CAPÍTULO 7

El Hueso: Tejido Dinámico, Adaptativo y Multifactorial

Bone: Dynamic, Adaptive, and Multifactorial Tissue

Pedro Antonio Calero Saa
Institución Universitaria Escuela Nacional del Deporte
https://orcid.org/0000-0002-9978-7944
pcalero22@gmail.com

Jennifer Jaramillo Losada
Universidad Santiago de Cali
https://orcid.org/0000-0003-4210-9947
jennifer.jaramillo01@usc.edu.co

Resumen

El documento "El Hueso: Tejido Dinámico, Adaptativo y Multifactorial" tiene como objetivo analizar la estructura, función y adaptación del tejido óseo en el cuerpo humano. Se exploran las características del hueso, diferenciando entre hueso cortical y esponjoso, y se discuten sus roles en el soporte, protección y producción de células sanguíneas.

La metodología utilizada incluye una revisión de la literatura científica sobre la biología del hueso, así como estudios sobre la respuesta del tejido a las cargas mecánicas y su remodelación a lo largo de la vida. Se examinan casos específicos, como la pérdida de masa ósea en astronautas debido a la microgravedad, para ilustrar cómo la falta de carga afecta la densidad ósea.

El capítulo indica que el hueso es un tejido altamente dinámico que se adapta a las exigencias mecánicas mediante la activación de osteoblastos y la reabsorción por osteoclastos, lo que permite mantener su integridad y

Cita este capítulo / *Cite this chapter*

Calero Saa PA, Jaramillo Losada J. El Hueso: Tejido Dinámico, Adaptativo y Multifactorial. En: Calero Saa PA, editor. *Elementos básicos de la rehabilitación deportiva: una mirada multidisciplinaria. Tomo I: fundamentos de la salud física y la actividad deportiva*. Cali, Colombia: Editorial Universidad Santiago de Cali; 2026. p. 257-293. https://doi.org/10.35985/9786287914155.7

funcionalidad. Se observa que el tamaño y la densidad de los huesos varían según la carga que soportan, siendo más robustos en áreas que experimentan mayor estrés mecánico.

Finalmente, se enfatiza la importancia de la actividad física y la gravedad en la salud ósea, así como las implicaciones de la pérdida de masa ósea en situaciones de inactividad. Se concluye que el hueso no solo proporciona soporte estructural, sino que también es un tejido adaptativo que responde a su entorno, lo que resalta su multifuncionalidad y relevancia en la fisiología humana.

Palabras clave: Hueso Esponjoso, Hueso Cortical, Fracturas Óseas, Parámetros de la Curación.

Abstract

The document "Bone: Dynamic, Adaptive, and Multifactorial Tissue" aims to analyze the structure, function, and adaptation of bone tissue in the human body. It explores the characteristics of bone, differentiating between cortical and trabecular bone, and discusses their roles in support, protection, and blood cell production. The methodology used includes a review of the scientific literature on bone biology, as well as studies on the tissue's response to mechanical loads and its remodeling throughout life. Specific cases, such as the loss of bone mass in astronauts due to microgravity, are examined to illustrate how the lack of load affects bone density. The chapter indicates that bone is a highly dynamic tissue that adapts to mechanical demands through the activation of osteoblasts and the resorption by osteoclasts, allowing it to maintain its integrity and functionality. It is observed that the size and density of bones vary according to the load they bear, being more robust in areas that experience greater mechanical stress. Finally, the importance of physical activity and gravity in bone health is emphasized, as well as the implications of bone mass loss in situations of inactivity. It concludes that bone not only provides structural support but is also an adaptive tissue that responds to its environment, highlighting its multifunctionality and relevance in human physiology.

Keywords: *Cancellous Bone, Cortical Bone, Fractures, Bone, Healing Parameters.*

Introducción

"La Virtud como el arte se consagran
constantemente a lo que es difícil de hacer,
y cuanto más dura la tarea más brillante es el éxito."

—Platón

El capítulo "El Hueso: Tejido Dinámico, Adaptativo y Multifactorial" establece el contexto fundamental para comprender la complejidad y la importancia del tejido óseo en el cuerpo humano. A lo largo de este capítulo, se explorará la estructura y función del hueso, destacando su papel esencial no solo como soporte físico, sino también como un tejido vivo que se adapta y responde a las demandas mecánicas del entorno.

El hueso es un componente vital del sistema esquelético, que se divide en dos partes principales: el esqueleto axial y el apendicular. Cada uno de estos componentes desempeña funciones específicas, desde la protección de órganos vitales hasta la facilitación del movimiento. En este capítulo, se abordarán las propiedades mecánicas del hueso, su capacidad de remodelación y los factores que influyen en su densidad y resistencia a lo largo de la vida.

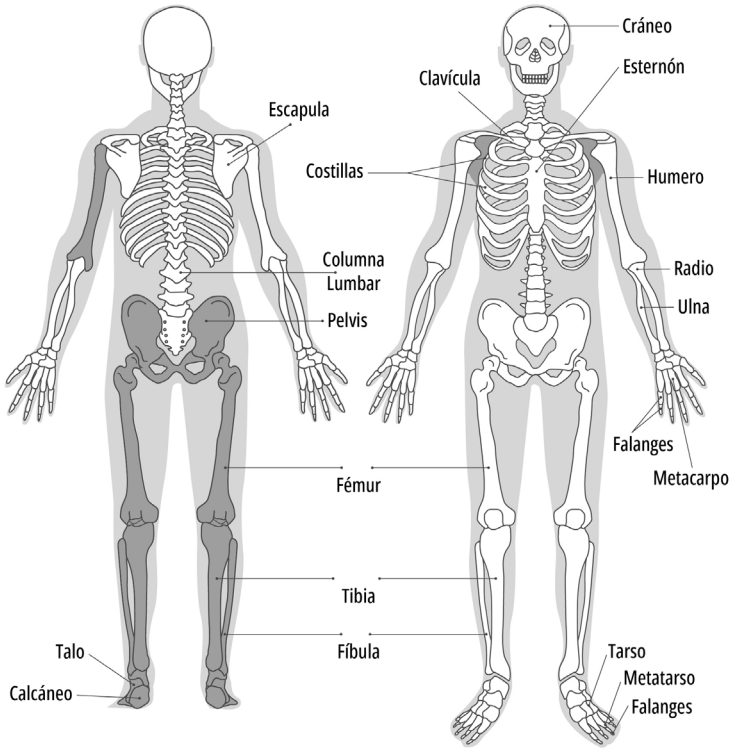
Además, se discutirá la relación entre la actividad física y la salud ósea, así como las consecuencias de la inactividad, como se observa en situaciones de microgravedad, que afectan a los astronautas. A través de una revisión de la literatura científica y la presentación de datos relevantes, este capítulo proporcionará una visión integral del hueso como un tejido multifactorial, enfatizando su adaptabilidad y su papel crucial en la salud y el bienestar general. El lector encontrará información valiosa que no solo enriquecerá su comprensión del tejido óseo, sino que también resaltará la importancia de mantener una salud ósea óptima a lo largo de la vida.

El Hueso

El Hueso está constituido por tejido óseo y constituye el 20% del peso corporal total. Este sistema se subdivide en esqueleto axial (pelvis, costillas, columna vertebral y cráneo) y apendicular (extremidades superiores e inferiores). Las funciones del sistema óseo se basan en el soporte general, el apalancamiento, la protección, el almacenamiento y formación de celular sanguíneas. El sistema óseo brinda un soporte estructural significativo, ayudando a mantener una postura mientras se adapta a fuerzas externas(1). El tamaño de los huesos

aumenta en dirección caudal en proporción a la cantidad de peso corporal que soporta, por lo tanto, los huesos de las extremidades inferiores, las vértebras lumbares y los huesos pélvicos son más grandes con relación a las otras partes del sistema óseo(2). Los huesos proporcionan lugares de inserción para los tendones, los músculos y ligamentos, lo que permite la producción de movimiento por medio de la aplicación de fuerza hacia los huesos. Proporciona la conformación de palancas y ejes de rotación por medio de los cuales el sistema muscular produce el movimiento(3).

Imagen 26. *Huesos principales del sistema óseo*

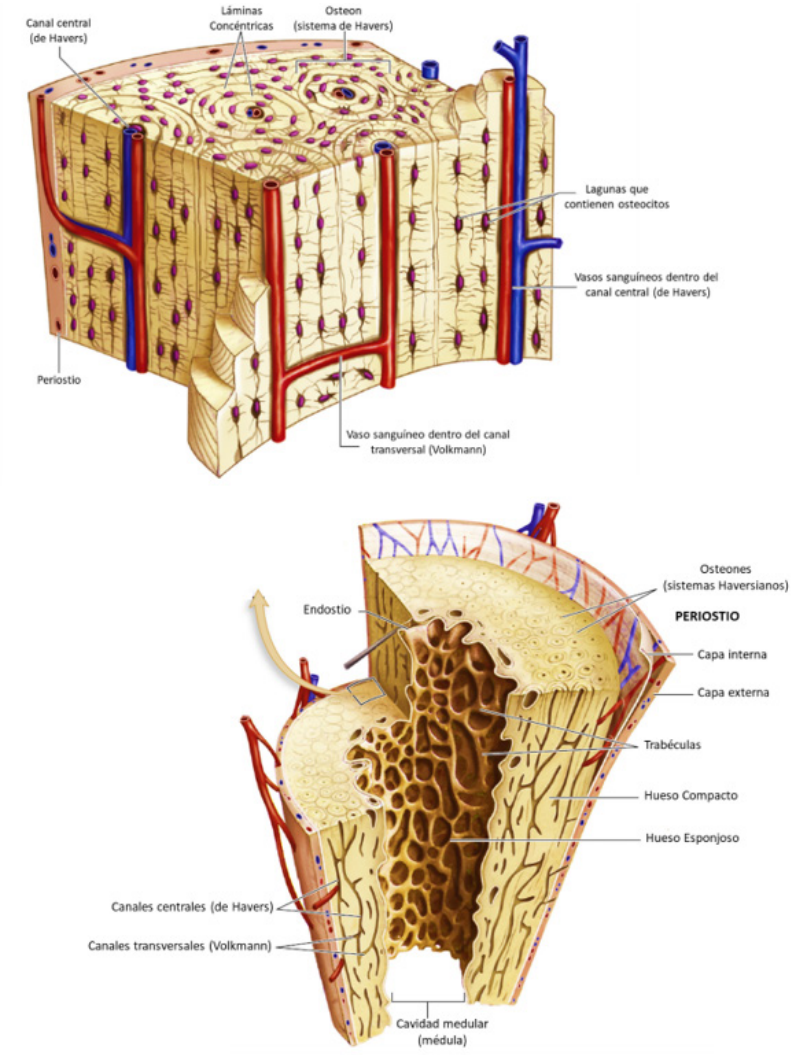


Anatomía Estructural del Hueso

El hueso es un tejido conectivo denso y duro que forma gran parte del esqueleto adulto. Se conforma adicionalmente de calcio y otros minerales. Existen dos tipos de hueso: el cortical y el esponjoso(4). El hueso cortical que se encuentra en los huesos largos proporciona soporte longitudinal y vertical para los sistemas de palanca, mientras que la región medular o interna es responsable de producir glóbulos rojos(2). El hueso cortical constituye el 80% del sistema óseo(5), esta

densamente organizado a lo largo de las líneas de fuerza en capas circunferenciales (Sistema de Havers). Los sistemas de Havers se organizan a lo largo de líneas de fuerzas para soportar mayores fuerzas de carga de peso, con áreas adicionales de densidad donde las inserciones musculares concentran las fuerzas. En los huesos planos como la pelvis y el esternón abunda el hueso esponjoso, el cual, no es tan resistente a fuerzas mayores(6). Como función de los huesos planos se encuentra la protección de órganos como el cerebro protegido por el cráneo, también brinda puntos de inserción para los músculos y ayuda absorber impactos(7).

