructura microscópica del músculo.

das por el movimiento articular.⁶ Bajo un microscopio electrónico, puede observarse que cada una de las miofibras consta de miles de *miofibrillas* (figura 1-1) que se extienden en toda su longitud. Las miofibrillas se componen por sarcómeros dispuestos en serie.²

PERLAS CLÍNICAS

El sarcómero (figura 1-2) es la maquinaria contráctil del músculo. Las contracciones graduales de todo un músculo se producen porque varía el número de fibras que participan en estas. El aumento de la fuerza del movimiento se logra con el reclutamiento de más células en acción cooperativa.

Todos los músculos estriados presentan cuatro características:

1. Excitabilidad. Es la capacidad de responder a la estimulación del sistema nervioso.
2. Elasticidad. Se trata de la capacidad de cambiar de longitud o de estirarse. La tensión desarrollada en el músculo estriado puede ocurrir de forma pasiva (estiramiento) o activa (contracción). Cuando un músculo activado desarrolla tensión, su cantidad es constante a lo largo del músculo, en los tendones y en los sitios de las uniones musculotendinosas al hueso. La fuerza de tracción producida por el músculo tira de los huesos adheridos y crea un par de torsión en las articulaciones atravesadas por el músculo. La magnitud de la fuerza de tracción depende de varios factores.
3. Extensibilidad. Es la capacidad de acortar y volver a la longitud normal.
4. Contractilidad. Es la capacidad de acortarse y contraerse en respuesta a algún comando neuronal.

Una de las funciones más importantes del CT es transmitir mecánicamente las fuerzas generadas por las células del músculo estriado para facilitar el movimiento. Cada una de

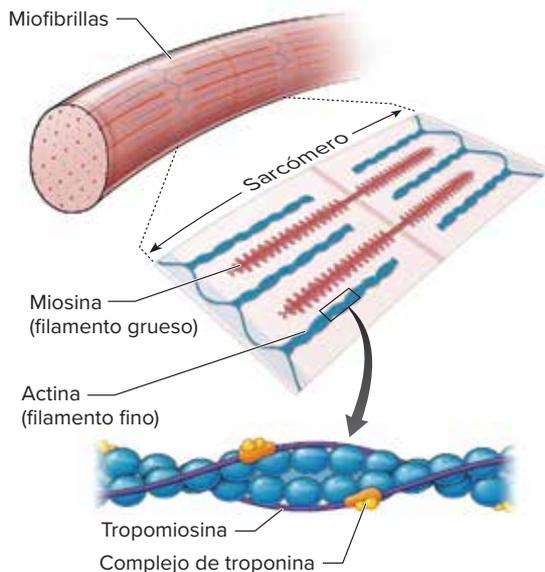


FIGURA 1-2 Acción de la troponina y la tropomiosina durante una contracción muscular.

las miofibrillas contiene muchas fibras llamadas *miofilamentos*, que son paralelos al eje de las miofibrillas. Los miofilamentos se componen de dos proteínas diferentes: actina (miofilamentos delgados) y miosina (miofilamentos gruesos) que otorgan a las fibras del músculo estriado su aspecto ve-teado (rayado) (figura 1-2). Las estrías se producen alternando bandas oscuras (A) y claras (I) que parecen abarcar todo el ancho de la fibra muscular. Las bandas A están compuestas por filamentos de miosina, mientras que las bandas I por filamentos de actina. Estos últimos se superponen en la banda A, dando a los bordes de esta un aspecto más oscuro que la región central (banda H), la cual contiene solo miosina. En el centro de cada banda I hay una línea Z delgada y oscura. Un *sarcómero* (figura 1-2) representa la distancia entre cada línea Z. Cada fibra muscular está limitada por una membrana celular llamada *sarcolema* (figura 1-1). La proteína *distrofina* desempeña un papel esencial en la fuerza mecánica, así como en la estabilidad del sarcolema y está ausente en pacientes con distrofia muscular de Duchenne.²¹

PERLAS CLÍNICAS

El sarcoplasma es el citoplasma especializado de una célula muscular que contiene los elementos subcelulares habituales junto con el aparato de Golgi, abundantes miofibrillas, un retículo endoplásmico modificado conocido como retículo sarcoplásmico (SR, *sarcoplasmic reticulum*), mioglobina y mitocondrias. Los túbulos transversales (túbulos en T) invaginan el sarcolema, permitiendo que los impulsos penetren en la célula y activen el SR.

Las estructuras llamadas *puentes cruzados* sirven para conectar los filamentos de actina y miosina. El aumento de la síntesis de estas últimas estimula nuevas miofibrillas que se agregan a las capas externas de las miofibrillas preexistentes.²⁴ Los filamentos de miosina contienen dos regiones flexibles en forma de bisagra, que permiten que los puentes cruzados se adhieran y se desprendan del filamento de actina. Durante la contracción, los puentes cruzados se unen y experimentan ciclos de trabajo que proporcionan la fuerza contráctil. Durante la relajación, los puentes cruzados se despegan. Esta conexión y desconexión es asincrónica, por lo que algunos se conectan mientras que otros se desconectan. Así, en cada momento algunos de los puentes cruzados realizan tracción, mientras que otros se sueltan.

La regulación de la unión y el desprendimiento de los puentes cruzados es función de dos proteínas que se encuentran en los filamentos de actina: tropomiosina y troponina (figura 1-2). La tropomiosina se une directamente al filamento de actina, mientras que la troponina se une a la tropomiosina en lugar de hacerlo con el filamento de actina.

PERLAS CLÍNICAS

La tropomiosina y la troponina funcionan como el interruptor para la contracción y relajación muscular. En un estado relajado, la tropomiosina bloquea físicamente los puentes cruzados para que no se unan a la actina. Para que se produzca la contracción, se debe mover la tropomiosina.

A nivel de control voluntario, la unidad funcional más pequeña que se puede activar es la unidad motora. Esta consta de una sola neurona motora alfa. Este tipo de neuronas de la médula espinal (células del asta anterior) se encuentran en la sustancia gris anterior. Cuando se inicia una contracción en la corteza motora del cerebro, se transmite una corriente eléctrica despolarizante (potencial de acción) a lo largo del axón de la neurona motora y de sus ramas, y en la unión neuromuscular (NMJ, *neuromuscular junction*) se libera un neurotransmisor (acetilcolina) que da como resultado la propagación del potencial de acción a lo largo de la fibra muscular.²⁵

PERLAS CLÍNICAS

El área de contacto entre un nervio y una fibra muscular se conoce como placa motora terminal o NMJ.

La liberación de una sustancia química, la acetilcolina, de las terminales de axón en la NMJ provoca la activación eléctrica de las fibras del músculo estriado. Los potenciales de acción son las señales que transmiten información a lo largo de los axones de una estructura a otra dentro del sistema nervioso.² Un potencial de acción surge de la inversión temporal del potencial de membrana debido a un aumento en la permeabilidad al sodio.² Cuando un potencial de acción se propaga en el sistema de túbulos transversales (túneles membranosos estrechos formados a partir del sarcolema y continuos a él), los sensores de voltaje en la membrana del túbulo transversal señalan la liberación de Ca^{2+} de la porción de las cisternas terminales del SR (una serie de sacos y tubos interconectados que rodean cada miofibrilla).² Entonces, el Ca^{2+} liberado se difunde en los sarcómeros y se une a la troponina, desplazando la tropomiosina y permitiendo que la actina se una a los puentes cruzados de miosina (figura 1-2). Siempre que se activa una neurona motora somática, todas las fibras musculares que inerva se estimulan y experimentan contracciones de *todo o nada*. Aunque las fibras musculares producen este tipo de contracciones, los músculos son capaces de una amplia variedad de respuestas, que van desde actividades que requieren un alto nivel de precisión hasta aquellas que necesitan mucha tensión.

Al final de la contracción (cesa la actividad neural y los potenciales de acción), el SR acumula activamente Ca^{2+} y se produce la relajación muscular. El retorno del Ca^{2+} al SR implica un transporte activo, que requiere la degradación del trifosfato de adenosina (ATP, *adenosine triphosphate*) a difosfato de adenosina (ADP, *adenosine diphosphate*).^{*2} Debido a que la función del SR está en estrecho contacto tanto con la contracción como con la relajación, los cambios en su capacidad para liberar o secuestrar el Ca^{2+} afectan notablemente tanto el curso temporal como la magnitud de la producción de fuerza por la fibra muscular.^{2,26}

* La energía con mayor disponibilidad para las células del músculo estriado está almacenada en forma de ATP y fosfocreatina (PCr). A través de la actividad de la enzima ATPasa, el ATP libera energía con rapidez cuando la célula lo requiere para realizar cualquier tipo de trabajo, ya sea eléctrico, químico o mecánico.

CUADRO 1-3 Comparación de tipos de fibras musculares

Características	Tipo I	Tipo IIa	Tipo IIx
Tamaño (diámetro)	Pequeño	Intermedio	Muy grande
Resistencia a la fatiga	Alta	Bastante alta	Baja
Densidad capilar	Alta	Alta	Baja
Contenido de glucógeno	Baja	Intermedio	Alta
Tasa de contracción	Lenta	Rápida	Rápida
Sistema de energía	Aerobio	Aerobio	Anaerobio
Velocidad máxima de acortamiento muscular	Lenta	Rápida	Rápida
Almacenamiento importante de combustible	Triglicéridos	Glucógeno fosfato de creatina	Glucógeno fosfato de creatina

PERLAS CLÍNICAS

El SR forma una red alrededor de las miofibrillas, almacenando y proporcionando el Ca^{2+} necesario para la contracción muscular.

Con respecto a sus propiedades contráctiles, se han reconocido dos tipos principales de fibras dentro del músculo estriado en función de su resistencia a la fatiga: el tipo I (fibras tónicas, de contracción lenta) y el tipo II (fibras fásicas de contracción rápida). Las fibras musculares de tipo II se dividen, además, en dos clasificaciones adicionales (tipos IIa y IIx [antes conocidos como IIb y, en ocasiones, IIc]) (cuadro 1-3).

Las fibras de tipo I están dotadas de abundantes mitocondrias (y tienen una alta capacidad de absorción de oxígeno). En comparación con las fibras de tipo II, las de tipo I poseen niveles más bajos de producción de la fuerza isométrica por unidad de área, muestran un tiempo más largo para contraerse y relajarse con un solo impulso eléctrico y tienen velocidades máximas de acortamiento más bajas, pero son más resistentes a la fatiga. Por tanto, son adecuadas para las actividades de larga duración o de resistencia (aerobias), incluido el mantenimiento de la postura. Por el contrario, las fibras de contracción rápida, que generan una gran cantidad de tensión en un corto periodo, son adecuadas para acciones rápidas y explosivas (anaerobias), incluidas las actividades como carreras de velocidad. Las fibras de tipo II (contracción rápida) se separan según el contenido de mitocondrias en aquellas que tienen un alto complemento de estas (tipo IIa), así como una velocidad contráctil elevada y en aquellas que son pobres en mitocondrias (tipo IIx), pero son las más rápidas en contraerse. Esto da como resultado que las fibras de tipo IIx tienen una tendencia a fatigarse con mayor rapidez que las de tipo IIa (cuadro 1-3) pero, a su vez, tienen un mayor potencial para generar ATP a través de las vías anaerobias (glucolíticas).

CUADRO 1-4 División funcional de grupos musculares	
Grupo de movimiento	Grupo de estabilización
Principalmente tipo IIa	Principalmente tipo I
Propenso al acortamiento adaptativo	Propenso a desarrollar debilidad
Propenso a desarrollar hipertonicidad	Propenso a la inhibición muscular
Domina la fatiga y las nuevas situaciones de movimiento	Se fatiga fácilmente
Generalmente cruza dos articulaciones	Cruza principalmente una articulación
<i>Ejemplos</i>	<i>Ejemplos</i>
Gastrocnemio/Sóleo	Fibular (peroneos)
Tibial posterior	Tibial anterior
Aductores cortos de cadera	Vasto medial y lateral
Isquiotibiales	Glúteo mayor, medio y mínimo
Recto femoral	Serrato anterior
Tensor de la fascia lata	Romboides
Erector de la columna	Porción inferior del trapecio
Cuadrado lumbar	Flexores cervicales profundos/cortos
Pectoral mayor	Extensores de miembros superiores
Porción superior del trapecio	Recto abdominal
Elevador de la escápula	
Esternocleidomastoideo	
Escalenos	
Flexores de miembros superiores	

Datos de Twomey LT, Taylor JR. *Physical Therapy of the Low Back: Clinics in Physical Therapy*. New York, NY: Churchill Livingstone; 1987.

PERLAS CLÍNICAS

En las fibras de contracción rápida, el SR abarca todas las miofibrillas individuales. En aquellas de contracción lenta, el SR puede contener múltiples miofibrillas.