Imagen 27. *Anatomía estructural del Hueso*



Fuente: Tomado y Modificado de Dunleavy(7)

Hueso Esponjoso

Posee espacios irregulares que lo hacen parece una esponja, lo que permite que el hueso sea más ligero y que proporcione una rigidez adecuada al hueso. Se encuentra principalmente en la epífisis de los huesos largos y en el centro de todos los demás clasificaciones de hueso. Se forma por una red de líneas y placas de tejido óseo que se denominan *Trabéculas* y, entre ellas existen espacios de hueso esponjoso. Estos espacios permiten la difusión de nutrientes provenientes de la vascularización sanguínea. En una observación superficial de las trabéculas, da la percepción de que estas estructuras están orientadas de forma desorganizada, sin embargo, en una observación más profunda, existe un patrón de disposición que permite afrontar o soportar las fuerzas de compresión que se producen al soportar el peso(8).

Hueso Compacto

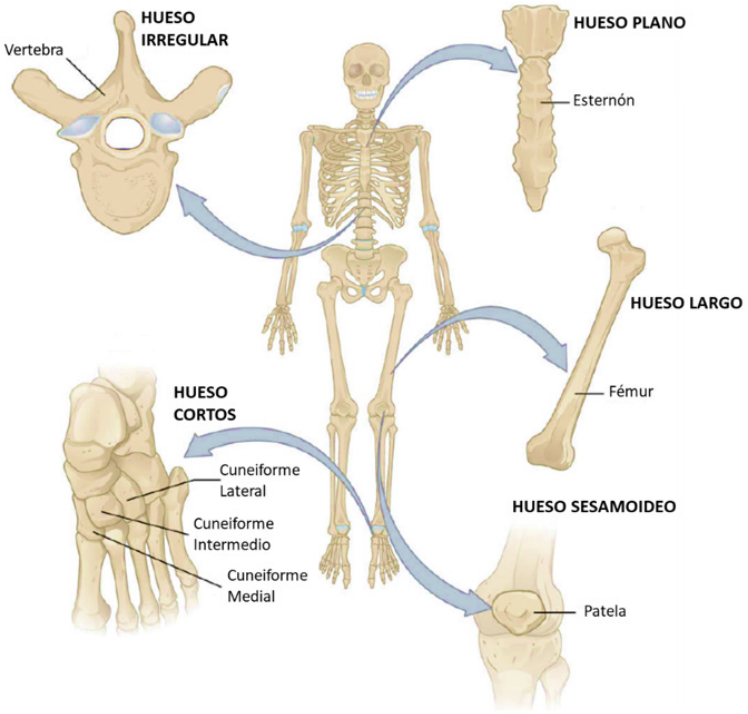
Contiene una disposición ósea muy ordenada y compacta. Se encuentra principalmente en la diáfisis de los huesos largos, lo que le proporciona al hueso rigidez y, reviste la superficie exterior de la epífisis de los hueso largos y la superficie exterior de las demás clasificaciones de los huesos. Internamente, se compone de unidades estructurales de forma cilíndrica denominadas *Osteonas*. Cada osteona se compone por un canal osteónico o de *Havers*, en el que se ubica un vaso sanguíneo. Los canales Perforantes o de *Volkmann*, conectan el vaso sanguíneo de un canal de Havers con vaso sanguíneo de un canal de Havers adyacente. Ante esta configuración, los osteocitos se instalan del canal de Havers en círculos concéntricos, lo que genera una forma cilíndrica del osteona. El hueso compacto está conformado por múltiples osteonas, lo que permite que los osteocitos se organicen cerca del suministro de sangre para obtener nutrientes por medio de la difusión de los vasos sanguíneos que se ubican dentro de los canales de Havers. Cada osteocito se ubica dentro de una cámara pequeña que se rodea por la matriz ósea llamada *Laguna*. Los *Canalículos* conectan las lagunas, donde los osteocitos envían pequeños procesos citoplasmáticos a través de estos canalículos para comunicarse con los osteocitos adyacentes en otras lagunas(8).

Clasificación de los Huesos

El sistema óseo, compuesto por 206 huesos, se subcategoriza en 5 categorías de acuerdo con su forma.

- ***Huesos Largos:*** Son huesos con forma cilíndrica, son más largos que anchos. Este tipo de huesos se encuentran en los miembros superiores (*Humero, Ulna y Radio*), los miembros inferiores (*Fémur, Tibia y Peroné*), manos (*metacarpianos, falanges*) y pies (*metatarsianos, falanges*). El tipo de hueso largo brindan función importante en las palancas, moviéndose a la contracción muscular(5, 2).
- ***Huesos Cortos:*** Son huesos con forma de cubo, aproximadamente igual en largo, ancho y grosor. Los huesos cortos se encuentran en las muñecas de las manos (carpianos) y en el pie (tarsos). Estos huesos se relacionan con la estabilidad, apoyo y movimiento limitado(9, 10).
- ***Huesos Planos:*** Este tipo de huesos se acerca a su definición, debido a que son delgados pero también curvos. Este tipo de huesos se encuentran en el cráneo, escapulas, esternón, pelvis y costillas. A menudo ayudan a proteger a los órganos y sirven como puntos de inserción de músculos(2).
- ***Huesos Irregulares:*** Estos huesos no tienen forma definida, por lo tanto, se clasifican como irregulares. Entre los huesos irregulares se encuentran las vértebras que protegen y sostienen las medula espinal, así como también se encuentran los huesos faciales(5).
- ***Huesos Sesamoideos:*** Es un hueso pequeño y redondo que tiene forma de semilla de sésamo. Se encuentran en los tendones donde su función se relaciona con la protección de la articulación al ayudar a disminuir las fuerzas de compresión. El hueso de la patela, catalogado como sesamoideo, es el único hueso común en todas las personas(9).

Imagen 28. *Clasificación General de los Huesos*



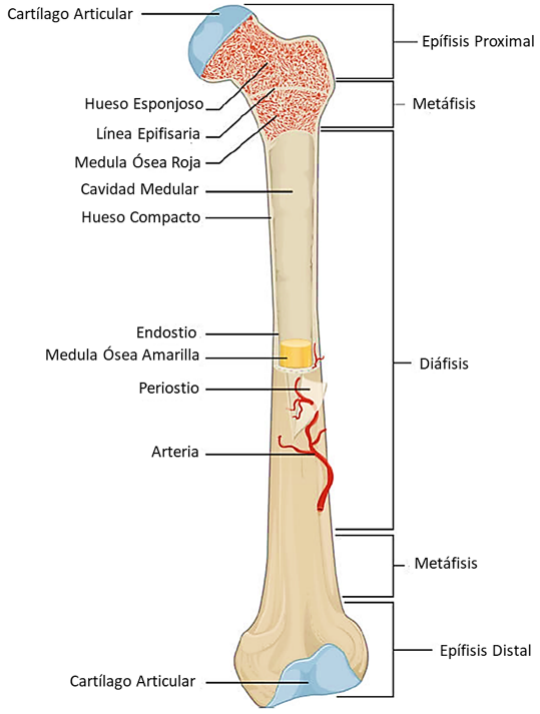
Fuente: Tomado y Modificado de Betts et al. (9)

Anatomía Macroscópica

La estructura de un hueso largo permite visualizar en su esplendor todas las partes del hueso. Un hueso consta de dos partes que son la *diáfisis* y *epífisis*. La diáfisis es el eje tubular que discurre entre los extremos proximal y distal del hueso(11). La *Cavidad Medular* es una región hueca que está llena de medula amarilla. Las paredes de la diáfisis se componen de hueso compacto denso y duro. Las zonas más anchas en cada extremo del hueso se denominan epífisis y se encuentra relleno de hueso esponjoso y este a su vez esta relleno de medula roja(11). Cada epífisis se une con la diáfisis por medio de la *metáfisis*, que es el área que contiene la placa de crecimiento (placa epifisiaria), consistente en cartílago hialino en un hueso en crecimiento. Este cartílago es reemplazado por tejido óseo hacia el final del crecimiento del humano que es aproximadamente entre los 18 y 21 años. La cavidad medular se reviste interno delicado llamado *endostio*, donde se da el metabolismo óseo como el crecimiento, la reparación y remodelación del hueso. El *Periostio* es una membrana fibrosa que recubre la

superficie exterior del hueso, el cual contiene vasos sanguíneos, nervios y vasos linfáticos que se encargan de nutrir el hueso compacto(2). El periostio cubre toda la superficie exterior con excepción donde la epífisis se relaciona con otro huesos para formar la articulación, la cual, es cubierto por cartílago articular.

Imagen 29. *Anatomía Macroscópica del hueso*



Fuente: Tomado y Modificado de Betts et al(9)

Biología Celular del Hueso

En el hueso se encuentran unas células llamadas *Osteoblastos* quienes son responsables de la formación de hueso. Los osteoblastos producen el principal componente del hueso que es el osteoide, compuesto por colágeno tipo I, siendo los responsables de la homeostasis ósea al permitir la formación ósea y la resorción la cual es realizada por los osteoclastos(12). Los *Osteocitos* constituyen el 90% del esqueleto maduro y se encargan del mantenimiento del hueso. Los *Osteoclastos* son responsables de la resorción ósea, la cual sucede en depresiones conocidas como lagunas de Howship y es más rápida que la formación ósea(5).

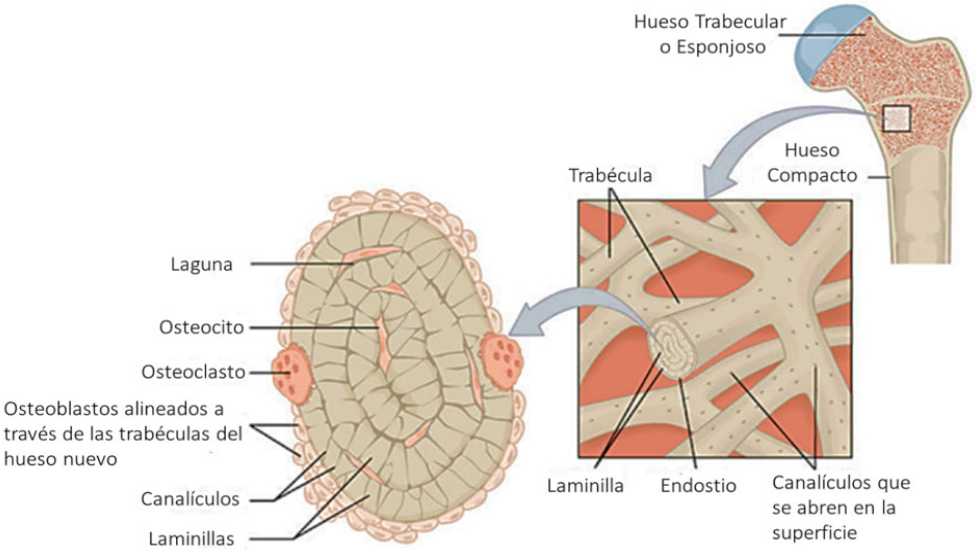
Los osteoclastos emergen de la línea celular de macrófagos/monocitos que se originan a partir de Células Madre Mesenquimales pluripotentes, reabsorben el hueso por medio de un proceso de remodelado en coordinación con los osteoblastos. Los condrocitos y los osteoblastos son los principales activistas en la curación del hueso ante una lesión. En el momento de una lesión, estas células llegan al sitio de la lesión a través del sistema vascular desde el periostio y el endostio, que son las principales capas del hueso. El periostio es la principal fuente de condrocitos, mientras que los osteoblastos emergen del periostio y el endostio. Los condrocitos producen proteínas de la Matriz Extracelular que incluyen proteoglicanos y el colágeno.

Tabla 26. *Células Oseas*

Célula	Función	Localización
Osteoblastos	Formación del Hueso	Porciones de hueso en crecimiento, incluidos el periostio y el endostio.
Osteocitos	Mantienen la concentración mineral de la matriz	La matriz ósea
Osteoclastos	Reabsorción del hueso	Superficies óseas y en sitios de hueso viejo, lesionado o innecesario

Fuente: Tomado y Modificado de Betts et al(9)

Imagen 30. *Estructura del Hueso Esponjoso*



Fuente: Tomado y Modificado de Betts et al(9)

Composición del Hueso

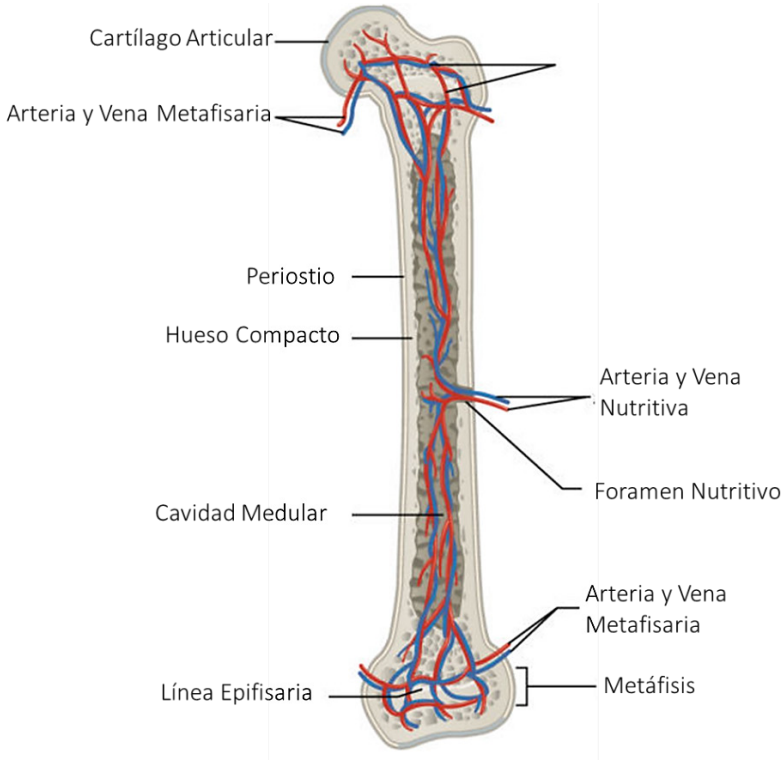
La matriz orgánica rígida de los huesos está compuesta por un depósito de cristales inorgánicos que constituyen el mineral del hueso más agua. Estos cristales inorgánicos son sales de calcio y fosfato, que se conoce como hidroxiapatita y su fórmula química es $Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$. En un hueso compacto normal, el 40% de su peso es de matriz orgánica, y un 60% de hueso mineral. La matriz ósea en su mayoría de composición es de colágeno, el cual, le brinda al hueso la gran elasticidad. El trabajo conjunto de fibras de colágeno y los cristales de hidroxiapatita, permite a los huesos soportar fuerzas de compresión mayores, acompañado de una gran elasticidad(1).

Como el hueso es un tejido vivo, este sufrirá cambios de manera continua, encontrando que se crea un nuevo sistema óseo cada siete años. En este sentido, encontramos que la densidad del hueso es de 1,9g/cm^3 y se mantiene de manera constante hasta el periodo de los 35-40 años, donde la masa ósea empieza a disminuir lentamente a un ritmo 1-2% anual. En momentos críticos de la disminución de la masa ósea, aparece la osteoporosis, haciendo al hueso más frágil(1).

Circulación Ósea

Los huesos reciben entre el 5% y el 10% del gasto cardiaco. Los huesos largos reciben sangre de la arteria nutricia, el sistema metafisario-epifisario y el sistema perióstico. La *Arteria Nutricia* ingresa por la diáfisis a través del agujero nutritivo para continuar a la cavidad medular. La arteria nutricia se ramifica en arterias ascendentes y descendentes que a su vez se ramifican en arteriolas que penetran en la corteza endóstica para irrigar los dos tercios internos de la corteza diafisaria madura a través de vasos que atraviesan el sistema de Havers. La circulación de la arteria nutricia es un sistema de alta presión. El *Sistema Metafisario-Epifisario* se deriva del plexo vascular periarticular y, es un sistema de baja presión. El *Sistema Perióstico* se compone principalmente por capilares que irrigan el tercio externo de la corteza diafisaria madura(5).

Imagen 31. *Circulación Ósea*



Fuente: Tomado y Modificado de Betts et al.(9)

Desarrollo, Formación y Crecimiento Óseo

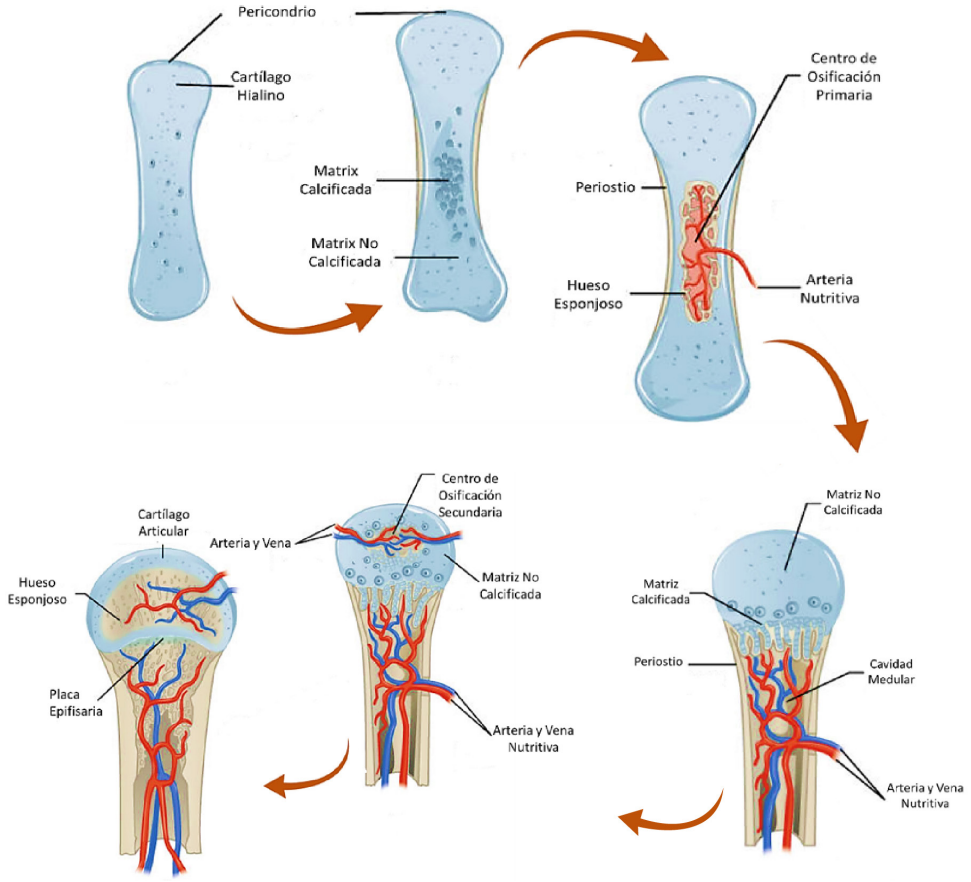
El hueso es formado a partir de la sustitución de un tejido preexistente. La *Osificación* es la formación del hueso por la actividad de los osteoclastos y osteoblastos. Los huesos largos ejercen su crecimiento desde el nacimiento mediante la actividad de las placas de crecimiento que se ubican entre la epífisis y la diáfisis. El *Modelado* sucede en el crecimiento para crear hueso nuevo a medida que la resorción y la formación ósea (Osificación) sobrevienen en diferentes lugares y velocidades para cambiar la forma y el tamaño del hueso(13). Las propiedades del hueso se relacionan con las demandas de tamaño asociadas con el crecimiento y con los cambios producidos por las fuerzas de tracción y compresión que actúan sobre el cuerpo. En la *Resorción* se descompone y se digiere el tejido óseo viejo. La resorción es un proceso que no sucede igualmente en todos los huesos del cuerpo; mientras la parte distal

se reemplaza cada 5 o 6 meses, la diáfisis lo hace en mucho más tiempo(5). Los osteoclastos cumplen su función de eliminación de hueso de manera rápida en aproximadamente 3 semanas, mientras que la formación de hueso por medio de los osteoblastos se demora unos 3 meses.