Cada músculo comprende una mezcla de tipos de fibras. La teoría dicta que un músculo con un gran porcentaje del área transversal total ocupada por fibras de tipo I de contracción lenta debería ser más resistente a la fatiga que uno en el que predominan las fibras de tipo II de contracción rápida. Si bien hay poca evidencia de cambio en las proporciones relativas de los dos tipos de fibras, existen pruebas sólidas que muestran que, de hecho, hay una disminución en el número de fibras del tipo II acompañada de un aumento en las del tipo IIa con el entrenamiento de resistencia.²⁵

Las diferentes actividades imponen distintas demandas a un músculo (cuadro 1-4). Por ejemplo, el movimiento dinámico implica un predominio del reclutamiento de fibras de contracción rápida, mientras que las actividades posturales y aquellas que requieren estabilización conllevan una mayor participación de las fibras de contracción lenta. En los seres humanos, la mayoría de los músculos de las extremidades contienen una distribución similar de cada tipo de fibra muscular, mientras que la espalda y el tronco muestran un predominio de fibras de contracción lenta. Aunque parece posible que el entrenamiento físico pueda hacer que las fibras se conviertan de contracciones lentas a rápidas o al revés, no se ha demostrado que este sea el caso.^{25,27} Sin embargo,

se ha encontrado que la conversión de fibras de tipo IIB a tipo IIA y viceversa ocurre durante el entrenamiento.²⁵

Además de los cambios estructurales durante el entrenamiento de fondo y de resistencia, también ocurre una serie de adaptaciones neuronales²⁵:

El entrenamiento de fuerza produce: 1) un impulso mejorado desde los centros superiores del cerebro después del entrenamiento de resistencia, lo que resulta en la optimización de la fuerza observada; 2) una mayor sincronización de las unidades motoras; 3) una disminución en el umbral de fuerza en el que se reclutan las unidades motoras; 4) un aumento en el rango de encendido de las unidades motoras; y 5) una disminución en el nivel de coactivación de los músculos antagonistas después del entrenamiento.

El entrenamiento de resistencia produce: 1) una disminución en el rango de encendido de la unidad motora y 2) una reducción del umbral de reclutamiento, lo que mejora la resistencia a la fatiga.

La efectividad del músculo para producir movimiento depende de algunos factores como la ubicación y la orientación de la inserción muscular de acuerdo con la articulación, las limitaciones o la laxitud presente en la unidad musculotendinosa, el tipo de contracción, el punto de aplicación y las acciones de otros músculos que cruzan la articulación.

PERLAS CLÍNICAS

Después de la estimulación del músculo, transcurre un breve periodo antes de que alguno comience a desarrollar tensión. La duración de esta fase, el *retraso electromecánico* (EMD, *electromechanical delay*), varía en forma considerable entre los músculos. Las fibras de contracción rápida tienen periodos más cortos de EMD en comparación con las fibras de contracción lenta.²⁸ El EMD se ve afectado por la fatiga, la elongación, el entrenamiento, el estiramiento pasivo y el tipo de activación muscular.²⁹ En teoría, una lesión tisular puede aumentar el EMD y, por tanto, incrementar la susceptibilidad a futuras lesiones si no se produce una curación completa. Uno de los objetivos de la reeducación neuromuscular (véase capítulo 14) es devolver el EMD a un nivel normal.

Los músculos cumplen una variedad de funciones según el movimiento requerido:

- ▶ **Primer motor (agonista).** Es el responsable de producir un movimiento deseado.
- ▶ **Antagonista.** Tiene un efecto opuesto al del agonista.
- ▶ **Sinergista (de soporte).** Realiza una función muscular cooperativa en relación con el agonista. Los sinergistas pueden funcionar como estabilizadores, neutralizadores o rotadores.
 - Estabilizadores (fijadores). Son músculos que se contraen estáticamente para estabilizar o sostener alguna parte del cuerpo contra la tracción de los músculos que se contraen, contra la fuerza de la gravedad o el efecto del impulso y el retroceso en ciertos movimientos vigorosos.
 - Neutralizadores. Son los músculos que actúan para prevenir una acción no deseada de uno de los motores.

- Rotadores. Una pareja de fuerza son dos fuerzas de igual magnitud dirigidas de manera opuesta y desplazadas por una distancia o momento perpendicular. El mejor ejemplo de una pareja de fuerza que controla la rotación ocurre en la escápula durante la elevación del brazo, cuando el trapecio y el serrato anterior se contraen.

La función básica del músculo es contraerse. La palabra *contracción*, utilizada para describir la generación de tensión dentro de las fibras musculares, evoca una imagen de acortamiento de estas durante un ejercicio de resistencia. Sin embargo, una contracción puede producir un acortamiento, una elongación del músculo o ningún cambio en la longitud de este. Por tanto, se suelen reconocer tres tipos: isométrica, concéntrica y excéntrica (véase capítulo 12).

- ▶ **Contracción isométrica.** Los ejercicios isométricos proporcionan una contracción estática con una resistencia variable y acomodaticia sin producir ningún cambio apreciable en la longitud del músculo. La fuerza de un músculo se define como la fuerza (o torsión) generada alrededor de la articulación durante una contracción isométrica máxima.
- ▶ **Contracción concéntrica.** Produce un acortamiento del músculo, el cual ocurre cuando la tensión generada por el músculo agonista es suficiente como para vencer una resistencia externa y mover el segmento corporal de un acoplamiento hacia el segmento de su otro acoplamiento. La potencia es la velocidad a la que un músculo realiza un trabajo mecánico y está determinada por el producto de la fuerza de una contracción y la velocidad de acortamiento.
- ▶ **Contracción excéntrica.** Ocurre cuando un músculo se alarga lentamente al ceder a una fuerza externa mayor a aquella contráctil ejercida. En realidad el músculo no se alarga, tan solo vuelve de su posición acortada a su longitud normal de reposo. Las contracciones musculares excéntricas, que son capaces de generar fuerzas mayores que las isométricas o concéntricas,²⁹ están involucradas en actividades que requieren una desaceleración para que ocurran. Tales actividades incluyen reducir la velocidad hasta detenerse al correr, bajar un objeto o sentarse. Debido a que la carga excede la unión entre los filamentos de actina y miosina durante una contracción excéntrica, algunos de los filamentos de miosina podrían separarse de los sitios de unión en el filamento de actina, mientras que el resto completa el ciclo de la contracción. La fuerza resultante es mucho mayor para un puente cruzado dañado que para uno que se crea durante un ciclo normal de contracción muscular. En consecuencia, el aumento combinado de la fuerza debido al puente cruzado y el número de puentes cruzados activos dan como resultado una tensión muscular de alargamiento máxima, la cual es mayor que la tensión que podría crearse durante una acción de acortamiento muscular.²⁹

PERLAS CLÍNICAS

Tanto las acciones musculares concéntricas como las excéntricas comprenden el tipo de ejercicio llamado isotónico. Una contracción isotónica es aquella en la que la tensión dentro del músculo permanece constante a medida que el músculo se acorta o se alarga. Este estado es muy difícil de producir y

de medir. Aunque el término *isotónico* se emplea en muchos textos para describir las contracciones concéntricas y excéntricas por igual, su uso en este contexto es erróneo, porque, en la mayoría de las formas de ejercicio la tensión muscular varía según el peso utilizado, la velocidad de la articulación, la elongación muscular y el tipo de contracción muscular.

Vale la pena mencionar las otras tres contracciones siguientes:

- ▶ **Contracción isocinética.** Ocurre cuando un músculo se contrae al máximo a la misma velocidad en todo el rango de su palanca relacionada. Las contracciones isocinéticas requieren el uso de un equipo especial que produce una resistencia acomodaticia. Tanto los regímenes de alta velocidad/baja resistencia como los de baja velocidad/alta resistencia dan como resultado ganancias de fuerza excelentes.³⁰ La principal desventaja de este tipo de ejercicio es su costo. Además, existe la posibilidad de que se produzcan cargas de impacto y una alineación incorrecta del eje de la articulación. Los ejercicios isocinéticos también pueden tener un arrastre funcional cuestionable.
- ▶ **Contracción concéntrica.** Este tipo de contracción, descrita por el Gray Institute (<https://www.grayinstitute.com>) y utilizada en la mayoría de los movimientos funcionales, combina una contracción concéntrica controlada y una excéntrica simultánea del mismo músculo sobre dos articulaciones separadas. Ejemplos de una contracción concéntrica incluyen la activación de los isquiotibiales al adoptar la posición de bipedestación, en la que estos últimos trabajan concéntricamente para flexionar la rodilla mientras que la cadera tiende a hacerlo excéntricamente, alargando los isquiotibiales. Al levantarse de una sentadilla, los isquiotibiales trabajan de forma concéntrica a medida que se extiende la cadera y de forma excéntrica a medida que se estira la rodilla. Por el contrario, el recto femoral trabaja excéntricamente a medida que la cadera se extiende y de forma concéntrica a medida que lo hace la rodilla.
- ▶ **Contracción isolítica.** Es un término osteopático que se utiliza para describir un tipo de contracción excéntrica que emplea una fuerza mayor de la que el paciente puede vencer. La diferencia entre una contracción excéntrica y una isolítica es en la primera la contracción es voluntaria, mientras que, en la segunda es involuntaria. La contracción isolítica se puede utilizar en determinadas técnicas manuales para estirar el tejido fibrótico (véase capítulo 10).

Como se mencionó antes, en función del tipo de contracción, la longitud de un músculo puede permanecer igual (isométrica), acortarse (concéntrica) o “alargarse” (excéntrica). La tasa de cambio de la elongación muscular afecta sustancialmente la fuerza que un músculo puede desarrollar durante la contracción.

- ▶ **Contracciones concéntricas.** La velocidad a la que el músculo se contrae afecta significativamente la tensión que este produce, así como la fuerza y la potencia del mismo. A medida que aumenta la velocidad de una contracción concéntrica, disminuye la fuerza que es capaz de producir. Se cree que la velocidad de contracción más lenta genera fuerzas mayores que las que se pueden producir

aumentando el número de puentes cruzados formados. Esta relación es un continuo, con la velocidad óptima para el músculo en algún lugar entre las tasas más lentas y más rápidas. A velocidades muy lentas, la fuerza que un músculo puede resistir o vencer aumenta con rapidez hasta 50% más que la contracción isométrica máxima.

► **Contracciones excéntricas.** Durante una contracción excéntrica de esfuerzo máximo, a medida que aumenta la velocidad del “alargamiento” activo del músculo, la producción de la fuerza en este se incrementa al inicio pero luego se estabiliza rápidamente.³¹ Conforme sucede este tipo de contracción ocurren los siguientes cambios en la producción de fuerza:

- Las contracciones excéntricas rápidas generan más fuerza que las lentas.
- Durante las acciones musculares excéntricas lentas, el trabajo producido se aproxima al de una contracción isométrica.

PERLAS CLÍNICAS

El número de puentes cruzados que se pueden formar depende del grado de superposición entre los filamentos de actina y miosina. Por tanto, la fuerza que puede ejercer un músculo depende de su longitud. Para cada célula muscular existe una longitud óptima o rango de longitudes, en la que la fuerza contráctil es más intensa. En la longitud adecuada del músculo, hay una superposición casi óptima de actina y miosina, lo que permite la generación de la tensión máxima.

- Si el músculo está en una posición acortada, la superposición de actina y miosina reduce el número de sitios disponibles para la formación de puentes cruzados. La *insuficiencia activa* de un músculo ocurre cuando este es incapaz de acortarse en la medida necesaria para producir un rango de movimiento (ROM, *range of motion*) completo en todas las articulaciones cruzadas simultáneamente. Por ejemplo, los flexores de los dedos no pueden formar un puño cerrado cuando la muñeca está flexionada en su totalidad; por el contrario, sí pueden hacerlo cuando está en posición neutral.
- Si el músculo está en una posición alargada en comparación con su longitud óptima, los filamentos de actina se separan de las cabezas de miosina de manera que no pueden crear tantos puentes cruzados. La *insuficiencia pasiva* ocurre cuando el músculo de dos articulaciones no puede estirarse a la extensión requerida para lograr un ROM completo en la dirección opuesta en todas las articulaciones cruzadas. Por ejemplo, cuando un individuo intenta cerrar el puño con la muñeca completamente flexionada, el acortamiento activo de los flexores de los dedos y de la muñeca da como resultado un alargamiento pasivo de los extensores de los dedos. En este ejemplo, la longitud de estos últimos es insuficiente para permitir un ROM completo tanto en la muñeca como en los dedos.³²

La fuerza y la velocidad de una contracción muscular dependen de los requerimientos de la actividad, que, a su vez, necesita la capacidad del sistema nervioso central para controlar el reclutamiento de las unidades motoras. Las unidades motoras de las fibras de contracción lenta tienen

umbrales más bajos y son más fáciles de activar que las unidades motoras de las fibras de contracción rápida. En consecuencia, las fibras de contracción lenta se reclutan primero, incluso cuando el movimiento resultante de la extremidad es rápido.²

A medida que aumentan los requisitos de fuerza, velocidad o duración de la actividad, se reclutan unidades motoras con umbrales más altos. Las unidades de tipo IIa se reclutan antes que las de tipo IIb.²

PERLAS CLÍNICAS

El término *sumatoria temporal* se refiere a la suma de unidades contráctiles individuales. La sumatoria puede aumentar la fuerza muscular al incrementar la frecuencia de activación muscular.³³

Aunque cada músculo contiene la maquinaria contráctil para producir las fuerzas para el movimiento, es el tendón el que las transmite a los huesos para lograr el movimiento o la estabilidad del cuerpo en el espacio. El ángulo de inserción que hace el tendón con un hueso determina la línea de tracción, mientras que la tensión generada por un músculo es resultado de su ángulo de inserción. Un músculo genera la mayor cantidad de torsión cuando su línea de tracción está orientada en un ángulo de 90° con respecto al hueso y está unido anatómicamente lo más lejos posible del centro de la articulación.²

Así como existen velocidades óptimas de cambio de longitud y longitudes óptimas de los músculos, existen ángulos de inserción óptimos para cada uno de los músculos. Estos ángulos, así como su línea de tracción, pueden cambiar durante los movimientos dinámicos. El *ángulo penniforme* es aquel creado entre la dirección de la fibra y la línea de tracción. Cuando las fibras de un músculo se encuentran paralelas a su eje longitudinal, no hay ángulo penniforme. El número de fibras dentro de un volumen fijo de un músculo aumenta con este ángulo. Aunque el ángulo penniforme puede incrementar la tensión máxima, se reduce el rango de acortamiento del músculo. Las fibras musculares pueden contraerse hasta 60% de su longitud en reposo. Dado que las fibras en los músculos penniformes son más cortas que en el equivalente no penniforme, la magnitud de la contracción se reduce de manera similar. Los músculos que necesitan tener grandes cambios de longitud sin necesidad de una tensión muy alta, como el sartorio, no tienen fibras musculares de tipo penniforme. Por el contrario, estas últimas se encuentran en aquellos músculos en los que el énfasis está en una alta capacidad de generación de tensión en lugar de ROM (p. ej., glúteo mayor).