El tejido óseo es una estructura sensible a su entorno mecánico. Durante toda la vida el hueso se adapta constantemente a los estímulos mecánicos locales, agregando tejido en zonas donde existe mayor carga mecánica y elimina tejido donde no se soportan cargas significativas.

La mayoría de los huesos son endocondrales, es decir que se desarrollan a partir de cartílago hialino. Desde la formación del embrión, el cartílago hialino crece rápidamente hasta convertirse en estructuras con forma similar a los futuros huesos. Su crecimiento permanece simultáneamente con cambios importantes para convertirse en un hueso largo. Conforme las placas epifisiarias se encuentren abiertas, los huesos continuaran creciendo longitudinalmente. En la época de la adolescencia es cuando las placas epifisiarias inician su cierre y desaparición progresiva, donde los 18 años de edad es la época en donde se cierran la mayoría, sin embargo, algunas extienden su cierre hasta los 25 años. El diámetro aumenta durante toda la vida gracias a una capa interna de periostio que construye nuevas capas concéntricas sobre capas antiguas. El hueso nuevo se forma por osteoblastos, mientras que los osteoclastos reabsorben el hueso viejo. Esta remodelación constante es importante para el crecimiento óseo y que este tenga la capacidad de soportar las cargas y generar su reparación(14).

Imagen 32. *Formación Ósea*



Fuente: Tomado y Modificado de Betts et al. (9) & Floyd(14)

Propiedades Mecánicas del Hueso

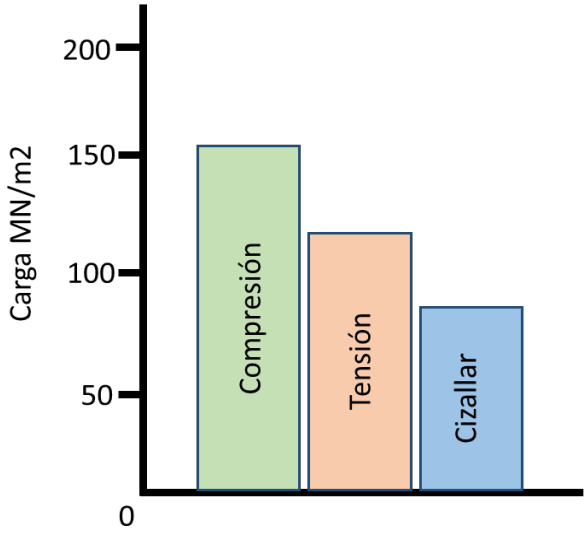
Las propiedades mecánicas del hueso varían de acuerdo con los factores propios del individuo. Adicionalmente, existen variaciones que tienen que ver con la orientación de la carga aplicada al hueso, la velocidad de aplicación y el tipo de carga. El tejido óseo debe tener la capacidad de tolerar una variedad de fuerzas impuestas de manera simultánea(15). Por ejemplo, en una posición sedente o de pie de un individuo, el hueso soporta la fuerza de gravedad, la masa del cuerpo que al interactuar con la gravedad se genera un peso y absorbe la tensión muscular generada en el mantenimiento de la postura. En una actividad dinámica, como el salto o la carrera, las fuerzas se aumentan significativamente y se vuelven multidireccionales(3).

Resistencia y Rigidez del Hueso

Al aplicar una fuerza externa aun hueso, se produce una reacción interna. Esto ocurre también en cualquier material. La resistencia se evalúa a través de la relación entre la carga impuesta (fuerza externa) y la cantidad de deformación (reacción interna) del hueso. El hueso debe ser rígido pero flexible y fuerte pero liviano, lo cual permite resistir la carga y permitir a su vez el movimiento(16). La flexibilidad del hueso es necesaria para la absorción de la fuerzas a las que se somete el tejido sobre todo las de alto impacto y, la elasticidad permite absorber energía cambiando de forma sin fallo y le permite volver a su estado normal(2). Si la fuerza o energía aplicada sobrepasa la capacidad del tejido (deformación elástica), descrito en la curva de tensión-deformación, se produce una deformación plástica, provocando microdaños en el tejido. Si la energía o fuerza aplicada supera la zona elástica y la plástica, la energía se libera en forma de fractura(4).

Resistencia: la resistencia del tejido óseo es definida por el punto de fallo o la carga soportada antes de la falla. Esa capacidad del hueso de poder soportar una carga depende de la masa ósea y una disposición de fibras de tal manera que resistan las cargas en diferentes direcciones(16). El fallo del hueso está relacionado con el tipo de carga aplicada, aunque no existe un valor de resistencia estandarizado, la falla ósea está implicado un evento traumático o un acumulo de microfracturas.

Figura 28. *Esfuerzo máximo para muestras de hueso cortical humano adulto*



Fuente: Tomado y Modificado de Nordin(17) citado por Hamell et al(3)

Rigidez: la rigidez o elasticidad está determinada por la curva de Tensión-Deformación de la carga, en el rango de respuesta elástica y es representativa a medida que la estructura se deforma. El metal es un material dúctil (*que puede moldearse o deformarse*) que tiene alta rigidez y ante cargas o tensiones aplicadas más allá de capacidad elástica, exhibe un comportamiento dúctil, sufriendo una deformación plástica antes del fallo, por otro lado, el vidrio es un material frágil, rígido pero que falla prematuramente y no posee una zona plástica. El hueso a diferencia de estos materiales no responde de manera lineal porque cede y se deforma de manera no uniforme durante la fase de carga. El hueso cuenta con una rigidez menor que el metal o el vidrio y se fractura después de muy poca deformación plástica(7).

Características Anisotrópicas: esto se refiere a que el comportamiento del hueso varia con la dirección de aplicación de la carga. Las diferencias entre las propiedades del hueso esponjoso y cortical contribuyen a la anisotropía del hueso. El hueso esponjoso brinda resistencia a la flexión y el hueso cortical resiste la compresión significativa. Aunque las propiedades de los huesos dependen de la dirección, el tejido óseo de los huesos largos logra soportar mayores cargas longitudinales (A) y menores cargas en las superficie del hueso (B). Los huesos largos soportan más cargas longitudinales debido a que habitualmente se cargan en esa dirección (3, 4).

Imagen 33. *Características Anisotrópicas del hueso con respecto a las direcciones de la carga*



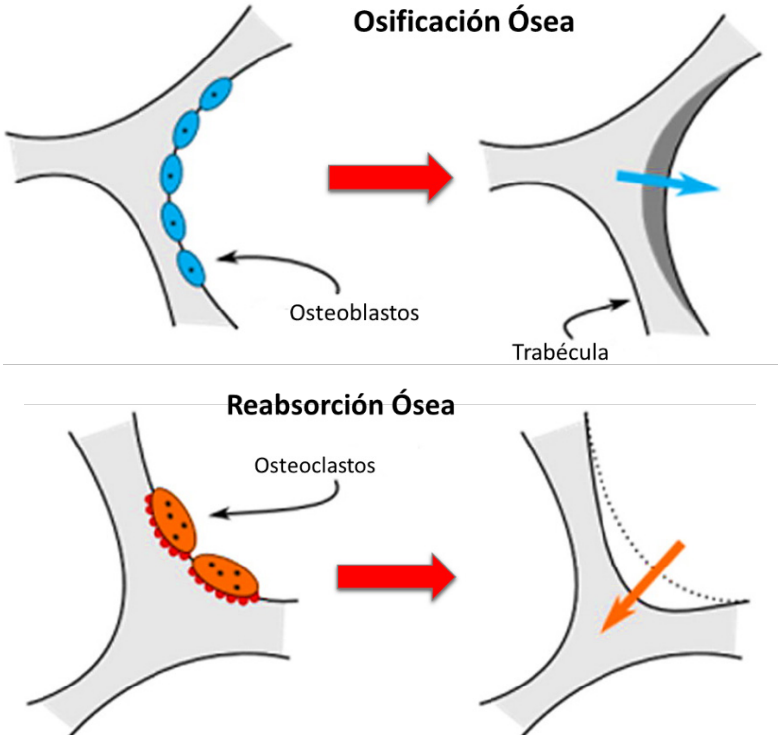
Fuente: Tomado y Modificado de Hamill et al(3)

Características Viscoelásticas: la respuesta del hueso con relación a su características viscoelástica, depende de la velocidad y duración de la carga. La rigidez y dureza del hueso aumenta al exponerse a cargas de altas velocidades, logrando absorber más energía antes de su ruptura. La capacidad flexible o dúctil del hueso es gracias al componente colágeno del hueso, el cual, le confiere la capacidad de soportar cargas de tracción; a su vez, el hueso también es frágil, característica que es daba por los componentes minerales del hueso, el cual, le permiten soportar cargas de compresión(3, 4).

Ley de Wolff

Julius Wolff (1839-1902), fue un anatomista y cirujano ortopédico alemán. La ley de Wolff establece que el hueso se deposita en áreas de alto estrés y se reabsorbe en áreas de bajo estrés(18). Según este principio, esta ley explica que el hueso responde al estrés sintetizando más hueso. Si la respuesta es excesiva se pueden generar espolones (*prominencia óseas*) u osteofitos(19). Adicionalmente, la propuso que el hueso esponjoso o trabecular en el fémur se adapta funcionalmente a los estímulos de carga mecánica externos, orientándose para alinearse con las principales trayectorias del estrés o carga(20). La ley de Wolff explica la perdida de hueso y su menor resistencia después de una descarga crónica, es decir, se disminuye la densidad ósea por falta de carga o soporte, lo que conlleva a que un individuo con densidad ósea disminuida debido a una lesión medular, tengan un mayor riesgo de fractura. Las actividades diarias, en donde los músculos son los generadores de movimiento, generan cargas sobre los huesos, teniendo en cuenta que estos de origina y se insertan en los huesos, esa tensión provocada por la actividad muscular es la que permite que los huesos respondan a la exigencia por medio de la activación de los osteoblastos para engrosar las trabéculas y mantener o mejorar la densidad ósea. En un caso no patológico de pérdida de masa ósea se encuentran los astronautas que, al no estar sometidos a gravedad, la cargas expuesta sobre los huesos disminuye esa respuesta, provocando una disminución de la resistencia de las trabéculas provocando así disminución de la densidad ósea.

Imagen 34. *Remodelación Ósea*



Fuente: Tomado y Modificado de Boyle & Kim(20)

Cargas Óseas

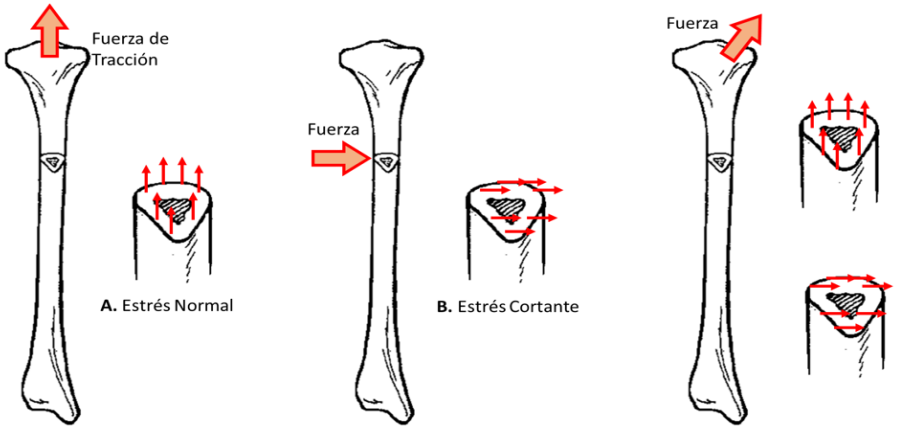
El tejido óseo vive un constante sometimiento a fuerzas que se aplican en diferentes direcciones. La masa corporal en conjunto con la gravedad produce el peso corporal, en adición a la fuerzas musculares al producirse el movimiento y las fuerzas externas. Las cargas fisiológicas producidas internamente por medio de las cargas aplicadas por las articulaciones con la interacción de los ligamentos y las inserciones tendinosas suelen estar por debajo del umbral de fractura. A nivel externo, el hueso puede adaptarse a diversidad de fuerzas provenientes del entorno que no tienen limite en magnitud o dirección(3, 16).

El sistema muscular influye sobre sobre la carga que soporta los huesos al alterar las fuerzas creando fuerzas de compresión y tracción. Las tensiones originadas desde los músculos pueden reducir las fuerzas de tracción o redistribuir las fuerzas sobre el hueso. Aunque los huesos pueden soportar mayores fuerzas de compresión, la cantidad total de carga puede aumentar gracias a los músculos.

Una inadecuada disposición muscular, donde su capacidad de producir tensión de manera normal se encuentra afectada por diferentes causas, la capacidad de los músculos para alivianar la carga sobre el hueso disminuye, llevando a un individuo o un deportista disminuir la capacidad de soportar cargas y ser más susceptible a lesiones(3).

Los huesos se someten constantemente a estrés y tensión por las fuerzas aplicadas, aspecto que resulta un componente fundamental para facilitar el depósito de material óseo. La tensión puede ser perpendicular al plano de una sección transversal del objeto sometido a tensión, lo que se denomina estrés normal; no obstante, si la carga es paralela al plano de la sección transversal, se denomina esfuerzo cortante.

Imagen 35. *Representación de la Carga Normal y Estrés Cortante: Estrés = Fuerza/Área*

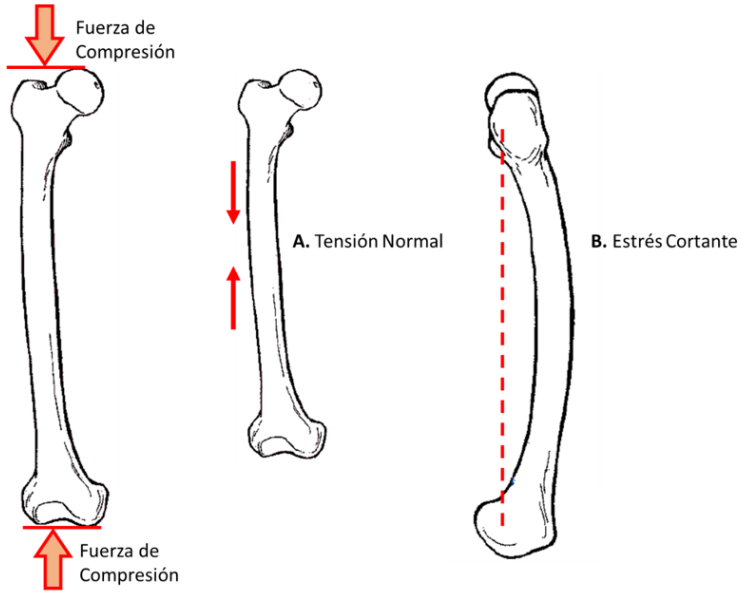


Fuente: Tomado y Modificado de Hamill et al. (3)

El fémur en el soporte de peso es un ejemplo claro de deformación normal y de deformación por cizallamiento como respuesta a dicho soporte. A modo de respuesta, el fémur se acorta debido a la tensión normal y se dobla anteriormente debido a la tensión cortante generada por el peso corporal (3). Durante las actividades normales, el hueso cortical puede soportar cargas dentro de la región lineal de la curva tensión-deformación, permitiendo que se doble el hueso sin sufrir una deformación permanente, lo que se denomina *deformación elástica*. No obstante, cuando se mantiene dentro de la región lineal, si las cargas continúan trabajando repetidamente en un corto periodo, se pueden generar microfisuras(29) por la *deformación plástica*. Esto

es importante tenerlo en cuenta, debido a que las fuerzas de compresión acortan el hueso y las fuerzas de tracción lo alargan, siendo más fuerte para soportar la compresión pero se vuelve más débil hacia la tensión(13, 21). Cuando las cargas exceden la región lineal, se pueden generar daños en el hueso, debido a la naturaleza anisotrópica del hueso esponjoso o trabecular, su comportamiento mecánico difiere en diferentes direcciones o entre varias secciones de su estructura(13).

Imagen 36. *Representación de la Carga Normal y Estrés Cortante: Estrés = Fuerza/Área*



Fuente: Tomado y Modificado de Hamill at al(3)

A continuación se explicarán las cinco fuerzas que aplican cargas al hueso:

Compresión

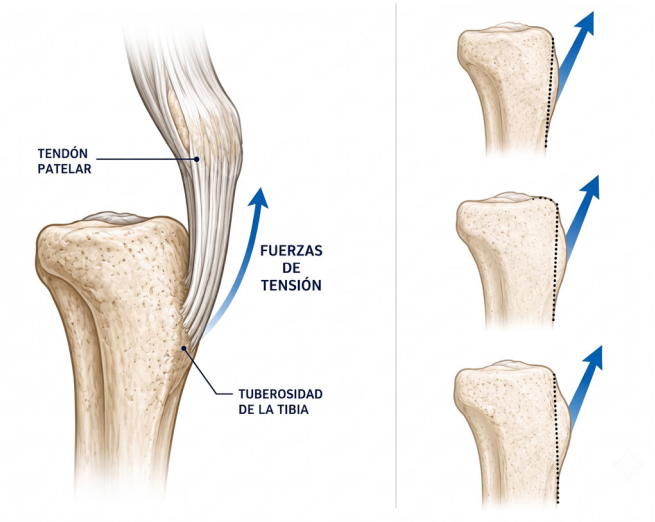
Para el desarrollo y crecimiento óseo, es necesario que el tejido ósea se someta a cargas de compresión. El fémur, el hueso más largo del cuerpo humano soporta gran parte del peso corporal y su rigidez evita la compresión al cargarse. Las cargas que actúan sobre el fémur tienen una medida en un rango de 1,8 a 2,7 del peso corporal en posición bípeda. La aplicación de una fuerza de compresión que supera los niveles de tensión de la estructura se produce

una fractura. Estas fuerzas de compresión generan dolor rotuliano, lo que a su vez genera un reblandecimiento y posterior destrucción del cartílago patelar. Las fuerzas de compresión patelo-femoral aumentan y disminuyen durante el recorrido patelar por el surco femoral, logrando un pico máximo de compresión hacia los 50° de flexión y un mínimo en la extensión completa. Las fuerzas de compresión son generadoras de fracturas vertebrales. Algunos deportes de contacto generan ocasiones de colisión que provocan fuerzas de compresión desde la parte superior de la cabeza, provocando que las vértebras cervicales se carguen en el recorrido de la columna cervical ocasionando luxación o luxo-fractura de las facetas vertebrales(3). El hueso responde a las cargas que se le imponen tal como lo describe la Ley De Wolff. La tibia y el fémur intervienen en el soporte de carga del peso corporal en los miembros inferiores y son soportan mejor las fuerzas de compresión. El peroné no participa de manera significativa en el soporte de peso, no obstante, es un hueso de orígenes musculares y es capaz de soportar mejor las fuerzas de tracción o tensión.

Tensión

Al producir el musculo tensión, provoca una transmisión de fuerza al hueso por medio del tendón. El colágeno del hueso que se encuentra en el lugar de la inserción musculo activo, se orienta en dirección a la fuerza de tracción del tendón. Estas fuerzas de tensión o tracción forman las tuberosidades óseas, a medida que la fuerza de tensión aumenta, la tuberosidad ósea aumenta. Con estímulos crónicos se da origen a patologías como inflamación de la tuberosidad o fallas del hueso que pueden provocar avulsiones en el sitio de la inserción del tendón. Una avulsión se da cuando se arranca una porción de hueso en la inserción de un tendón o un ligamento. La tuberosidad de la tibia se expone constantemente a fuerzas de tracción cuando el grupo muscular cuádriceps se activa. Si la fuerza de tensión tiene suficiente magnitud y duración, se puede originar una tendinopatía o un procesos inflamatorio en la tuberosidad tibial denominada enfermedad de Osgood-Schaltter, que se caracteriza por formación de depósitos óseos en la unión del tendón con el hueso(3).

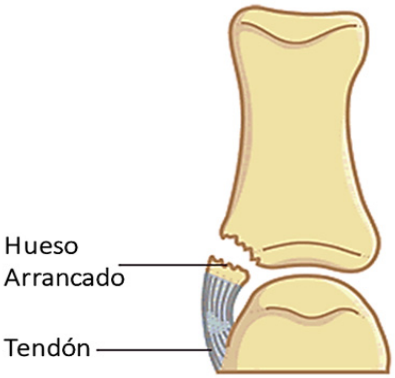
Imagen 37. *Representación de la Fuerza de Tensión*



Fuente: Tomado y Modificado de Hamill at al(3)Imagen mejorada digitalmente utilizando [ChatGpt].