PERLAS CLÍNICAS

El flujo sanguíneo del músculo estriado aumenta 20 veces durante las contracciones musculares.² El flujo sanguíneo se incrementa en proporción a las demandas metabólicas del tejido, debido a las correlaciones positivas entre el flujo sanguíneo muscular y el ejercicio. A medida que se eleva la temperatura corporal, aumentan las velocidades de las funciones

nerviosas y musculares, lo que da como resultado un valor más alto de la tensión isométrica máxima y una velocidad máxima de acortamiento posible con la menor cantidad de unidades motoras en cualquier carga dada. La función muscular es más eficiente a 38.5 °C (101 °F).²

Durante el ejercicio físico, el recambio de energía en el músculo estriado puede aumentar 400 veces en comparación con el músculo en reposo y el consumo de oxígeno muscular puede incrementarse más de 100 veces.³⁴ La hidrólisis del ATP a ADP y fosfato inorgánico (P_i , *inorganic phosphate*) proporciona la energía para la actividad muscular. A pesar de las grandes fluctuaciones en la demanda de energía que acabamos de mencionar, el ATP muscular permanece de hecho constante y demuestra una notable precisión del sistema al ajustar la tasa de los procesos de generación de ATP a la demanda. Hay tres sistemas de energía que contribuyen a la resíntesis del ATP a través de la refosforilación del ADP. Estos sistemas son los siguientes:

- ▶ **Sistema de fosfágeno.** El sistema de fosfágeno o ATP-PCr es un proceso anaerobio, es decir, puede continuar sin oxígeno (O_2). La célula del músculo estriado almacena la fosfocreatina (PCr, *phosphocreatine*) y el ADP, de los cuales la PCr es la fuente de combustible químico. Al inicio de la contracción muscular, la PCr representa la reserva inmediata para la refosforilación del ATP. El sistema del fosfágeno proporciona ATP sobre todo para las actividades de alta intensidad a corto plazo (es decir, carreras de velocidad) y es la principal fuente de energía durante los primeros 30 segundos de ejercicio intenso, pero también está activo al comienzo de toda la actividad física, con independencia de la intensidad.³⁵ Una vez que un músculo vuelve al reposo, se repone el suministro de ATP-PCr. Si bien la potencia máxima de este sistema es excelente, una desventaja es que, debido a su contribución significativa al rendimiento energético al inicio del ejercicio, cuando llega a valores cercanos al máximo, la concentración de la PCr se puede reducir a menos de 40% de los niveles de reposo en el intervalo de los 10 segundos del inicio del ejercicio intenso, lo que se traduce en una reducida capacidad máxima del sistema.
- ▶ **Sistema glucolítico.** El sistema glucolítico es un proceso anaerobio que implica la descomposición de los carbohidratos, ya sea glucógeno almacenado en el músculo o glucosa suministrada a través de la sangre, en piruvato para producir ATP mediante un proceso llamado glucólisis. A continuación, el piruvato se transforma en ácido láctico como subproducto de la glucólisis anaerobia. Debido a que este sistema se basa en una serie de nueve reacciones químicas diferentes, tarda más en activarse por completo. Sin embargo, la glucogenólisis tiene una mayor capacidad de proporcionar energía que la PCr y, por tanto, complementa esta última durante el ejercicio máximo y continúa la refosforilación del ADP durante la actividad física después de que las reservas de PCr se han agotado.³⁵ Básicamente, este sistema es la principal fuente de energía desde el segundo 30 al 90 del ejercicio. El proceso de glucólisis puede realizarse de dos formas, denominadas *glucólisis rápida* y *glucólisis lenta* según las demandas de

energía dentro de la célula. Si se debe suministrar energía a un ritmo elevado, se utiliza sobre todo la glucólisis rápida. Si la demanda de energía no es tan alta, se activa la glucólisis lenta. La principal desventaja del sistema de glucólisis rápida es que, durante el ejercicio de muy alta intensidad, los iones de hidrógeno se disocian del producto final glucogenolítico del ácido láctico. La acumulación de este último en el músculo contraído se reconoce en los círculos deportivos y de entrenamiento de resistencia. Se cree que un aumento en la concentración de iones de hidrógeno inhibe las reacciones glucolíticas e interfiere directamente con la excitación-contracción y el acoplamiento de los músculos, lo que en principio puede afectar la fuerza contráctil durante un ejercicio.³⁵ Esta inhibición ocurre una vez que el pH del músculo cae por debajo de cierto nivel, lo que provoca la aparición de fosfofructoquinasa (PFK, *phosphofructokinase*), lo cual ocasiona que la producción de energía local cese hasta que se reponga mediante las reservas de oxígeno.

PERLAS CLÍNICAS

El ácido láctico es la principal fuente de energía para proporcionar ATP al músculo durante las series de ejercicio que duran entre uno y tres minutos (p. ej., correr de 400 a 800 m).

- ▶ **Sistema oxidativo.** Como sugiere su nombre, el sistema oxidativo requiere O_2 y, en consecuencia, se denomina sistema "aerobio". Las fuentes de combustible para este son el glucógeno, las grasas y las proteínas. Este sistema es la fuente principal de ATP en reposo y durante actividades de baja intensidad. El ATP se resíntetiza en las mitocondrias de la célula muscular, de modo que la capacidad de metabolizar el oxígeno y otros sustratos está relacionada con el número y la concentración de las mitocondrias en las células. Vale la pena señalar que en ningún momento, durante el descanso o el ejercicio, no hay un sistema energético que proporcione el suministro completo de energía. Si bien el sistema oxidativo no puede producir ATP a una tasa equivalente a la obtenida por la degradación de la PCr y la glucogenólisis, sí es capaz de mantener el ejercicio de baja intensidad durante varias horas.³⁵ Sin embargo, debido a la mayor complejidad, el tiempo entre el inicio del ejercicio y cuando este sistema está funcionando a su máximo potencial es de unos 45 segundos.³⁶

Se ha demostrado que la contribución relativa de estos sistemas de energía en la síntesis de nuevas moléculas de ATP depende de la intensidad y el tiempo de ejercicio, y el sistema principal utilizado se basa en la duración del evento:³⁷

- ▶ 0-10 segundos. ATP-PCr. Estas ráfagas de actividad desarrollan la fuerza muscular y los tendones; además, los ligamentos se tornan más fuertes con el ATP suministrado por el sistema del fosfágeno.
- ▶ 10-30 segundos. ATP-PCr más glucólisis anaerobia.
- ▶ 30 segundos a 2 minutos. Glucólisis anaerobia. Estas ráfagas más largas de actividad, si se repiten después de 4 minutos de descanso o de ejercicio leve, mejoran la potencia anaerobia con el ATP suministrado por el fosfágeno y el sistema glucolítico anaerobio.

- ▶ 2 a 3 minutos. Glucólisis anaerobia más sistema oxidativo.
- ▶ Más de 3 minutos y reposo. Sistema oxidativo. Estos periodos de actividad que utilizan una intensidad inferior a la máxima pueden desarrollar la potencia aerobia y las capacidades de resistencia, lo mismo que fosfágeno, glucolítico anaerobio y los sistemas anaerobios que suministran ATP.

Músculos respiratorios

Aunque los músculos respiratorios comparten algunas similitudes mecánicas con los estriados, son distintos en varios aspectos, como los siguientes:²

- ▶ Mientras que los músculos estriados de las extremidades superan las cargas de inercia, los músculos respiratorios superan ante todo las cargas elásticas y de resistencia.
- ▶ Los músculos respiratorios están bajo control tanto voluntario como involuntario.
- ▶ Estos músculos son similares a los del corazón, ya que deben contraerse rítmicamente y generar las fuerzas necesarias para la ventilación a lo largo de toda la vida del individuo. Sin embargo, los músculos respiratorios, a diferencia de los cardíacos, no contienen células marcapasos y están bajo el control de los estímulos mecánicos y químicos, lo que requiere la entrada de los nervios de los centros superiores para iniciar y coordinar la contracción.
- ▶ La longitud en reposo de los músculos respiratorios es una relación entre las fuerzas de retroceso hacia adentro del pulmón y las fuerzas de rebote hacia afuera de la pared torácica. Los cambios en el equilibrio de las fuerzas de retroceso darán lugar a variaciones en la longitud de reposo de los músculos respiratorios. Por tanto, en teoría, eventos simples y cotidianos como cambios de postura pueden alterar la longitud operativa y la fuerza contráctil de los músculos respiratorios. Si no se compensan, estos cambios de longitud pueden conducir a una disminución en la producción de los músculos y, por tanto, a una reducción en la capacidad de generar cambios en el volumen pulmonar. Los músculos estriados de las extremidades, por otro lado, no están obligados a operar a una determinada longitud de reposo.

PERLAS CLÍNICAS

Los músculos respiratorios primarios del cuerpo incluyen el diafragma; los intercostales interno, externo y transversal; el elevador de las costillas y el serrato posterior inferior y superior.

ARTICULACIONES

La artrología es el estudio de la clasificación, estructura y función de las articulaciones (artrosis). Una articulación representa la unión entre dos o más huesos. Las articulaciones son regiones donde los huesos están cubiertos y rodeados por el CT que los mantiene unidos y determina el tipo y el grado de movimiento entre ellos.³⁸ Se requiere una

comprensión de la anatomía y biomecánica de las diversas articulaciones para poder evaluar y tratar a un paciente en forma rigurosa. Cuando se clasifican según el potencial de movimiento, las articulaciones se pueden dividir en dos categorías amplias: *sinartrosis* (no sinovial) y *diartrosis* (sinovial).

Sinartrosis

El tipo de tejido que une las superficies óseas determina los principales tipos de sinartrosis.³⁸

- ▶ Articulaciones fibrosas, que se unen mediante CT fibroso denso. Existen las siguientes tres clasificaciones:
 - Sutura (p. ej., sutura del cráneo).
 - Gonfosis (p. ej., dientes y articulación en la mandíbula o maxilar).
 - Sindesmosis (p. ej., articulaciones tibiofibulares o radio cubitales). Estas suelen permitir una pequeña cantidad de movimiento.
- ▶ Las articulaciones cartilaginosas, antes denominadas articulaciones de anfiartrosis, son estables y permiten un movimiento reducido o mínimo. Estas existen en los seres humanos de dos formas: sincondrosis (p. ej., articulaciones manubrioesternales) y sínfisis (p. ej., sínfisis del pubis). Una sincondrosis es una articulación en la que el material utilizado para conectar los dos componentes es cartílago hialino.³⁹ En una articulación de sínfisis, los dos componentes óseos están cubiertos con una delgada lámina de cartílago hialino y unidos uno a otro por fibrocartílago en forma de discos o almohadillas.³⁹

Diartrosis

Esta articulación une huesos largos y permite un movimiento óseo libre y una mayor movilidad. Una cápsula articular fibroelástica, que caracteriza a estas articulaciones, está llena de una sustancia lubricante llamada *líquido sinovial*. En consecuencia, estas a menudo se denominan articulaciones sinoviales.

Los ejemplos incluyen, entre otros, las articulaciones de la cadera, la rodilla, el hombro y el codo. Las articulaciones sinoviales se clasifican, además, según su complejidad:

- ▶ Simple (uniaxial). Un solo par de superficies articulares, una macho o convexa y una hembra o cóncava. Los ejemplos incluyen articulaciones de bisagra y trocoides (pivote).
- ▶ Compuesta (biaxial). Cápsula de una sola articulación que contiene más de un par de superficies articuladas acopladas. Los dos tipos de articulaciones biaxiales del cuerpo incluyen el condílea y la silla de montar.
- ▶ Compleja (triaxial o multiaxial). Posee una inclusión intraarticular dentro de la clase articular, como un menisco o un disco, que aumenta el número de superficies articulares. Los dos tipos de articulaciones en esta categoría son las planas y las esferoideas.