Las fuerzas de tensión provocan un fortalecimiento del hueso en dirección a las fuerzas aplicadas donde las fibras de colágeno se alinean de acuerdo con la dirección de tracción del tendón según este caso. Con el tiempo, estas fuerzas de tracción son las causantes del desarrollo de crecimientos óseos.

Imagen 38. *Representación de una avulsión ósea*



Fuente: Tomado y Modificado de Ankle, Foot & Orthotic Center(22)

Cizallamiento

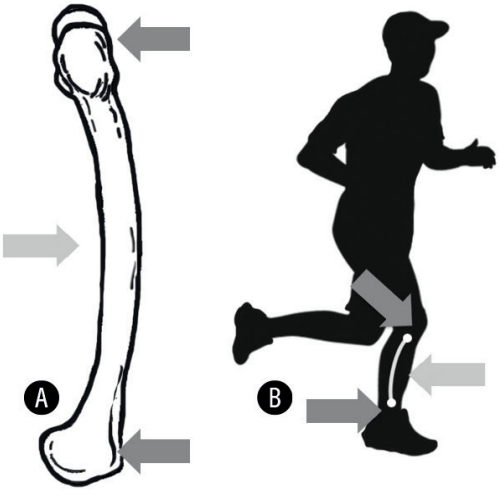
Las fuerzas de cizallamiento o de corte son responsables de algunas patologías de las vértebras como la espondilolistesis. A nivel de la columna lumbar, las fuerzas de cizallamiento aumentan al aumentar la lordosis. Sobre la meseta tibial y los cóndilos femorales se producen fracturas por hiperextensión. Este mecanismo también puede generar una lesión de ligamentos colaterales o del cruzado anterior. La aplicación de fuerzas de compresión, tracción y cizallamiento aplicadas de manera simultánea ayudan a generar resistencia ósea(3).

Fuerzas en Flexión

Durante la marcha los huesos de los miembros inferiores se someten a fuerzas de flexión que son el producto de las fuerzas alternas de tensión y compresión. Durante una postura en bipedestación el fémur se dobla en anterior y lateral debido a su forma, mientras que la tibia se dobla anterior. Cuando las fuerzas exceden la capacidad del hueso, este se rompe o se fractura en el lado convexo en respuesta a las fuerzas de tracción, debido a que como se mencionó anteriormente, el hueso resiste más las fuerzas de compresión que las de tracción.

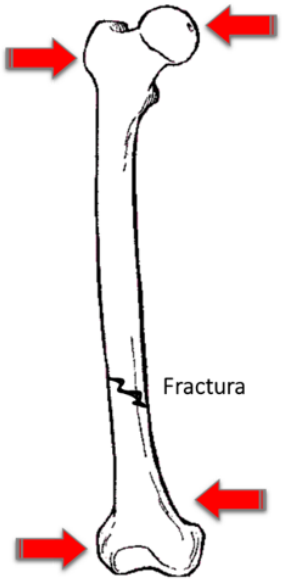
Las fuerzas que resultan en una flexión del hueso que provocan lesiones son provocadas por diversas fuerzas aplicadas en diferentes zonas del hueso, denominadas aplicaciones de fuerza en tres o cuatro puntos(3, 23). Corrientemente se aplica una fuerza perpendicular al hueso en los extremos del hueso y una fuerza en dirección opuesta en algún punto entre las otras dos fuerzas. El hueso fluctuara sobre la zona de aplicación de la fuerza media. Imagínese que un deportista se encuentre realizando un trote o sprint, en el que su pie tropiece con un obstáculo en el piso. De acuerdo con la velocidad que lleva o impulso, la tibia sufrirá en sus extremos una fuerza perpendicular superior producto del peso e impulso del cuerpo y otra inferior debido al impulso que lleva el pie. Adicionalmente existe una fuerza media entre estas dos fuerzas de los extremos que generara una deformación en flexión de la tibia. Este es un ejemplo de una aplicación de fuerzas en tres puntos.

Imagen 39. *Representación de las fuerzas de flexión en fémur y tibia*



Para una carga en flexión de cuatro puntos, se debe aplicar dos pares de fuerzas igual y opuestas en cada extremo del segmento óseo. En este ejemplo, el hueso se romperá en el punto más débil.

Imagen 40. *Fuerzas de flexión de cuatro puntos*

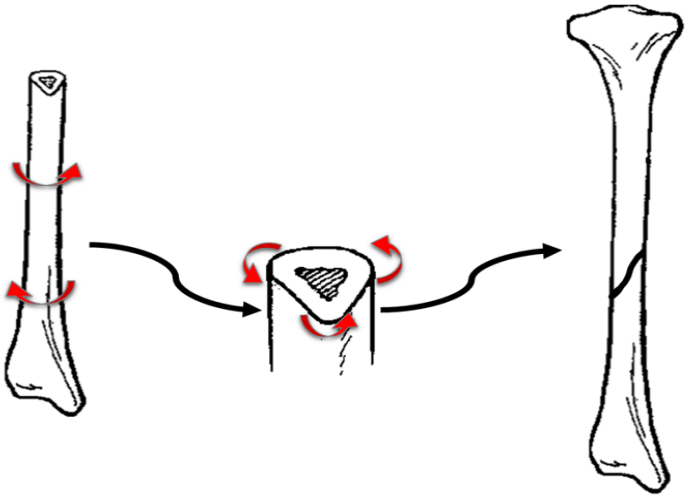


Fuente: Tomado y Modificado de Hamill at al(3)

Torsión

Las fracturas originadas por fuerzas de torsión se denominan fracturas oblicuas. Un ejemplo de este tipo de fractura se da cuando el pie queda plantado en el terreno de juego y el cuerpo gira en cualquier dirección(3).

Imagen 41. *Representación de las fuerzas de torsión en la tibia*

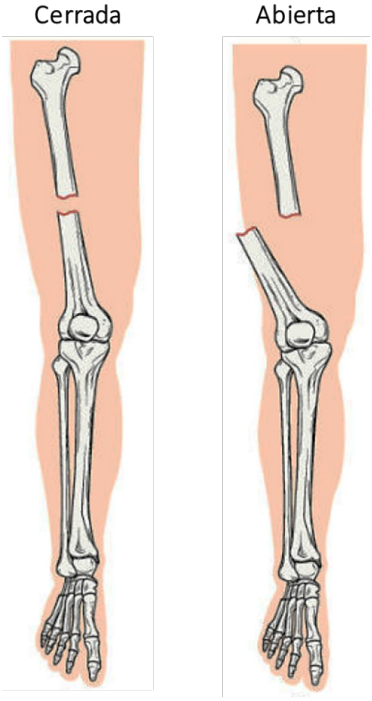


Fracturas

Las fracturas óseas tienen una incidencia muy alta en los últimos 30 años, aumentando por años >30%, con 178 millones de casos a nivel mundial(24). Cuando se aplica una tensión excesiva al hueso pueden aparecer grietas o roturas que provocan una fractura. Una fractura se produce cuando la tensión que se ejerce sobre el tejido óseo logra deformarlo más allá de su límite elástico y el hueso se rompe(25). La fractura implica una alteración o ruptura o perdida de la continuidad del tejido óseo y una alteración de los tejidos blandos adyacentes. Esto se da cuando la integridad del hueso se compromete. Las fracturas se pueden clasificar según varias bases(26):

- **Etiología:** Se clasifican en *traumáticas (ocurren debido a fuerzas o lesiones externas)* o *patológicas (se asocian con enfermedades o afecciones subyacentes que debilitan el hueso)*(26).
- **Relación con el Sector Externo:** Se dividen en *Cerradas (es una rotura del hueso donde la piel permanece intacta)* y *Abiertas (es una rotura de un hueso con daño de la piel y exposición del hueso al ambiente externo)*(26).

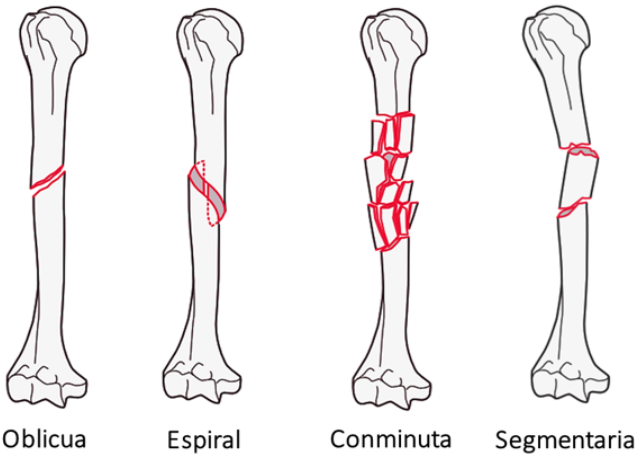
Imagen 42. *Representación de las fracturas abiertas y cerradas*



Fuente: Tomado y Modificado de Betts et al(9)

- **Desplazamiento de la Fractura:** Se clasifican en No *Desplazadas (estas se caracterizan por que los fragmentos óseos permanecen en su alineación original)* o *Desplazadas (estas implican una desalineación o desplazamiento significativo de los fragmentos óseos)*(26).
- **El Patrón de la Fractura:** Las fracturas presentan patrones concretos: *Transversal (fractura recta a través del hueso)*, *Oblicua (fractura en ángulo)*, *Espiral (fractura torcida a lo largo del hueso)*, *Conminuta (fractura de múltiples fragmentos de hueso)*, *Segmentaria (dos o más fracturas separadas en el mismo hueso)* o combinaciones de los diferentes patrones(26).

Imagen 43. *Representación según el Patrón de las fractura*



Fuente: Tomado y Modificado de Meinberg et al(27)

- ***Complejidad:*** Se clasifican en *Simples (son aquellas con una única rotura del hueso con un daño mínimo a los tejidos adyacentes)* o *Complejas (implican factores adicionales como daños extensos a los huesos y tejidos blandos o múltiples fracturas en el mismo hueso)*(26).

Imagen 44. *Representación de la complejidad de la fractura*

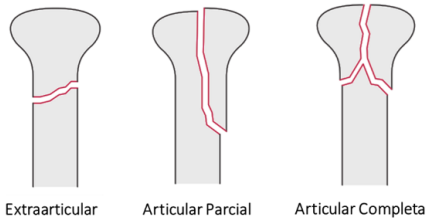
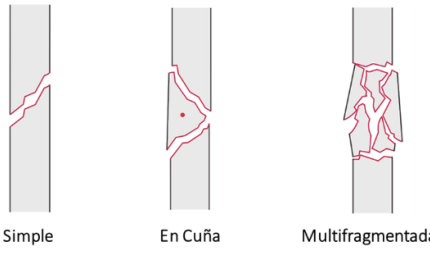
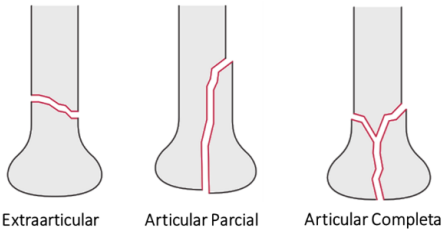


Fuente: Tomado y Modificado de Meinberg et al(27)

Clasificación de Fracturas

La Asociación de Trauma Ortopédico (OTA) desarrollo la clasificación de las fracturas abiertas para abordar las limitaciones de la clasificación de Gustilo-Anderson. Esta clasificación se diseñó para utilizarse en el momento del desbridamiento inicial en la cirugía. Es una clasificación genérica, se puede utilizar en todas las áreas anatómicas y se centra en los factores relacionados con la lesión y no con el tratamiento.

Tabla 27. *Clasificación de las Fracturas según* AO/OTA

Localización	Tipo	Descripción
1 Proximal		**Extraarticular:** Tipo A, cuando la fractura no afecta la superficie articular. **Articular Parcial:** Tipo B, cuando la fractura afecta una parte de la superficie articular mientras el resto de la articulación permanece unida a la metáfisis y la diáfisis.
2 Diafisario		**Articular Completa:** Tipo C, cuando la fractura ha roto la superficie articular, la cual queda completamente separada de la diáfisis. **Simple:** Tipo A, fractura con fractura única circunferencial.
3 Distal		**En Cuña:** Tipo B, fractura con uno o más fragmentos intermedios. Después de la reducción hay cierto contacto cortical entre los principales fragmentos proximales y distales. **Multifragmentaria:** Tipo C, con uno o más fragmentos intermedios. Después de la reducción no hay contacto entre los principales fragmentos proximales y distales.

Fuente: Tomado y Modificado de Kondi & Gowda(26)

Tabla 28. *Clasificación* OTA *de fracturas abiertas* (OTA-OFC)

Piel	1. Laceración con bordes que se aproximan. 2. Laceración con bordes que no se aproximan. 3. Laceración asociada con desguace extenso.
Musculo	1. No hay necrosis muscular apreciable, alguna lesión muscular con función muscular intacta. 2. Pérdida de músculo pero el músculo permanece funcional, alguna necrosis localizada en la zona de la lesión que requiere escisión, unidad músculo-tendinosa intacta. 3. Músculo muerto, pérdida de función muscular, escisión compartimental parcial o completa, rotura completa de una unidad músculo-tendinosa, defecto muscular que no se aproxima.
Arteria	1. Sin perturbaciones importantes en los vasos. 2. Lesión del vaso sin isquemia distal. 3. Lesión del vaso con isquemia distal.
Contaminación	1. Contaminación nula o mínima. 2. Contaminación de la superficie (no limpia). 3. Contaminante incrustado en huesos o tejidos blandos profundos o condiciones ambientales de alto riesgo (p. ej. heces, agua sucia).
Perdida de Hueso	1. Ninguno. 2. Faltan huesos o fragmentos óseos desvascularizados, pero todavía hay cierto contacto entre los fragmentos proximales y distales. 3. Pérdida ósea segmentaria.

Fuente: *Tomado y Modificado de Meinberg et al*(27)

Curación del Hueso

La comprensión de los tipos de fractura y sus mecanismos nos ayuda a entender cuál va a ser el proceso de curación. La capacidad que tiene los huesos para curarse posterior a una fractura o lesión destaca el potencial regenerativo del cuerpo humano(26).

El tejido óseo es una constitución de células incrustadas en una matriz organiza mineralizada(25) y, se diferencia de otros tejidos por su gran capacidad de reparación sin presencia de cicatriz(28). Estas células son los osteoblastos, los osteoclastos y los osteocitos maduros. Como se mencionó anteriormente, los osteoblastos y los osteocitos son responsables de la formación y mineralización de los huesos, mientras que los osteoclastos hacen parte en la resorción ósea. Esta matriz mineralizada ofrece al tejido óseo propiedades mecánicas y se forma de componentes orgánicos e inorgánicos. El 90% se constituye de Colágeno Tipo I, lo que proporciona resistencia al tracción, adicionalmente

están los proteoglicanos que brindan resistencia a la compresión, las proteínas de la matriz como la osteocalcina, osteonectina y osteopontina, ofrecen la mineralización y la formación ósea, y por último, se cuenta con citoquinas y factores de crecimiento que ayudan a la diferenciación, activación, crecimiento y recambio de células óseas(25). Los componentes inorgánicos se forman por hidroxiapatita cálcica, la cual proporciona resistencia a la compresión(25).

La curación de una fractura depende del suministro de sangre, la cantidad de fuerza que ocasiono la fractura y el estado de los tejidos blandos(28, 25). Inicialmente en una fractura se da un alteración de los sistemas de Havers y hay necrosis de los osteocitos. El grado de conminución, el desplazamiento de la fractura, la interrupción del suministro de sangre y el grado de desprendimiento del periostio determinan el grado de muerte celular, es decir, entre más grande es el daño óseo y los tejidos adyacentes, más demorada será la curación del hueso(28).

Imagen 45. *Fases de la Curación Ósea*



Fuente: Tomado y Modificado de Betts et al (9)

La curación del hueso se da por dos vías biológicas diferenciadas:

- ***Curación Primaria o Directa por Remodelación Interna:*** en este tipo de curación, los fragmentos del hueso fracturado se reúnen mediante compresión y poseen un entorno rígidamente estable, donde eliminan la formación de un callo. Esto se da debido a que los extremos de la fractura deben se alinean de manera ideal y se fijan sin espacios. No obstante, este es el resultado deseado posterior a un proceso de reducción quirúrgica abierta o de fijación interna. En este sentido, la curación ósea directa puede llevar un tiempo estimado de meses o años (26).

- ***Curación Secundaria o Indirecta de la Fractura:*** esta es la forma más común de curación ósea y abarca dos procesos distintos: Curación Ósea Endocondral e Intramembranosa. Es un tipo de curación presente en tratamientos no quirúrgicos y las intervenciones quirúrgicas que involucran movimiento controlado en el sitio de la lesión que son aquellas que cuentan con la participación de clavos intramedulares, fijación externa, osteosíntesis percutánea mínimamente invasiva y fijación interna por fractura conminuta(25). El tipo de curación Indirecta involucra una series de eventos celulares y moleculares complejos que incluyen el reclutamiento y diferenciación de varios tipos de células, la liberación de moléculas de señalización y la formación de una matriz provisional(28). En este tipo de curación se forma un callo blando que se forma por tejido fibroso, cartílago y una red de vasos sanguíneos. Con el tiempo el callo blando se remodela y se transforma en tejido óseo nuevo(26). El proceso de curación Secundaria o Indirecta se da por medio de tres fases sobrepuestas que son:

  - **Reacción Inflamatoria Aguda o Fase Reactiva:** La respuesta inicial a una fractura es la formación de un hematoma debido a que los vasos sanguíneos se rompen, lo que provoca un acumulo de sangre localizado. La presencia del hematoma desencadena la respuesta inflamatoria , el cual, dispone el sitio de la lesión para que se den procesos de curación posteriores. La primeras 24 horas posteriores a la fractura, la respuesta inflamatoria alcanza su punto máximo y desaparece aproximadamente a los 7 días. En esta fase, el sitio de la lesión es invadido por células inmunes como son los neutrófilos y macrófagos, las cuales, liberan diversas moléculas de señalización (moléculas responsables de transmitir información entre las células del cuerpo) como las citoquinas y los factores de crecimiento, factores de necrosis tumoral (TNF-α), interleucina -1, IL-6, IL-11 e IL-18, lo que ayuda a mantener y promover el crecimiento de los vasos sanguíneos y el reclutamiento de vasos sanguíneos mesenquimales, células madre que dirigen las fases posteriores de curación(25). El hueso puede regenerarse solo si se logra reclutar determinadas células madre mesenquimales, las cuales pueden autorreplicarse y diferenciarse y contribuir a la regeneración de diversos tejidos como hueso, cartílago, ligamento, tendón, musculo y tejido adiposo. Estas células inician la respuesta curativa, responden al entorno inflamatorio, ejercen efectos inmunomoduladores, interactúan con macrófagos y otras células inflamatorias para promover la angiogénesis (formación de nuevos vasos sanguíneos a partir de

otros ya existentes), la osteogénesis y la remodelación en el sitio de la fractura donde, finalmente, mejoran el soporte de peso en el sitio de la fractura mediante la formación de callo blando que conduce posteriormente a la formación de hueso secundario(26).

- **Fase Reparadora o Remodelación Ósea**

  Formación de Callos: Un callo cartilaginoso une el sitio de la fractura en 2 semanas. Si los extremos del hueso no tienen contacto entre sí, se formará un callo puente. El Colágeno tipo II se produce en la curación de la fractura dentro de la matriz del cartílago y es seguido por la expresión del Colágeno tipo I como hueso nuevo. Los micromovimientos (1 mm aprox.) estimulan el crecimiento del cartílago y del hueso. Conforme el callo aumenta de tamaño, se vuelve más rígido, promoviendo así la osteogénesis. La cantidad de callo formado es inversamente proporcional a la estabilidad de la fractura, no obstante, las fracturas que son extremadamente inestables no logran unirse debido a que la tensión continúa siendo muy grande y así, la osificación falla y solo puede ocurrir una unión fibrosa(28).

  Tejido Óseo: En la Osificación endocondral se da la mineralización del callo cartilaginoso y es evidente en el seguimiento radiográfico. Este hueso se forma cuando la tensión cae por debajo del 1%. Aquí los condrocitos de la matriz cartilaginosa se hipertrofian, se calcifican y mueren, dando paso a la angiogénesis. Los osteoblastos depositan tejido óseo sobre la estructura de colágeno dejada por los condrocitos. Los micromovimientos promueven el crecimiento del callo(28).