Las articulaciones sinoviales tienen cinco características distintivas: una cavidad articular que está envuelta por la cápsula articular, el cartílago articular hialino que cubre las superficies de los huesos contiguos cerrados, el líquido

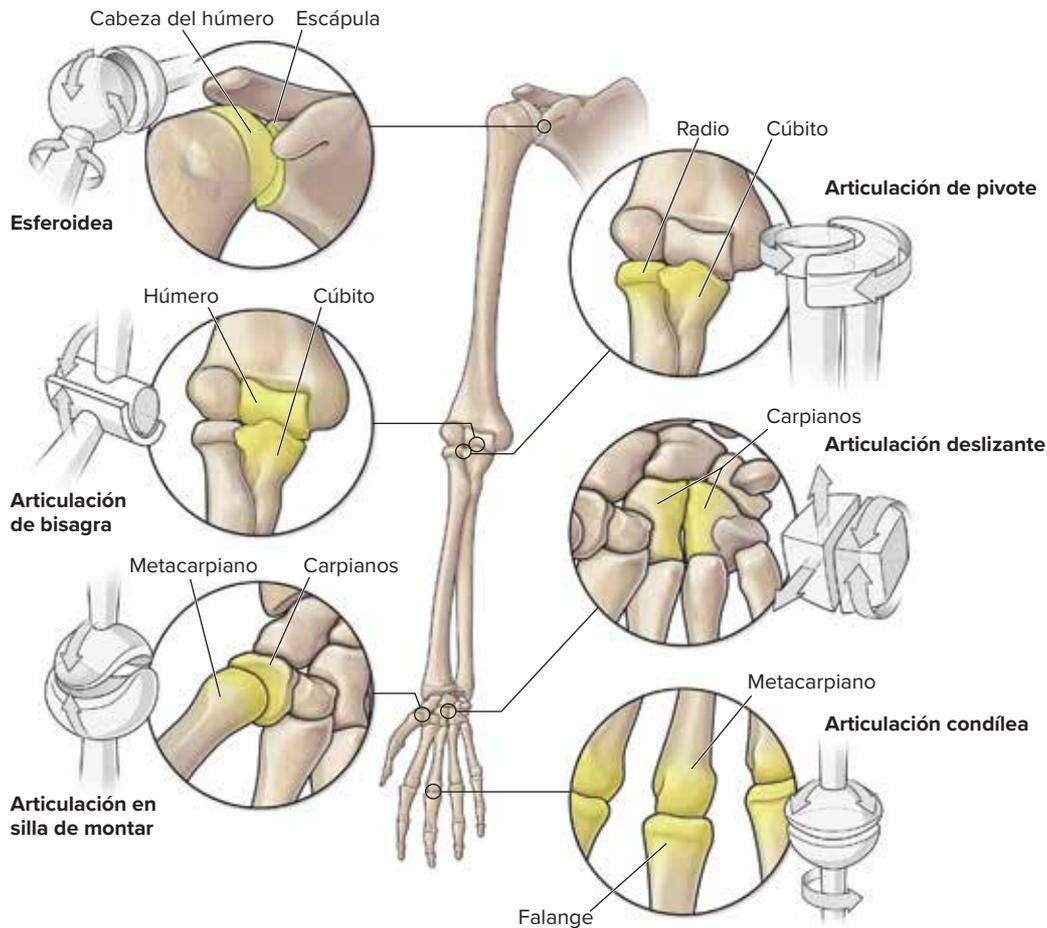


FIGURA 1-3 Tipos de diartrosis o articulaciones sinoviales.

sinovial que forma una película sobre las superficies articulares, la membrana sinovial que recubre la superficie interna de la cápsula y una cápsula articular que se compone de dos capas.³⁹ Todas las articulaciones sinoviales del cuerpo están provistas de una serie de terminaciones receptoras corpusculares (mecanorreceptores) y no corpusculares (nociceptores) incrustadas en estructuras articulares, musculares y cutáneas con características, comportamientos y distribuciones variables en función del tejido articular (véase capítulo 3). Una estructura intraarticular que vale la pena mencionar es el disco articular o menisco. El término *menisco* debe reservarse para discos incompletos como los de la rodilla y, en ocasiones, la articulación acromioclavicular. Un menisco, que consiste en una ECM densa, no está cubierto por una membrana sinovial y se localiza entre las superficies articulares donde la congruencia es baja. Las células del menisco se denominan fibrocondrocitos porque parecen ser una mezcla de fibroblastos y condrocitos.^{40,41} Un disco meniscal puede extenderse a través de una articulación sinovial, dividiéndola, en cuanto a estructura y función, en dos cavidades sinoviales. Los discos completos se encuentran en las articulaciones esternoclavicular y radio cubital distal, mientras que en la articulación temporomandibular pueden estar completos o incompletos.² Los discos periféricos están conectados a las cápsulas fibrosas, por lo general mediante el CT vascularizado, de modo que son invadidos por vasos y nervios aferentes y motores.² Los mecanorreceptores dentro de los meniscos funcionan como transductores, convirtiendo

el estímulo físico de tensión y compresión en un impulso nervioso eléctrico específico (véase capítulo 3).⁴²

Las articulaciones sinoviales se pueden clasificar, en términos generales, según su estructura o analogía (figura 1-3) en las siguientes categorías:

- ▶ **Esferoide.** Como sugiere su nombre, una articulación esferoide es aquella que se mueve con libertad, puesto en la que una esfera en la cabeza de un hueso encaja en una cavidad redondeada en el otro hueso. Las articulaciones esféricas (esferoides) permiten movimientos en tres planos (figura 1-3). Los ejemplos de una superficie de articulación esferoide incluyen las cabezas del fémur y del húmero.
- ▶ **Elipsoide.** Las articulaciones elipsoides son similares a las esféricas pues permiten el mismo tipo de movimiento, aunque en menor magnitud. Este tipo de articulación realiza el movimiento en dos planos (flexión, extensión; abducción, aducción) y es biaxial. Se pueden encontrar ejemplos en la articulación radiocarpiana de la muñeca y la metacarpofalángica en las falanges.
- ▶ **Trocoide.** La articulación trocoide o pivote se caracteriza por un proceso similar a un pivote que gira dentro de un anillo, o un anillo en un pivote, el anillo está formado por hueso y ligamento (figura 1-3). Las articulaciones trocoides solo permiten la rotación. Algunos ejemplos son la articulación húmero radial y la atlantoaxial.
- ▶ **Condiloide (ovoide).** Esta articulación se caracteriza por una superficie ovoide o cóndilo (figura 1-3). Un hueso

puede articularse con otro por una superficie o por dos, pero nunca por más de dos. Si hay dos superficies distintas, la articulación se llama condilar o bicondilar. La cavidad elíptica está diseñada de tal manera que permite los movimientos de flexión, extensión, aducción, abducción y circunducción, pero no rotación axial. La articulación de la muñeca es un ejemplo de este tipo.

- ▶ **Ginglimoide.** Es una articulación en bisagra (figura 1-3). Se caracteriza por una superficie en forma de carrete y una cóncava. Un ejemplo es la articulación húmero cubital.
- ▶ **Planar.** Como su nombre lo indica, una articulación planar se caracteriza por superficies planas que se deslizan unas sobre otras. El movimiento no ocurre alrededor de un eje y se denomina no axial. Los ejemplos de este tipo incluyen las articulaciones intermetatarsianas y algunas intercarpianas.
- ▶ **Silla de montar (sellar).** Las articulaciones de este tipo se caracterizan por una superficie convexa en un plano de sección transversal y una superficie cóncava en el plano perpendicular a ella (figura 1-3). Algunos ejemplos son las articulaciones interfalángicas, la carpometacarpiana del pulgar, la articulación húmero cubital y las calcáneo-cuboideas.

En realidad, ninguna superficie articular es plana ni se parece a una verdadera forma geométrica. En cambio, son convexas o cóncavas en todas las direcciones, es decir, se parecen a la superficie exterior o interior de un trozo de cáscara de huevo.

Líquido sinovial

El cartílago articular está sujeto a una gran variación en las condiciones de carga, por lo que la lubricación de las articulaciones mediante el líquido sinovial es necesaria para minimizar la resistencia a la fricción entre las superficies que soportan el peso. Afortunadamente, las articulaciones sinoviales están dotadas con un sistema lubricante muy superior, que permite una interacción sin fricción de manera notable en las superficies articulares. Una interfase lubricada cartilaginosa tiene un coeficiente de fricción* de 0.002.⁴³⁻⁴⁵ A modo de comparación, el hielo sobre el hielo tiene un coeficiente de fricción más alto (0.03). La composición del líquido sinovial es casi la misma que la del plasma sanguíneo, pero con un contenido de proteína total disminuido y una concentración más alta de hialuronano.⁴³

PERLAS CLÍNICAS

El hialuronano es un componente fundamental del líquido sinovial normal y un contribuyente importante a la homeostasis articular. El hialuronano confiere propiedades antiinflamatorias y antinociceptivas al líquido sinovial normal y ayuda a la lubricación de las articulaciones. También es responsable de las propiedades viscoelásticas del líquido sinovial y coadyuva a la lubricación de las superficies del cartílago articular.⁴⁶

* El coeficiente de fricción es la relación de la fuerza necesaria para hacer que un cuerpo se deslice sobre una superficie en comparación con el peso o la fuerza que mantiene las dos superficies en contacto.

De hecho, el líquido sinovial es en esencia un dializado de plasma al que se ha agregado hialuronano.⁴³ Este último es un GAG que se sintetiza y se libera de forma continua en el líquido sinovial por sinoviocitos especializados.^{47,48} Las propiedades mecánicas del líquido sinovial le permiten actuar como un cojín y como un lubricante para la articulación. Las enfermedades como la osteoartritis afectan las propiedades tixotrópicas (la tixotropía es la propiedad de varios geles que se vuelven fluidos cuando se alteran, por ejemplo, por agitación) del líquido sinovial, lo que reduce la lubricación y se incrementa el desgaste del cartílago, así como de las superficies articulares.⁴³ Se estableció que el cartílago articular dañado en adultos tiene un potencial de curación muy limitado (véase capítulo 2) porque no posee irrigación sanguínea ni drenaje linfático.⁴³

Bursas

Hay estructuras aplanadas en forma de saco llamadas *bursas*, que se encuentran asociadas con algunas articulaciones sinoviales, por lo que están revestidas con una membrana sinovial y llenas de líquido sinovial. La bursa produce pequeñas cantidades de líquido, lo que permite un movimiento suave y casi sin fricción entre los músculos, tendones, huesos, ligamentos y piel que se hallan contiguos. Una vaina de tendón es una bursa modificada. Esta puede ser una fuente de dolor si se inflama o se infecta.

KINESIOLOGÍA

Al describir los movimientos, es necesario tener una posición inicial de referencia (**figura 1-4**). Esta se denomina *posición de referencia anatómica* y se describe como la posición erguida con los pies un poco separados y los brazos



FIGURA 1-4. Posición anatómica.

colgando a los lados, los codos rectos y las palmas de la mano mirando hacia adelante.

Términos direccionales

Estos se utilizan para describir la relación de las partes del cuerpo o la ubicación de un objeto externo con respecto a este. Los siguientes son términos direccionales de uso común:

- ▶ **Superior o craneal.** Más cerca de la cabeza.
- ▶ **Inferior o caudal.** Más cerca de los pies.
- ▶ **Anterior o ventral.** Hacia la parte delantera del cuerpo.
- ▶ **Posterior o dorsal.** Hacia la parte posterior del cuerpo.
- ▶ **Medial.** Hacia la línea media del cuerpo.
- ▶ **Lateral.** Lejos de la línea media del cuerpo.
- ▶ **Proximal.** Más cerca del tronco.
- ▶ **Distal.** Lejos del tronco.
- ▶ **Superficial.** Hacia la superficie del cuerpo.
- ▶ **Profundo.** Lejos de la superficie del cuerpo en dirección a su interior.

MOVIMIENTOS DE LOS SEGMENTOS DEL CUERPO

En general, hay dos tipos de movimientos: traslación, que se produce en línea recta o curva, y rotación, que implica

un movimiento circular alrededor de un punto de pivote. Los movimientos de los segmentos corporales ocurren en tres dimensiones a lo largo de *planos* imaginarios y alrededor de varios *ejes* del cuerpo.

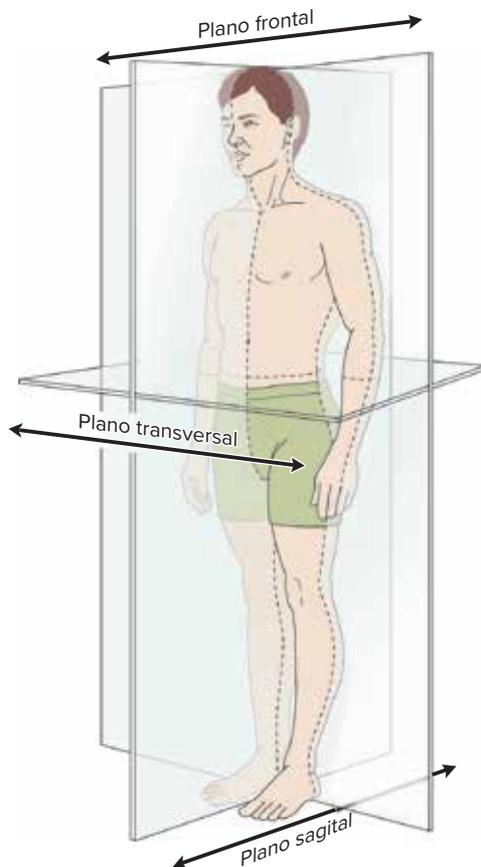
Planos del cuerpo

Hay tres planos tradicionales del cuerpo que corresponden a las tres dimensiones del espacio: sagital, frontal y transversal (figura 1-5).

- ▶ **Sagital.** Este plano, también conocido como *anteroposterior o mediano*, divide el cuerpo verticalmente en mitades izquierda y derecha de igual tamaño.
- ▶ **Frontal.** Este plano, también conocido como *lateral o coronal*, divide el cuerpo en mitades frontal y posterior.
- ▶ **Transversal.** Este plano, también conocido como *horizontal*, divide el cuerpo en mitades superior e inferior.

PERLAS CLÍNICAS

Si un movimiento descrito ocurre en un plano que pasa a través del COG, se considera que ese movimiento sucedió en un plano *cardinal*. Un *arco de movimiento* representa el número total de grados trazados entre las dos posiciones extremas del movimiento en un plano específico.⁵⁰ Si una articulación tiene más de un plano, cada movimiento se denomina *unidad de movimiento*. Por ejemplo, la muñeca tiene dos unidades de movimiento: flexión-extensión y desviación cubital radial.⁵⁰ En los planos cardinales se producen pocos movimientos relacionados con las actividades funcionales. En cambio, la mayoría de los movimientos ocurren en un número infinito de planos verticales y horizontales paralelos a los cardinales (véase discusión que sigue).



Debido a que cada uno de estos planos divide el cuerpo en dos, se deduce que cada uno debe pasar por el centro de gravedad (COG, *center of gravity*) o el centro de masa (COM, *center of mass*).^{*} Se puede considerar que cada objeto o segmento tiene un solo COG o COM, el punto en el que toda la masa parece estar concentrada. En un objeto simétrico, el COG siempre se encuentra en el centro geométrico. Sin embargo, en un objeto asimétrico como el cuerpo humano, el COG se convierte en el punto en el que la línea de gravedad equilibra el objeto. La línea de gravedad se puede visualizar mejor como una cuerda con el peso en el extremo (una plomada), con una cuerda unida al COG de un objeto.⁴⁹ Si el cuerpo humano se considera un objeto rígido, el COG se encuentra un poco antes de la segunda vértebra sacra (S2); sin embargo, dado que no es así, el COG de un individuo continúa cambiando con el movimiento, con la cantidad de variaciones que se suceden en la ubicación, en función de cuán desproporcionadamente se reorganicen los segmentos.⁴⁹ La base de apoyo (BOS, *base of support*) incluye la parte del cuerpo en contacto con la superficie de apoyo

^{*} El centro de gravedad (COG), o centro de masa (COM), puede definirse como el punto en el que los tres planos del cuerpo se cruzan. La línea de gravedad se define como la línea vertical en la que los dos planos verticales se intersectan y siempre está en línea recta hacia abajo, hacia el centro de la Tierra.

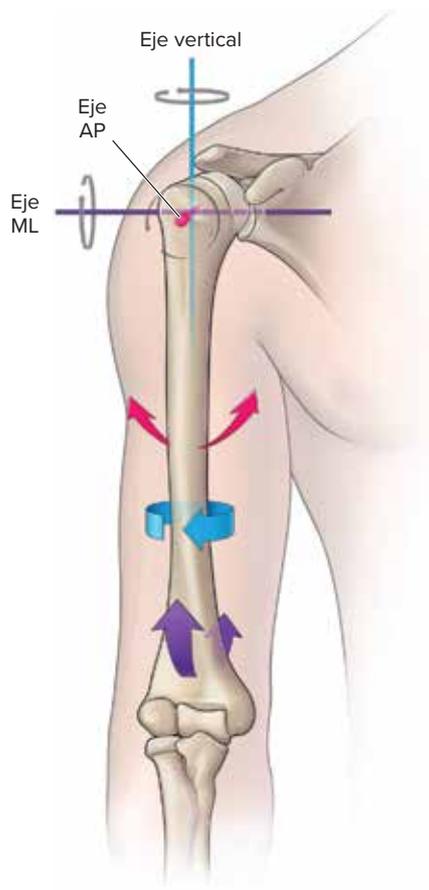


FIGURA 1-6 Ejes del cuerpo.

y el área intermedia. Por ejemplo, durante la bipedestación estática la BOS se encuentra entre los pies del individuo. Sin embargo, si una persona se inclina hacia adelante por la cintura, la línea de gravedad se mueve fuera de la BOS. El tamaño de esta última y su relación con el COG son factores importantes en el mantenimiento del equilibrio y, por tanto, en la estabilidad de un objeto. El COG debe estar por encima de la BOS si se quiere mantener el equilibrio. Si la BOS de un objeto es grande, es menos probable que la línea de gravedad se desplace fuera de ella, lo cual dota de mayor estabilidad al objeto.⁴⁹

Ejes del cuerpo

Se utilizan tres ejes de referencia para describir el movimiento humano: frontal, sagital y longitudinal (figura 1-6). El eje alrededor del cual tiene lugar el movimiento es siempre perpendicular al plano en el que se produce.

- ▶ **Mediolateral.** El eje mediolateral (ML, *mediolateral*) o *frontal* pasa horizontalmente de izquierda a derecha y está formado por la intersección de los planos frontal y transversal.
- ▶ **Vertical.** El eje vertical o *longitudinal* pasa verticalmente de manera inferior a superior y está formado por la intersección de los planos sagital y frontal.
- ▶ **Anteroposterior.** El eje anteroposterior (AP, *anteroposterior*) o *sagital* pasa horizontalmente de manera anterior a posterior y está formado por la intersección de los planos sagital y transversal.

La mayoría de los movimientos ocurren en planos y alrededor de los ejes que se encuentran en algún lugar entre los planos y los ejes tradicionales. Por tanto, la identificación nominal de cada plano y eje de movimiento no es práctica. La estructura de la articulación determina los posibles ejes disponibles. Por ejemplo, en la articulación húmero cubital, en forma de bisagra, la flexión-extensión se produce en el plano sagital alrededor de un eje frontal. En una articulación esferoidea, la abducción-aducción se lleva a cabo en el plano frontal alrededor de un eje sagital. El eje de rotación permanece inmóvil solo si el miembro convexo de una articulación es una esfera perfecta y se articula con un miembro cóncavo de forma recíproca. Los planos y los ejes para los movimientos planos más comunes (figura 1-7) son los siguientes:

- ▶ La flexión, extensión, hiperextensión, dorsiflexión y flexión plantar ocurren en el plano sagital alrededor de un eje ML. Las excepciones a esto incluyen la flexión carpo-metacarpiana y la extensión del pulgar.
 - ▶ La abducción y aducción, la flexión lateral del tronco, la elevación y depresión de la cintura escapular, la desviación radial y cubital de la muñeca y la eversión e inversión del pie ocurren en el plano frontal alrededor de un eje AP.
 - ▶ La rotación de cabeza, cuello y tronco; rotación interna y externa del brazo o pierna; aducción y abducción horizontal del brazo o del muslo, además de la pronación y supinación del antebrazo, suelen producirse en el plano transversal alrededor del eje vertical. Los movimientos rotatorios implican el movimiento curvo de un segmento alrededor de un eje fijo o *centro de rotación*. Cuando se efectúa un movimiento curvo alrededor de un eje que no es fijo, sino que se desplaza en el espacio a medida que el objeto se mueve, el eje alrededor del cual parece trasladarse el segmento se denomina *eje de rotación instantáneo* o *centro de rotación instantáneo* (ICR, *instantaneous center of rotation*) (véase Brazo de momento).
 - ▶ Los círculos con los brazos y el tronco son ejemplos de *circunducción*. Esta implica una secuencia ordenada de movimientos circulares que ocurren en los planos sagital, frontal y oblicuo intermedio, de modo que el segmento en su conjunto incorpora una combinación de flexión, extensión, abducción y aducción. Los movimientos de circunducción pueden suceder en las articulaciones biaxiales y triaxiales. Algunos ejemplos de estas son las articulaciones femorotibial, radio humeral, cadera, glenohumeral y espinal.
- Tanto la configuración de una articulación como la línea de tracción del músculo que actúa en ella determinan el movimiento que se produce:
- ▶ Un músculo cuya línea de tracción es lateral a la articulación es un abductor potencial.
 - ▶ Un músculo cuya línea de tracción es medial a la articulación es un aductor potencial.
 - ▶ Un músculo cuya línea de tracción es anterior a una articulación tiene el potencial de extender o flexionar esta. En la rodilla, una línea de tracción anterior puede hacer que esta se extienda, mientras que en la articulación del codo puede provocar su flexión.

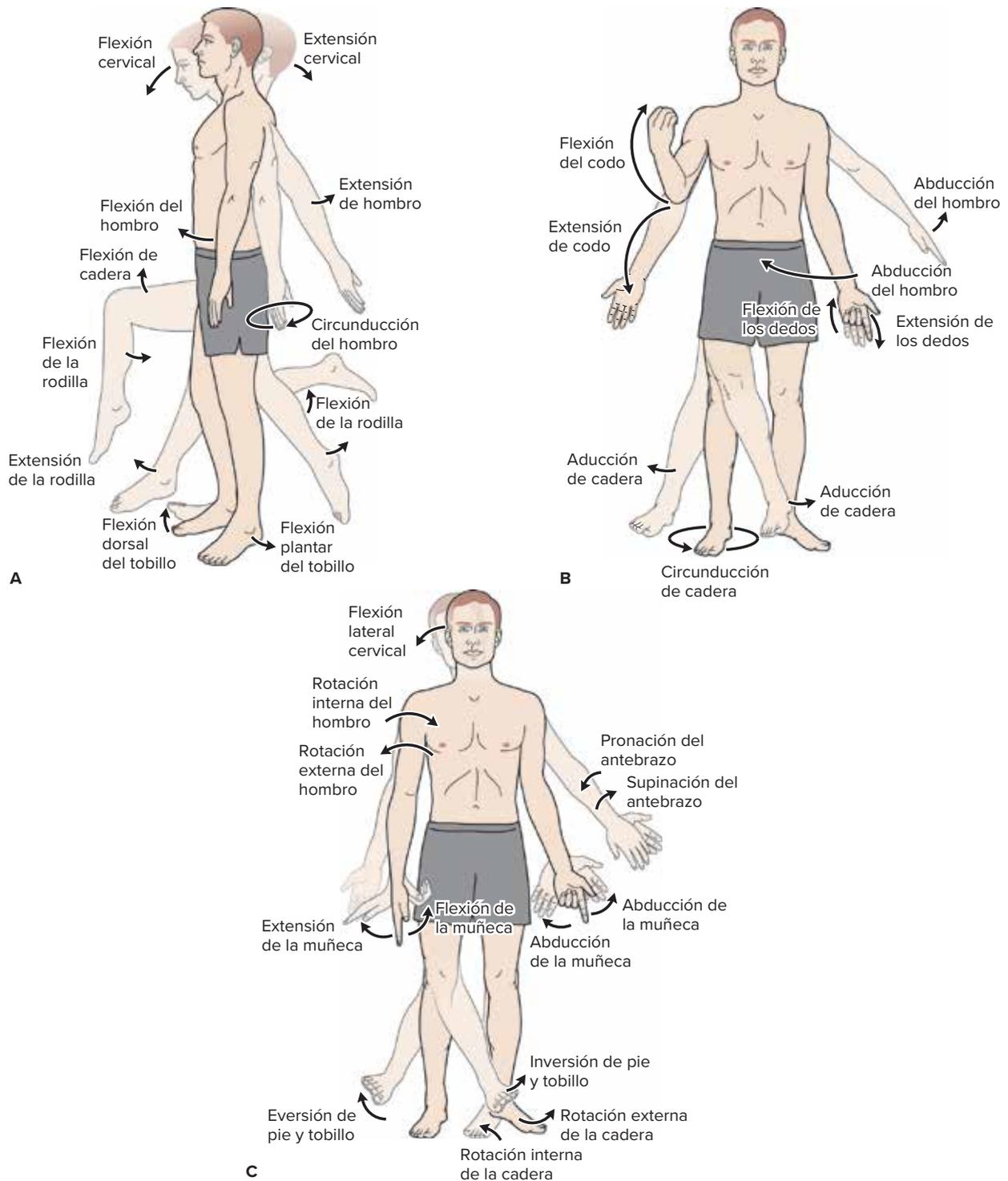


FIGURA 1-7 Movimientos del cuerpo. **A:** Movimientos que ocurren en un plano sagital alrededor de un eje frontal. **B:** Movimientos que ocurren en un plano frontal alrededor de un eje sagital. **C:** Movimientos que ocurren en el plano transversal.

- Un músculo cuya línea de tracción es posterior a la articulación tiene el potencial de extenderla o flexionarla (véase ejemplo anterior).

Grados de libertad

El número de grados de libertad (DOF, *degrees of freedom*) es igual a la cantidad total de desplazamientos independientes o las características del movimiento de un objeto. En

una articulación, el DOF se refiere al número de modos de movimientos independientes disponibles. Una articulación puede tener hasta 3° de libertad angular, correspondientes al número de oscilaciones disponibles en las tres dimensiones del espacio. Por ejemplo, si una articulación solo puede oscilar en una dirección o solo puede girar, se dice que tiene 1 DOF. La articulación interfalángica proximal y la húmero cubital son ejemplos de este tipo. Si una articulación puede girar y oscilar de una sola manera o puede oscilar de dos

formas completamente distintas, pero no girar, se dice que tiene 2 DOF. La articulación femorotibial, la temporomandibular, la radio cubital proximal y distal, la subastragalina y la astragalocalcánea son ejemplos de lo anterior. Si el hueso puede girar y también oscilar en dos direcciones distintas, se dice que tiene 3 DOF. Las articulaciones esferoides como el hombro y la cadera tienen 3 DOF.

PERLAS CLÍNICAS

La oscilación de la articulación que ocurre solo en un plano se designa con 1 DOF; en dos planos, 2 DOF; y en tres, 3 DOF. Cuando se incluyen movimientos accesorios (véase Cinemática articular), ciertas articulaciones como la intervertebral pueden moverse libremente con 6 DOF: deslizamiento anterior/posterior, deslizamiento superior/inferior y de traslación hacia la izquierda/derecha, además de las oscilaciones articulares disponibles alrededor de los tres ejes de rotación.

Debido a la disposición de las superficies articulares, de los ligamentos circundantes y de las cápsulas articulares, la mayoría de los movimientos alrededor de una articulación no ocurren en planos rectos o en líneas rectas. En cambio, los huesos de cualquier articulación se mueven a través del espacio en trayectorias curvas. Esto se puede ilustrar mejor utilizando la *paradoja de Codman*.

1. Párate con los brazos a los lados, las palmas hacia adentro y los pulgares extendidos. Observa que el pulgar apunta hacia adelante.
2. Flexiona un brazo a 90° con respecto al hombro para que el pulgar apunte hacia arriba.
3. Desde esta posición, extiende el brazo horizontalmente de modo que el pulgar quede apuntando hacia arriba, pero tu brazo esté en una posición de 90° de abducción glenohumeral.
4. Desde esta posición, sin girar el brazo, devuélvelo a tu costado y observa que el pulgar ahora apunta en dirección opuesta al muslo.