- **Fase de Remodelación Ósea:** Esta fase es crítica en el proceso de curación al generarse callo duro. Este callo brinda estabilidad, sin embargo, aún no posee las características del hueso normal. Durante esta fase, el callo duro se transforma en una estructura ósea laminar con una cavidad medular central. Esto implica una reabsorción del callo duro por parte de los osteoclastos y el depósito del hueso laminar por parte de los osteoblastos. La remodelación inicia hacia la tercera o cuarta semana posterior a la fractura, no obstante, puede pasar años hasta que se complete el proceso de curación. Progresivamente se va depositando hueso adicional en las áreas de tensión mecánica y se retira de las áreas donde hay muy poco. Esta remodelación se conoce como la Ley de Wolff (26, 25).

Tabla 29. *Fases de la Curación Ósea*

	Fase Inflamatoria	**Fase Reparativa**	**Fase de Remodelación**
Hallazgos	• Hematoma inflamatorio y granulación temprana. • Actividad osteoclástica para eliminar restos y hematomas. • Los vasos sanguíneos comienzan a crecer en el área.	• Unión • El callo blando es producido por fibroblastos; Crecimiento óseo perióstico para proporcionar callos puente. • El hueso tejido temprano se deposita entre fragmentos.	• Consolidación y remodelación una vez estable mecánicamente • Formación y alineación del hueso laminar. • Reabsorción de callo extra • Actividad osteoblástica y osteoclástica. • Se remodela el canal medular
Porcentaje aproximado del ciclo completo	10%	20-40%	50-70%
Tiempo	Días	Semanas a Meses	Años
Tiempos	0-14 días	10 días – 24 Semanas	12 – 48 Semanas
Hueso Esponjoso	0-7 días	5 días – 8 Semanas	6 – 12 Semanas
Hueso Cortical			

Fuente: Tomado y Modificado de Dunleavy(7)

Conclusiones

El capítulo "El Hueso: Tejido Dinámico, Adaptativo y Multifactorial" proporciona información esencial que resulta particularmente relevante para el fisioterapeuta deportivo y el equipo multidisciplinario involucrado en los procesos de rehabilitación deportiva. En primer lugar, se destaca la adaptabilidad del tejido óseo, que responde de manera activa a las cargas mecánicas. Para el fisioterapeuta, esto implica la necesidad de diseñar programas de rehabilitación que incluyan ejercicios específicos que estimulen la actividad de los osteoblastos, promoviendo así la formación y mineralización del hueso. La incorporación de ejercicios de resistencia y carga progresiva se vuelve crucial para facilitar la recuperación y prevenir futuras lesiones.

Además, se subraya la importancia de la carga mecánica en el mantenimiento de la densidad ósea y la integridad estructural del hueso. El fisioterapeuta

debe ser consciente de que la falta de carga, como ocurre en situaciones de inmovilización o inactividad, puede llevar a la pérdida de masa ósea. Por lo tanto, es fundamental implementar estrategias que permitan a los atletas realizar actividades que simulen cargas mecánicas, incluso en las etapas iniciales de la rehabilitación.

Otro aspecto relevante es la prevención de lesiones. Comprender la relación entre la carga, la densidad ósea y el riesgo de fracturas es vital para el fisioterapeuta. Este profesional debe trabajar en la educación del atleta sobre la importancia de mantener una actividad física regular y fortalecer el tejido óseo, así como identificar factores de riesgo que puedan predisponer a lesiones.

La rehabilitación deportiva debe ser un esfuerzo colaborativo. La comunicación y coordinación con otros profesionales, como médicos, nutricionistas y entrenadores, son esenciales para abordar de manera integral la salud ósea y el rendimiento del atleta. El fisioterapeuta tiene la responsabilidad de asegurar que se consideren todos los aspectos de la recuperación y el rendimiento en el proceso de rehabilitación.

Finalmente, es crucial que el fisioterapeuta eduque a los atletas sobre la importancia del hueso como un tejido adaptativo. Informarles sobre cómo su estilo de vida, dieta y actividad física afectan la salud ósea puede motivarlos a adoptar hábitos que favorezcan su bienestar a largo plazo.

En resumen, el fisioterapeuta deportivo desempeña un papel fundamental en la rehabilitación y prevención de lesiones al comprender la naturaleza dinámica del tejido óseo. Al integrar esta comprensión en su práctica, puede contribuir significativamente a la recuperación efectiva y al rendimiento óptimo de los atletas.

Referencias

1. Okuno E, Fratin L. Bones. En: Biomechanics of the Human Body. Edit. Springer. 2014. pp. 115-134
2. McBride-Gagyi S, Lynch M. Biomechanical Principles of Fracture Healing. En: Crist B, Borrelli J, Harvey E. Essential Biomechanics for Orthopedic Trauma. A Case-Based Guide. Edit. Springer. 2020. pp. 3-17
3. Hamill J, Knutzen K, Derrick T. Skeletal Considerations for Movement. En: Biomechanical Basis of Human Movement. 4th Edition. Edit. Wolters Kluwer. 2015. pp. 25-58

4. Hall S. The Biomechanics of Human Bone Growth and development. En: Basic Biomechanics. 7th Edition. Edit. McGrawHill. 2014. pp. 85-113

5. Wang D, Eliasberg C, Rodeo S. Physiology and Pathophysiology of Musculoskeletal Tissues. En: Miller M, Thompson S. DeLee, Drez & Miller´s Orthopaedic Sports Medicine. Principles and Practice. 5th Edition. Edit. Elsevier. 2020. pp. 2-15

6. Sinaki M. Osteoporosis. En: Cifu D. Braddom's Physical Medicine and Rehabilitation. 6th Edition. Edit. Elsevier. 2020. pp. 690-714

7. Dunleavy K. Review of Foundational Concepts. En: Dunleavy K, Slowik A. Therapeutic exercise Prescription. Edit. Elsevier. 2019. pp. 17-64

8. Skeletal Tissues. En: Muscolino J. Kinesiology The skeletal System and Muscle Function. 3rd Edition. Edit. Elsevier. 2017. pp. 29-46

9. Betts J, Desaix P, Johnson E, Johnson J, Korol O, Kruse D, et al. Bone Tissue and the Skeletal System. En: Anatomy and Physiology. 2nd edition. Edit. OpenStax. 2022. pp. 207-242

10. Palastanga N, Soames R. Introduction. En: Anatomy and Human Movement. Structure and Function. 6th Edition. Edit. ElSevier. 2012. p. 1-33

11. Meyer U, Wiesmann H. Bone and Cartilage. En: Bone and Cartilage Engineering. Edit. Springer. 2006. pp. 7-57

12. Lachman J, Rehman S. Bone Healing. En: Suk M, Horwitz D. Hoppenfeld´s Rehabilitation and Treatment of Fractures. 2nd Edition. Edit. Wolters Kluwer. 2022. pp. 29-53

13. Dutton M. The Musculoskeletal System. En: Dutton´s Orthopaedic Examination, Evaluation, and Intervention. 5th Edition. Edit. McGraw Hill. 2019. pp. 3-27

14. Floyd R. Foundations of Structural Kinesiology. En: Manual of Structural Kinesiology. 22nd Edition. Edit. McGrawHill. 2024. pp. 1-36

15. Gross J, Fetto J, Rosen E. Introduction. En: Musculoskeletal Examination. 4th Edition. Edit. Wiley Blackwell. 2016. pp. 1-14

16. Debski R, Patel N, Shearn J. Basic Concepts in Biomechanics. En: En: Miller M, Thompson S. DeLee, Drez & Miller´s Orthopaedic Sports Medicine. Principles and Practice. 5th Edition. Edit. ElSevier. 2020. p. 16-29

17. Nordin, M., Frankel, V. H. (Eds.) Basic Biomechanics of the Musculoskeletal System. [1989].

18. Chen J, Liu C, You L, Simmons C. Boning up on Wolff's Law: Mechanical regulation of the cells that make and maintain bone. Journal of Biomechanics. 2010; Vol.43(1): pp. 108-118. https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2009.09.016

19. Sara L, Neumann D. Basic Structure and Function of Human Joints. En: Neumann D. Kinesiology of the Musculoskeletal System. Foundations for Rehabilitation. 3rd edition. Edit. ElSevier. 2018 pp. 28-46

20. Boyle C, Kim Y. Three-dimensional micro-level computational study of Wolff's law via trabecular bone remodeling in the human proximal femur using design space topology optimization. Journal of Biomechanics. 2011; Vol. 44 (5): pp. 935-942. https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2010.11.029

21. Hak D. Trauma Basics. En: Suk M, Horwitz D. Hoppenfeld´s Rehabilitation and Treatment of Fractures. 2nd Edition. Edit. Wolters Kluwer. 2022. p. 19-28

22. Ankle, Foot & Orthotic Centre. 5th Metatarsal Avulsion (Dancer's) Fracture [Internet]. 2023 [citado 27 jul 2026]. Disponible en: https://ankleandfootcentre.com.au/avulsiondancers-fracture/

23. Barlett C. Mechanisms and Characteristics of Musculoskeletal and Nerve Trauma. En: Prentice W. Principles Of Athletic Training: A Guide To Evidence-Based Clinical Practice. 16th Edition. Edit. Mc GrawHill. 2016. pp. 246-266

24. Wu A, Bisignano C, James S, Abady G, Abedi A, Abu-Gharbieh E, et al. Global, regional, and national burden of bone fractures in 204 countries and territories, 1990–2019: a systematic analysis from the Global Burden of Disease Study 2019. The Lancet Healthy Longevity. 2021; Vol. 2(9): pp. e580-e592. https://doi.org/10.1016/S2666-7568(21)00172-0

25. Jones M, Waterson B. Principles of management of long bone fractures and fracture healing. Surgery. 2020; Vol. 38(2): pp. 91-99. https://doi.org/10.1016/j.mpsur.2019.12.010

26. Kondi S, Gowda S. Principles of bone healing. Surgery. 2023. Vol. 41 (10); pp. 625-631. https://doi.org/10.1016/j.mpsur.2023.08.002

27. Meinberg E, Agel J, Roberts C, Karam M, Kellam J. Fracture and Dislocation Classification Compendium-2018. J Orthop Trauma. 2018; Vol.32(1): pp. S1-S170. doi: 10.1097/BOT.0000000000001063.

28. Nyary T, Scammell B. Principles of bone and joint injuries and their healing. Surgery. 2018; Vol. 36(1): pp.7-14. https://doi.org/10.1016/j.mpsur.2017.10.005

29. Mahapatra B, Pal B. A review on prediction of bone fracture using LEFM. Forces in Mechanics. 2023; Vol.10: pp. 100158. https://doi.org/10.1016/j.finmec.2022.100158