Refiriéndonos a la posición inicial y con el uso del pulgar como referencia, el brazo ha experimentado una rotación externa de 90°. Pero ¿dónde y cuándo tuvo lugar esta? Sin lugar a duda, ocurrió durante los tres movimientos u oscilaciones separadas en un plano recto que marcaron un triángulo en el espacio. Lo que acabas de presenciar es un ejemplo de rotación conjunta, la cual se produce como resultado de las formas de la superficie de las articulaciones y el efecto de los tejidos inertes en lugar de los tejidos contráctiles. Las rotaciones conjuntas solo pueden presentarse en articulaciones que pueden girar interna o externamente. Aunque no siempre es evidente, la mayoría de las articulaciones pueden rotar. Considera los movimientos de flexión y extensión del codo; mientras lo flexionas y extiendes por completo unas cuantas veces, observa el hueso pisiforme y el antebrazo, si miras con atención, debes notar que estos se mueven en una dirección de supinación durante la flexión y de pronación durante la extensión del codo. Los movimientos de pronación y supinación son ejemplos de rotaciones conjuntas.

La mayoría de los movimientos habituales o aquellos que ocurren con mayor frecuencia en una articulación implican

una rotación conjunta. Sin embargo, esta última no siempre está bajo control volitivo. De hecho, la rotación conjunta solo está bajo control volitivo en articulaciones con 3 DOF. En aquellas con menos de 3 DOF la rotación conjunta se produce como parte del movimiento, pero no es un acto voluntario. Las implicaciones de esto se vuelven importantes cuando se intenta restaurar el movimiento en estas articulaciones: las técnicas de movilización deben tener en cuenta tanto las formas relativas de las superficies articuladas como la rotación conjunta que se asocia con un movimiento en particular (véase capítulo 10).

CINEMÁTICA ARTICULAR

La cinemática es el estudio del movimiento y describe cómo se mueve algo sin indicar la causa. Cinética es el término utilizado para explicar por qué un objeto se mueve de la forma en la que lo hace debido a las fuerzas que actúan sobre este (véase capítulo 2). En el estudio de la cinemática articular, están involucrados dos tipos principales de movimiento: 1) osteocinemático y 2) artrocinemático.

Movimiento osteocinemático

El ROM normal de una articulación a veces se denomina ROM fisiológico o anatómico. Los movimientos fisiológicos de los huesos llamados osteocinemáticos son aquellos que se pueden realizar de forma voluntaria, por ejemplo, la flexión del hombro. El movimiento osteocinemático ocurre cuando cualquier objeto forma el radio de un círculo imaginario alrededor de un punto fijo. El eje de rotación para los movimientos osteocinemáticos está orientado de manera perpendicular al plano en el que se produce la rotación. La distancia recorrida por el movimiento puede ser un pequeño arco o un círculo completo y se mide como un ángulo, en grados. Todos los movimientos de los segmentos del cuerpo humano implican movimientos osteocinemáticos. Algunos ejemplos son la abducción o aducción del brazo, la flexión de la cadera o la rodilla y la inclinación lateral del tronco. Varios factores determinan la cantidad de movimiento articular fisiológico disponible, que incluyen:

- ▶ la integridad de las superficies articulares y la cantidad de movimiento articular;
- ▶ la movilidad y la flexibilidad de los tejidos blandos que rodean una articulación;
- ▶ el grado de aproximación que se produce en los tejidos blandos;
- ▶ la cantidad de cicatrices o adherencias que están presentes, pueden producirse cicatrices intersticiales o fibrosis dentro y alrededor de las cápsulas articulares, dentro de los músculos y de los ligamentos como resultado de un traumatismo previo;
- ▶ edad, el movimiento de las articulaciones tiende a disminuir con la edad, debido, en primer lugar, a cambios osteoartrotróficos; y
- ▶ género, las mujeres suelen tener más movimiento articular que los hombres.

El ROM se considera patológico cuando el movimiento en una articulación excede o no alcanza los límites fisiológicos normales (véase capítulo 2).³⁹

Brazo de momento

Para comprender el concepto de brazo de momento es necesario entender la anatomía y el movimiento (cinemática) de la articulación de interés. Aunque los músculos producen fuerzas lineales, los movimientos en las articulaciones son todos rotatorios. Por ejemplo, se puede considerar que algunas articulaciones giran alrededor de un punto fijo. Un buen ejemplo de esto es el codo. En este, donde se articulan el húmero y el cúbito, la rotación resultante se produce ante todo alrededor de un punto fijo, denominado COR. En este caso, el COR es en cierto modo constante en todo el ROM de la articulación. Sin embargo, en otras (por ejemplo, la rodilla), el COR se mueve a través del espacio a medida que la articulación se flexiona y se extiende porque las superficies no son círculos perfectos. En el caso de la rodilla, no conviene hablar de un solo COR, sino que existe uno correspondiente a un ángulo articular específico o, utilizando la terminología de cinemática articular, debemos referirnos al ICR, es decir, el COR en cualquier "instante" en el tiempo o el espacio. Por tanto, el brazo de momento se define como la distancia perpendicular desde la línea de aplicación de la fuerza al eje de rotación.

Movimiento artrocinemático

En cada articulación sinovial, la superficie de la articulación de cada hueso se mueve en relación con la forma de la otra superficie de articulación. El término *artrocinemática* se usa para describir los movimientos de las superficies óseas dentro de la articulación. El tipo y la cantidad de movimiento que se produce en las superficies articulares están influenciados

por la forma de sus respectivas superficies articulares. Los movimientos artrocinemáticos no se pueden realizar de forma voluntaria y solo pueden ocurrir cuando se aplica resistencia al movimiento activo o cuando los músculos del paciente están relajados por completo. Tanto el movimiento fisiológico (osteocinemático) como el juego articular o el movimiento accesorio (artrocinemático) se llevan a cabo al mismo tiempo y son directamente proporcionales entre sí; con un pequeño aumento del movimiento artrocinemático se produce un mayor incremento del osteocinemático. Por tanto, una restricción del movimiento artrocinemático da como resultado una disminución del osteocinemático.

Una articulación normal tiene un rango disponible de movimiento activo o fisiológico que está limitado por una barrera fisiológica a medida que se desarrolla tensión dentro de los tejidos circundantes, como la cápsula articular, los ligamentos y el CT. Más allá del ROM pasivo disponible, se encuentra la barrera anatómica. Esta no se puede superar sin alterar la integridad de la articulación. En la barrera fisiológica, hay una cantidad adicional de ROM pasivo disponible. Este pequeño movimiento que se produce en las superficies articulares se denomina movimiento del *juego articular*. Existen tres tipos fundamentales basados en las diferentes superficies articulares (figura 1-8):

► **Rodamiento.** Ocurre cuando los puntos de contacto en cada superficie de la articulación incongruente cambian en forma constante, de modo que un nuevo punto en una superficie se encuentra con otro en la superficie opuesta (figura 1-8). Tal tipo de movimiento es análogo a un neumático en un automóvil cuando este avanza. En una articulación que funciona normalmente, el rodamiento puro no ocurre solo, sino que se presenta en combinación con el deslizamiento y el giro de la articulación. El término *mecer* se usa a menudo para describir pequeños movimientos de rodamiento. Este es siempre en la misma dirección que el movimiento del hueso oscilante, con

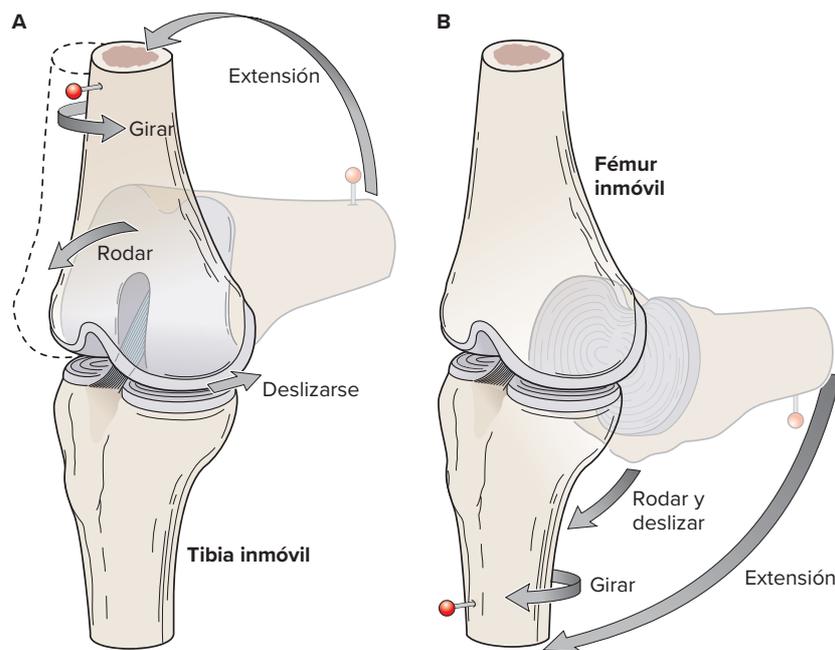


FIGURA 1-8 Artrocinemática del movimiento.

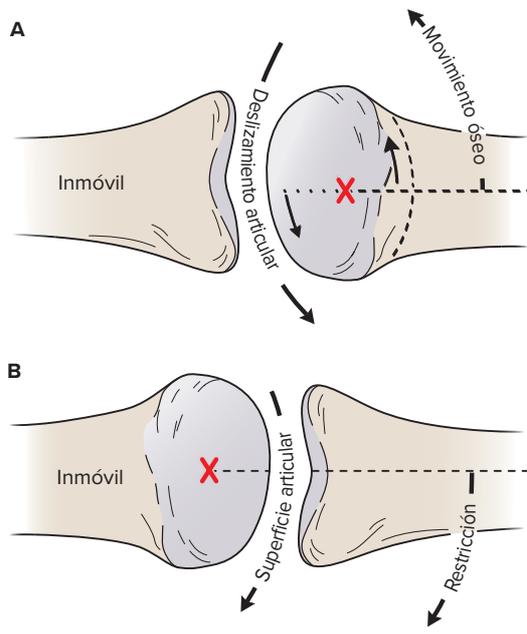


FIGURA 1-9 Movimientos de deslizamiento según superficies articulares.

independencia de si la superficie es convexa o cóncava (figura 1-8). Si el rodamiento ocurre solo, causa compresión de las superficies en el lado hacia el cual el hueso rueda y separación en el otro lado.

- ▶ **Deslizamiento.** Es una traslación pura si las dos superficies son planas o curvas en forma congruente. Ocurre si solo un punto de la superficie móvil hace contacto con nuevos puntos de la superficie opuesta (figura 1-8). Este tipo de movimiento es análogo al patinaje de un neumático de automóvil cuando los frenos se aplican de pronto en una carretera mojada. Este tipo de movimiento también se conoce como de *traslación*. Aunque el rodamiento de una articulación siempre ocurre en la misma dirección que la oscilación de un hueso, la dirección del deslizamiento está determinada por la forma de la superficie de la articulación (figura 1-9). Esta regla a menudo se conoce como *regla cóncavo-convexa*: si la superficie de la articulación es convexa con respecto a la otra superficie, el deslizamiento ocurre en la dirección opuesta al movimiento osteocinématico (figura 1-9). Si, por otro lado, la superficie de la articulación es cóncava, el deslizamiento se produce en la misma dirección que el movimiento osteocinématico (figura 1-9). La importancia clínica de la regla cóncavo-convexa se describe en el capítulo 10.
- ▶ **Giro.** Un giro se define como cualquier movimiento en el que el hueso se mueve, pero el eje mecánico permanece inmóvil. Un giro implica la rotación de una superficie sobre otra opuesta alrededor de un eje vertical (figura 1-8). Este tipo de movimiento es análogo a la pirueta que realiza una bailarina de ballet. En las articulaciones, el giro rara vez ocurre solo, por el contrario, sucede en combinación con el rodamiento y el deslizamiento. Los movimientos de giro en el cuerpo incluyen la rotación interna y externa de la articulación glenohumeral cuando el húmero está en abducción de 90° y en la cabeza radial durante la pronación y supinación del antebrazo.

La mayoría de las articulaciones anatómicas muestran movimientos compuestos que implican rodamiento, deslizamiento y giro.

Como los movimientos osteocinématico y artrocinématico son proporcionales entre sí, de modo que no puede ocurrir por completo uno sin el otro, se deduce que, si un movimiento activo se reduce en comparación con la misma articulación en el otro lado del cuerpo, uno o ambos movimientos pueden estar fallando. Es fundamental que el médico determine si el movimiento osteocinématico o artrocinématico está restringido para que la intervención se pueda hacer lo más específica posible. Esto es de particular importancia cuando se intenta recuperar el movimiento, utilizando métodos de estiramiento tradicionales (que emplean movimientos osteocinématicos) en presencia de un movimiento artrocinématico restringido, ya que estos métodos magnifican la fuerza en la articulación y provocan la compresión de las superficies articulares en la dirección del rodamiento del hueso. Por el contrario, el uso de una técnica artrocinématica para aumentar el juego articular permite que la fuerza se aplique cerca de la superficie y en la dirección que replica el componente deslizante de la mecánica articular.

PERLAS CLÍNICAS

Los médicos utilizan otros dos movimientos accesorios en diversas técnicas manuales: compresión y distracción.

- ▶ **Compresión.** Esto ocurre cuando hay una disminución en el espacio articular entre las parejas óseas y, aunque sucede naturalmente en todo el cuerpo siempre que una articulación soporta peso, se puede aplicar de manera manual para ayudar a mover el líquido sinovial y mantener la salud del cartilago.
- ▶ **Distracción.** Esto implica un aumento del espacio articular entre las parejas óseas. Los términos *tracción* y *distracción* no son sinónimos, ya que el primero implica una fuerza aplicada al eje largo de un hueso, que no siempre da como resultado un aumento del espacio articular entre las parejas óseas. Por ejemplo, si se aplica tracción al eje del fémur, se produce un deslizamiento en la superficie de la articulación de la cadera, mientras que, si se aplica una fuerza de distracción en ángulo recto con el acetábulo, se produce una distracción en la articulación de la cadera.

En las extremidades, el movimiento osteocinématico está controlado por el grado de flexibilidad de los tejidos blandos circundantes de la articulación, donde la flexibilidad se mide como la cantidad de resistencia interna al movimiento. Por el contrario, el movimiento artrocinématico está controlado por la integridad de las superficies articulares y los tejidos de soporte de la articulación. Esta característica se puede observar clínicamente en una ruptura crónica del ligamento cruzado anterior de la rodilla. Al examinarla, se encuentra que el movimiento artrocinématico (deslizamiento articular) aumenta, confirmado por una prueba de Lachman positiva, pero el ROM de la rodilla, su movimiento osteocinématico, no se ve afectado (véase capítulo 20).

Por el contrario, en la columna, el movimiento osteocinématico está controlado por la flexibilidad de los tejidos blandos circundantes y por la integridad de las superficies

articulares y los tejidos de soporte de la articulación. Esta característica se puede observar en clínica al examinar la articulación craneovertebral, donde una restricción en el movimiento artrocinemático (deslizamiento articular) puede ser causada por una restricción articular o un músculo suboccipital acortado adaptativamente (véase capítulo 23).

La exploración de estos movimientos y sus implicaciones clínicas se describen en los capítulos 4 y 10.

Palancas

Una palanca es un objeto rígido que se utiliza para multiplicar la fuerza mecánica (esfuerzo) o la fuerza de resistencia (carga) que se aplica alrededor de un eje. La fuerza de esfuerzo intenta provocar el movimiento de la carga. En aras de la simplicidad, las palancas por lo general se describen usando una barra recta, que es la palanca, y el fulcro, que es el punto sobre el que descansa la barra y alrededor del cual gira la palanca. Esa parte entre el fulcro y la carga se denomina brazo de carga. Se suelen citar tres tipos de palancas:

- ▶ Primera clase. Ocurre cuando se aplican dos fuerzas a cada lado del eje y el fulcro se encuentra entre el esfuerzo y la carga (figura 1-10), como un balancín. Los ejemplos en el cuerpo humano incluyen la contracción del tríceps en la articulación del codo o la inclinación de la cabeza hacia adelante y hacia atrás.
- ▶ Segunda clase. Ocurre cuando la carga (resistencia) se aplica entre el fulcro y el punto donde se ejerce el esfuerzo (figura 1-10). Los efectos aumentados del esfuerzo requieren menos fuerza para mover la resistencia. Algunos ejemplos de palancas de segunda clase en la vida cotidiana son el cascanueces y la carretilla, con la rueda actuando como punto de apoyo. Un ejemplo de palanca de segunda clase en el cuerpo humano es la flexión plantar con soporte de peso (levantarse sobre los dedos de los pies) (figura 1-10). Otro sería una contracción aislada del braquiorradial para flexionar el codo, que solo podría ocurrir si los otros flexores del codo están paralizados.
- ▶ Tercera clase. Se presenta cuando la carga se ubica en el extremo de la palanca (figura 1-10) y el esfuerzo se encuen-

tra entre el fulcro y la carga, como un puente levadizo o una grúa. El esfuerzo se ejerce entre la carga y el fulcro. El esfuerzo realizado es mayor que la carga, pero esta se mueve una distancia mayor. La mayoría de las articulaciones móviles del cuerpo humano funcionan como palancas de tercera clase, por ejemplo, la flexión del codo.

Cuando una máquina aplica más fuerza que la que se necesita, se dice que tiene una ventaja mecánica (MA, *mechanical advantage*). La MA de la palanca musculoesquelética se define como la relación entre el brazo de momento interno y el externo. En función de la ubicación del eje de rotación, la palanca de primera clase puede tener un MA igual, menor o mayor que 1.⁵¹ Las palancas de segunda clase siempre tienen un MA mayor que 1 y las de tercera clase un MA menor que 1. La mayoría de los músculos de todo el sistema musculoesquelético funcionan con una MA mucho menor que 1. Por tanto, los músculos y las articulaciones subyacentes deben “pagar el precio”, generando y dispersando fuerzas en principio grandes, incluso para actividades que en apariencia son de baja carga.⁵¹

CADENAS CINEMÁTICAS

Cuando un cuerpo se mueve, lo hace por su cinemática, que en el cuerpo humano tiene lugar a través de movimientos artrocinemáticos y osteocinemáticos. La expresión *cadena cinemática* se utiliza en rehabilitación para describir la función o actividad de una extremidad o del tronco en términos de una serie de cadenas unidas (véase capítulo 12). Una cadena cinemática se refiere a una serie de eslabones articulados y segmentados, como la pelvis, el muslo, la pierna y el pie conectados de la extremidad inferior.⁵² Según la teoría de la cadena cinemática, cada uno de los segmentos articulares del cuerpo involucrados en un movimiento particular constituye un eslabón en la cadena cinemática. Debido a que cada movimiento de una articulación es a menudo una función de otros movimientos articulares, la eficiencia de una actividad puede depender de qué tan bien estos eslabones de la cadena trabajen juntos.

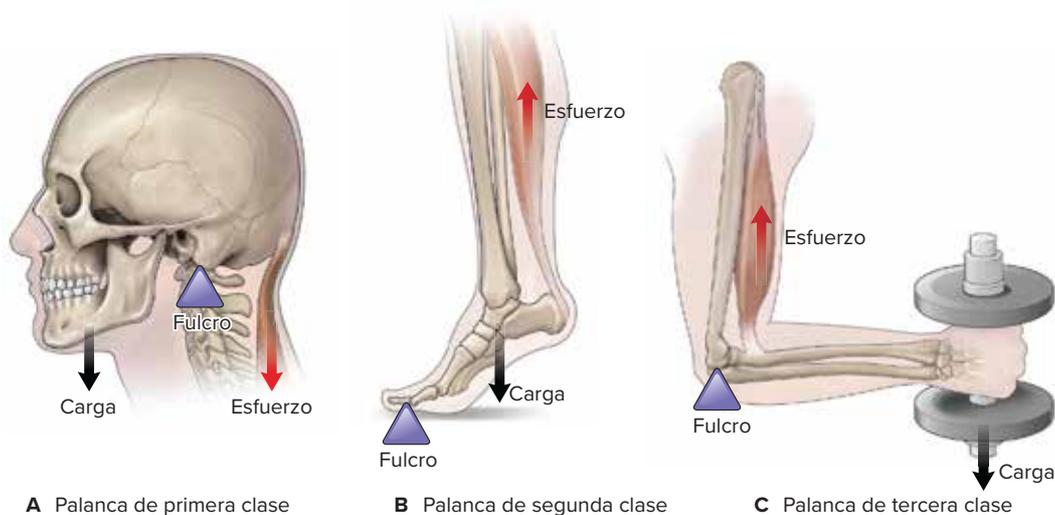


FIGURA 1-10 Las tres clases de palancas.

CUADRO 1-5 Características diferenciales de los ejercicios OKC y CKC			
Modo de ejercicio	Características	Ventajas	Desventajas
Cadena cinemática abierta	<ol style="list-style-type: none"> Grupo de músculos individuales Un solo eje y plano Destaca la contracción concéntrica No soporta peso 	<ol style="list-style-type: none"> Reclutamiento aislado Patrón de movimiento simple Reclutamiento aislado Compresión articular mínima 	<ol style="list-style-type: none"> Función limitada Función limitada Excéntricas limitadas Menos propiocepción y estabilidad articular con mayores fuerzas de cizallamiento articulares
Cinemática cerrada	<ol style="list-style-type: none"> Múltiples grupos de músculos Múltiples ejes y planos Equilibrio de contracciones concéntricas y excéntricas Ejercicios con pesas 	<ol style="list-style-type: none"> Reclutamiento funcional Patrones de movimiento funcionales Contracciones funcionales Mayor propiocepción y estabilidad articular 	<ol style="list-style-type: none"> Difícil de aislar Más complejo Pérdida de control de la articulación blanco Fuerzas de compresión sobre superficies articulares

Reproducido con permiso de Greenfield BH, Tovin BJ. The application of open and closed kinematic chain exercises in rehabilitation of the lower extremity. *J Back Musculoskelet Rehabil.* 1992 Jan 1;2(4):38–51.

PERLAS CLÍNICAS

El número de eslabones dentro de una cadena cinemática particular varía en función de la actividad. En general, las cadenas cinemáticas más largas están involucradas con actividades más extenuantes.

Se reconocen dos tipos de sistemas de cadena cinemática: el sistema de *cadena cinemática cerrada* (CKC, *closed kinematic chain*) y el sistema de *cadena cinemática abierta* (OKC, *open kinematic chain*) (cuadro 1-5).

Cadena cinemática cerrada

Una actividad de CKC se puede definir como cualquier movimiento si ambos extremos de la cadena cinética están conectados a un marco inamovible o si el segmento distal es fijo (soportando el peso corporal), en una situación donde hay mayores fuerzas de compresión articular, mayor congruencia articular y estabilización dinámica mejorada. Algunos ejemplos de ejercicios de cadena cinemática cerrada (CKCE, *closed kinematic chain exercises*) que involucran las extremidades inferiores incluyen la sentadilla y la prensa de piernas. Las actividades de caminar, correr, saltar, trepar y levantarse del piso incorporan componentes de la cadena cinética cerrada. Un ejemplo de CKCE para las extremidades superiores es la flexión de los brazos o cuando se usan estos para empujar hacia abajo los descansabrazos de una silla al levantarse.

PERLAS CLÍNICAS

En la mayoría de las actividades de la vida diaria, la secuencia de activación de los eslabones implica una cadena cerrada mediante la cual la actividad se inicia desde un BOS firme y se transfiere a un segmento distal con mayor movilidad.

Cadena cinemática abierta

Es un hecho que la diferencia entre las actividades de la OKC y la CKC está determinada por el movimiento del segmento final. La definición tradicional de una actividad de cadena abierta incluía todos los ejercicios que involucraban el segmento final de una extremidad moviéndose con libertad a

través del espacio, lo que resultaba en el movimiento aislado de una articulación.⁵³

Algunos ejemplos de una actividad de cadena abierta son levantar un vaso y patear una pelota de fútbol. Los ejercicios de cadena cinemática abierta (OKCE, *open kinematic chain exercises*) que involucran la extremidad inferior incluyen la extensión sentada de la rodilla y la flexión de la misma en decúbito prono. Algunos ejemplos de los OKCE de las extremidades superiores son la flexión del bíceps y la prensa militar.

Estas definiciones no siempre son claras. Por ejemplo, muchas actividades, como la natación y el ciclismo, que suelen ser vistas como ejercicios de OKC, incluyen una carga en el segmento final; sin embargo, este no es “fijo” y restringido de movimiento. Esta ambigüedad de definiciones para las actividades de CKC y OKC ha permitido que algunas se clasifiquen en categorías opuestas. Por tanto, ha habido una necesidad creciente de aclarar la terminología de OKC y CKC, en especial cuando se relaciona con actividades funcionales.

POSICIONES DE ENCAJE CERRADO Y ABIERTO DE LA ARTICULACIÓN

Los movimientos articulares suelen ir acompañados de una compresión relativa (aproximación) o distracción (separación) de las superficies articulares opuestas. Estas compresiones o distracciones relativas afectan el nivel de *congruencia* de las superficies opuestas. La posición de máxima congruencia de las superficies articulares opuestas se denomina de *encaje cerrado* de la articulación. La posición de menor congruencia se denomina de *encaje abierto*. Por tanto, los movimientos hacia la posición de encaje cerrado implican un elemento de compresión, mientras que los movimientos fuera de esta implican un componente de distracción.

Posición de encaje cerrado

Esta posición articular da como resultado:

- ▶ la máxima tensión de los ligamentos principales;
- ▶ máxima congruencia superficial;
- ▶ volumen articular mínimo; y
- ▶ máxima estabilidad de la articulación.

CUADRO 1-6 Posición de encaje cerrado de las articulaciones	
Articulación	Posición
Cigapofisaria (columna)	Extensión
Temporomandibular	Dientes apretados
Glenohumeral	Abducción y rotación externa
Acromioclavicular	Brazo abducido a 90°
Esternoclavicular	Elevación máxima del hombro
Cúbito humeral	Extensión
Radio humeral	Codo flexionado 90°, antebrazo supinado 5°
Radio cubital proximal	5° de supinación
Radio cubital distal	5° de supinación
Radiocarpiana (muñeca)	Extensión con desviación radial
Metacarpofalángica	Flexión completa
Carpometacarpiana	Oposición total
Interfalángica	Extensión completa
Cadera	Extensión completa, rotación interna y abducción
Femorotibial	Extensión completa y rotación externa de la tibia
Talocrural (tobillo)	Dorsiflexión máxima
Subastragalina	Supinación
Medioastragalina	Supinación
Tarsometatarsiana	Supinación
Metatarsofalángica	Extensión completa
Interfalángica	Extensión completa

Una vez que se alcanza la posición de encaje cerrado, no es posible realizar ningún otro movimiento en esa dirección. Esta es la razón que se cita con frecuencia por la cual la mayoría de las fracturas y dislocaciones ocurren cuando se aplica una fuerza externa a una articulación que se encuentra en esa posición. Además, muchas de las lesiones traumáticas de las extremidades superiores son el resultado de una caída sobre un hombro, codo o muñeca, que permanecen en esta posición. Este tipo de lesión, una caída con la mano extendida, a menudo se denomina lesión FOOSH (FOOSH, *fall on an outstretched hand*). Las posiciones de encaje cerrado para las diversas articulaciones se muestran en el [cuadro 1-6](#).

Posición de encaje abierto

En esencia, cualquier posición de la articulación que no sea la de encaje cerrado podría considerarse como una posición de encaje abierto. Esta, conocida también como la posición de encaje *suelto* de una articulación, es aquella que da como resultado:

- ▶ aflojamiento de los ligamentos principales de la articulación;
- ▶ mínima congruencia superficial;

CUADRO 1-7 Posición de encaje abierto (reposo) de las articulaciones	
Articulación	Posición
Cigapofisaria (columna)	A medio camino entre la flexión y la extensión
Temporomandibular	Boca apenas abierta (espacio de camino libre)
Glenohumeral	55° de abducción, 30° de aducción horizontal
Acromioclavicular	Brazo descansando al lado
Esternoclavicular	Brazo descansando al lado
Cúbito humeral	70° de flexión, 10° de supinación
Radio humeral	Extensión completa, supinación completa
Radio cubital proximal	70° de flexión, 35° de supinación
Radio cubital distal	10° de supinación
Radiocarpiana (muñeca)	Neutral con ligera desviación cubital
Carpometacarpiana	A medio camino entre abducción-aducción y flexión-extensión
Metacarpofalángica	Ligera flexión
Interfalángica	Ligera flexión
Cadera	10 a 30° de flexión, 10 a 30° de abducción y 0 a 5° de rotación externa
Femorotibial	25° de flexión
Talocrural (tobillo)	10° de flexión plantar, a medio camino entre la inversión máxima y la eversión
Subastragalina	A medio camino entre los extremos de rango de movimiento
Medioastragalina	A medio camino entre los extremos de rango de movimiento
Tarsometatarsiana	A medio camino entre los extremos de rango de movimiento
Metatarsofalángica	Neutral
Interfalángica	Ligera flexión

- ▶ mínimo contacto con la superficie de la articulación;
- ▶ volumen articular máximo; y
- ▶ mínima estabilidad de la articulación.

La posición de encaje abierto permite la máxima distracción de las superficies articulares. Debido a que la posición abierta hace que la cápsula articular o los ligamentos circundantes soporten la mayor parte de cualquier fuerza externa, la mayoría de los esguinces capsulares o ligamentosos ocurren cuando una articulación está en su posición abierta. Las posiciones de encaje abierto para las diversas uniones se muestran en el [cuadro 1-7](#).

PERLAS CLÍNICAS

La posición de encaje abierto se utiliza en forma habitual durante las técnicas de movilización articular (véase capítulo 10).

REFERENCIAS

- Buckingham M, Bajard L, Chang T, et al. The formation of skeletal muscle: from somite to limb. *J Anat.* 2003;202:59–68.
- Stranding S, Gray H. *Gray's Anatomy: The Anatomical Basis of Clinical Practice*. 41st ed. London, England: Elsevier; 2015.
- Sharma P, Maffulli N. Tendon injury and tendinopathy: healing and repair. *J Bone Joint Surg Am.* 2005;87:187–202.
- Starcher BC. Lung elastin and matrix. *Chest.* 2000;117(5 Suppl 1):229S–234S.
- Barnes JF. *Myofascial Release, Healing Ancient Wounds*. 2nd ed. Paoli, PA: MFR Treatment Centers & Seminars; 2017.
- Day JA. Fascial anatomy in manual therapy: introducing a new biomechanical model. *Orthop Phys Ther Pract.* 2011;23:68–74.
- Screen H. Tendon and tendon pathology. In: Jull G, Moore A, Falla D, Lewis J, McCarthy C, Sterling M, eds. *Grieve's Modern Musculoskeletal Physiotherapy*. 4th ed. London, England: Elsevier; 2015:106–112.
- McCarthy MM, Hannafin JA. The mature athlete: aging tendon and ligament. *Sports Health.* 2014;6:41–48.
- Ryan M, Bisset L, Newsham-West R. Should we care about tendon structure? The disconnect between structure and symptoms in tendinopathy. *J Orthop Sports Phys Ther.* 2015;45:823–825.
- Lodish H, Berk A, Kaiser CA, et al. Protein structure and function. In: Lodish H, Berk A, Kaiser CA, Krieger M, Bretscher A, Ploegh H, et al., eds. *Molecular Cell Biology*. 8th ed. New York, NY: Macmillan Higher Education/W.H. Freeman; 2016:67–128.
- Michener LA, Kulig K. Not all tendons are created equal: implications for differing treatment approaches. *J Orthop Sports Phys Ther.* 2015;45:829–832.
- Lian Ø, Dahl J, Ackermann PW, Frihagen F, Engebretsen L, Bahr R. Pronociceptive and antinociceptive neuromediators in patellar tendinopathy. *Am J Sports Med.* 2006;34:1801–1808.
- Silbernagel KG, Crossley KM. A proposed return-to-sport program for patients with midportion achilles tendinopathy: rationale and implementation. *J Orthop Sports Phys Ther.* 2015;45:876–886.
- Scott A, Backman LJ, Speed C. Tendinopathy: update on pathophysiology. *J Orthop Sports Phys Ther.* 2015;45:833–841.
- Curwin SL. Tendon pathology and injuries: pathophysiology, healing, and treatment considerations. In: Magee D, Zachazewski JE, Quillen WS, eds. *Scientific Foundations and Principles of Practice in Musculoskeletal Rehabilitation*. St. Louis, MO: WB Saunders; 2007:47–78.
- Benjamin M, Toumi H, Ralphs JR, Bydder G, Best TM, Milz S. Where tendons and ligaments meet bone: attachment sites ('entheses') in relation to exercise and/or mechanical load. *J Anat.* 2006;208(4):471–490.
- Maganaris CN, Narici MV, Almekinders LC, Maffulli N. Biomechanics and pathophysiology of overuse tendon injuries: ideas on insertional tendinopathy. *Sports Med.* 2004;34(14):1005–1017.
- Hildebrandt KA, Hart DA, Rattner JB, et al. Ligament injuries: pathophysiology, healing, and treatment considerations. In: Magee D, Zachazewski JE, Quillen WS, eds. *Scientific Foundations and Principles of Practice in Musculoskeletal Rehabilitation*. St. Louis, MO: WB Saunders; 2007:23–46.
- Vereeke West R, Fu F. Soft tissue physiology and repair. *Orthopaedic Knowledge Update 8: Home Study Syllabus*. Rosemont, IL: American Academy of Orthopaedic Surgeons; 2005:15–27.
- Tippett SR. Considerations for the pediatric patient. In: Voight ML, Hoogenboom BJ, Prentice WE, eds. *Musculoskeletal Interventions: Techniques for Therapeutic Exercise*. New York, NY: McGraw-Hill; 2007:803–820.
- Duchesne E, Dufresne SS, Dumont NA. Impact of inflammation and anti-inflammatory modalities on skeletal muscle healing: from fundamental research to the clinic. *Phys Ther.* 2017;97:807–817.
- Frontera WR, Ochala J. Skeletal muscle: a brief review of structure and function. *Calcif Tissue Int.* 2015;96(3):183–195.
- Dumont NA, Bentzinger CF, Sincennes MC, Rudnicki MA. Satellite cells and skeletal muscle regeneration. *Compr Physiol.* 2015;5:1027–1059.
- Folland JP, Williams AG. The adaptations to strength training: morphological and neurological contributions to increased strength. *Sports Med.* 2007;37:145–168.
- Pollock R, Harridge S. Neuromuscular adaptations to exercise. In: Jull G, Moore A, Falla D, Lewis J, McCarthy C, Sterling M, eds. *Grieve's Modern Musculoskeletal Physiotherapy*. 4th ed. London, England: Elsevier; 2015:68–77.
- Williams JH, Klug GA. Calcium exchange hypothesis of skeletal muscle fatigue: a brief review. *Muscle Nerve.* 1995;18(4):421–434.
- Fitts RH, Widrick JJ. Muscle mechanics: adaptations with exercise training. *Exerc Sport Sci Rev.* 1996;24:427–473.
- Chen HY, Chien CC, Wu SK, Liao JJ, Jan MH. Electromechanical delay of the vastus medialis obliquus and vastus lateralis in individuals with patellofemoral pain syndrome. *J Orthop Sports Phys Ther.* 2012;42:791–796.
- Hanci E, Sekir U, Gur H, Akova B. Eccentric training improves ankle evor and dorsiflexor strength and proprioception in functionally unstable ankles. *Am J Phys Med Rehabil.* 2016;95:448–458.
- Dekerle J, Barstow TJ, Regan L, Carter H. The critical power concept in all-out isokinetic exercise. *J Sci Med Sport.* 2014;17:640–644.
- Beyer R, Kongsgaard M, Hougs Kjær B, Øhlenschläger T, Kjær M, Magnusson SP. Heavy slow resistance versus eccentric training as treatment for achilles tendinopathy: a randomized controlled trial. *Am J Sports Med.* 2015;43:1704–1711.
- Chleboun G. Muscle structure and function. In: Levangie PK, Norkin CC, eds. *Joint Structure and Function*. 5th ed. Philadelphia, PA: FA Davis Company; 2011:108–137.
- Magee DJ, Zachazewski JE. Principles of stabilization training. In: Magee D, Zachazewski JE, Quillen WS, eds. *Scientific Foundations and Principles of Practice in Musculoskeletal Rehabilitation*. St. Louis, MO: WB Saunders; 2007:388–413.
- Tonkonogi M, Sahlin K. Physical exercise and mitochondrial function in human skeletal muscle. *Exerc Sport Sci Rev.* 2002;30:129–137.
- McMahon S, Jenkins D. Factors affecting the rate of phosphocreatine resynthesis following intense exercise. *Sports Med.* 2002;32:761–784.
- Bangsbo J. Muscle oxygen uptake in humans at onset and during intense exercise. *Acta Physiol Scand.* 2000;168:457–464.
- American College of Sports Medicine. *ACSM's Guidelines for Exercise Testing and Prescription*. 8th ed. Philadelphia, PA: Lippincott Williams & Wilkins; 2010.
- Junqueira LC, Carneiro J. Bone. In: Junqueira LC, Carneiro J, eds. *Basic Histology*. 10th ed. New York, NY: McGraw-Hill; 2003:141–159.
- Curwin S. Joint structure and function. In: Levangie PK, Norkin CC, eds. *Joint Structure and Function*. 5th ed. Philadelphia, PA: FA Davis Company; 2011:64–107.
- Huang L, Li M, Li H, Yang C, Cai X. Study of differential properties of fibrochondrocytes and hyaline chondrocytes in growing rabbits. *Br J Oral Maxillofac Surg.* 2015;53:187–193.
- Liang Y, Idrees E, Andrews SHJ, et al. Plasticity of human meniscus fibrochondrocytes: a study on effects of mitotic divisions and oxygen tension. *Sci Rep.* 2017;7(1):12148.
- Fox AJ, Bedi A, Rodeo SA. The basic science of human knee menisci: structure, composition, and function. *Sports Health.* 2012;4(4):340–351.
- Barreto G, Soliymani R, Baumann M, et al. Functional analysis of synovial fluid from osteoarthritic knee and carpometacarpal joints unravels different molecular profiles. *Rheumatology (Oxford)*. 2018.
- Hartjen N, Brauer L, Reiss B, et al. Evaluation of surfactant proteins A, B, C, and D in articular cartilage, synovial membrane and synovial fluid of healthy as well as patients with osteoarthritis and rheumatoid arthritis. *PLoS One.* 2018;13:e0203502.
- Necas D, Vrbka M, Krupka I, Hartl M. The effect of kinematic conditions and synovial fluid composition on the frictional behaviour of materials for artificial joints. *Materials (Basel)*. 2018;11(5):767.
- Huang LL, Chen YA, Zhuo ZY, et al. Medical applications of collagen and hyaluronan in regenerative medicine. *Adv Exp Med Biol.* 2018;1077:285–306.
- Marshall KW. Intra-articular hyaluronan therapy. *Curr Opin Rheumatol.* 2000;12:468–474.
- Namba RS, Shuster S, Tucker P, Stern R. Localization of hyaluronan in pseudocapsule from total hip arthroplasty. *Clin Orthop Relat Res.* 1999;363:158–162.
- Ward SR. Biomechanical applications to joint structure and function. In: Levangie PK, Norkin CC, eds. *Joint Structure and Function*. 5th ed. Philadelphia, PA: FA Davis Company; 2011:3–63.
- American Medical Association. In: Cocchiarella L, Andersson GBJ, eds. *Guides to the Evaluation of Permanent Impairment*. 5th ed. Chicago, IL: American Medical Association; 2001.
- Sara LK, Neumann DA. Basic structure and function of human joints. In: Neumann DA, ed. *Kinesiology of the Musculoskeletal System: Foundations for Physical Rehabilitation*. 3rd ed. St. Louis, MO: Mosby; 2016:28–46.
- Neumann DA. Getting started. In: Neumann DA, ed. *Kinesiology of the Musculoskeletal System: Foundations for Physical Rehabilitation*. 3rd ed. St. Louis, MO: Mosby; 2016:3–27.
- Blainey PR, Neumann DA. Biomechanical principles. In: Neumann DA, ed. *Kinesiology of the Musculoskeletal System: Foundations for Physical Rehabilitation*. 3rd ed. St. Louis, MO: Mosby; 2016:77–114. CLINICAL PEARL