

Capítulo 2

Anatomía funcional del fémur

2.1. Introducción

El tema principal del presente capítulo será introducir de forma breve la anatomía del hueso largo que trataremos en el presente trabajo, el fémur. Inicialmente se explicará con brevedad la estructura de cada una de sus partes, su composición interna y los principales grupos musculares que lo conforman. Visto esto, se pasará a realizar una rápida mención de los tipos de fractura, para terminar introduciendo las principales características del proceso de consolidación ósea.

2.2. Huesos largos

El hueso es un órgano firme, duro y resistente que forma parte del endoesqueleto de los vertebrados. Está compuesto principalmente por tejido óseo, un tipo especializado de tejido conectivo constituido por células, y componentes extracelulares calcificados. Los huesos también poseen cubiertas de tejido conectivo, cartílago, vasos, nervios, y algunos contienen tejido hematopoyético y adiposo (médula ósea); aunque la composición microscópica se recoge más adelante de forma detallada.

Los huesos largos, y en especial el que se tratará en el presente estudio (el fémur), están constituidos por una diáfisis o cuerpo y dos extremos o epífisis. Éstos tienen una capa exterior gruesa de hueso compacto y una cavidad interior que contiene la médula ósea. Los extremos de los huesos largos contienen hueso esponjoso y una línea epifisaria. Dicha línea es un remanente de un área que contiene cartílago hialino que crece durante

la infancia para alargar el hueso. Los huesos de los brazos y piernas, excepto la rótula y los huesos de la muñeca y el tobillo, son huesos largos.

2.3. Descripción anatómica del fémur

El fémur es el hueso más largo del cuerpo de todos los mamíferos. Su constitución y volumen le permiten ser el elemento más fuerte y resistente del esqueleto humano. Se encuentra ubicado justo debajo del glúteo y por detrás del cuádriceps.

Como característica principal de los huesos largos podemos citar que es par y asimétrico, debido a la curvatura que presenta en su zona posterior. El fémur humano lo encontramos normalmente ubicado en una posición particular, inclinado hacia abajo y hacia dentro. Dicha inclinación resulta más acusada en el caso de las mujeres, debido a la mayor anchura de la pelvis femenina.

Por otra parte, una característica muy particular es que el eje del cuello femoral no está en el mismo plano que el eje transversal de los cóndilos, sino que configuran un ángulo agudo de declinación, abierto hacia dentro y adelante.

2.3.1. Epífisis superior

La epífisis superior es la zona en la que el fémur se articula con el coxal. Dicha zona presenta detalles anatómicos de muy distinta significación morfológica y funcional: la cabeza articular, los trocánteres y el cuello anatómico (Fig. 2.1).

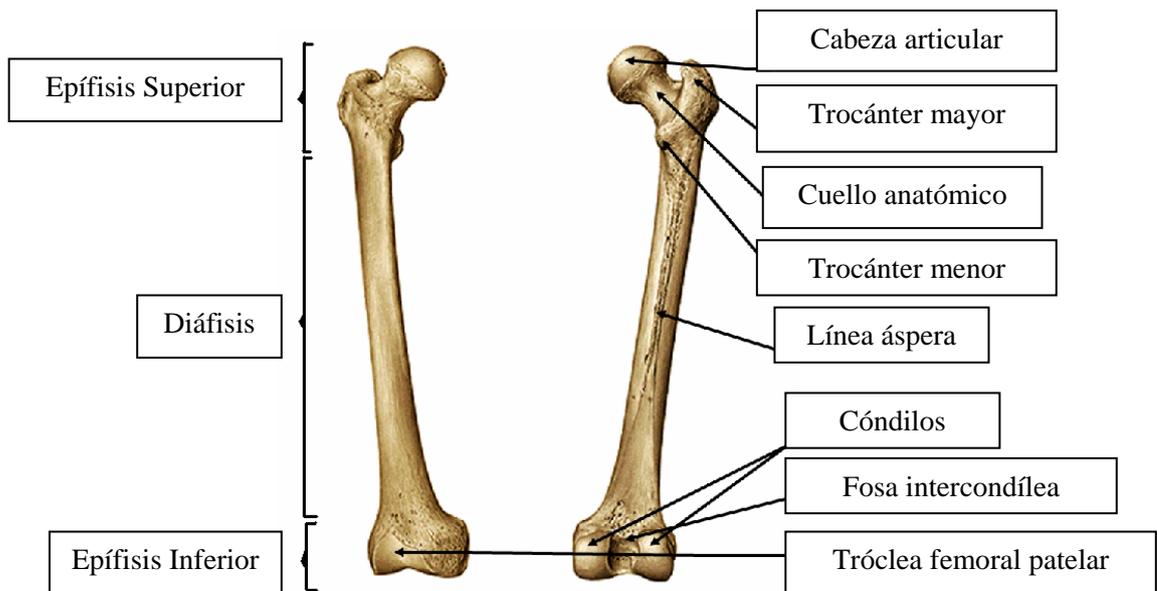


Figura 2.1: Partes del fémur (Herrero Ezquerro, 2003).

- La *cabeza articular* presenta la forma de dos tercios de una esfera, siendo lisa, y estando recubierta de cartílago articular debido a que su función es la de encajar en la cavidad cotiloidea del hueso coxal, conformándose así la articulación coxofemoral. Un poco por debajo y detrás de su centro, la cabeza tiene una pequeña depresión rugosa, llamada fosilla del ligamento redondo, destinada a la inserción del ligamento redondo de la articulación coxofemoral citada anteriormente.
- El *trocánter mayor* es una protuberancia ósea con forma de cubo, bastante aplanada transversalmente. Está situada a una altura ligeramente por debajo de la cabeza articular y por la zona de fuera. Se le considera dos caras y cuatro bordes principales. La cara externa está atravesada diagonalmente por una línea rugosa llamada cresta del glúteo mediano. Por encima de ella se encuentra una pequeña superficie plana, ocupada en estado fresco por una bolsa serosa, destinada a favorecer el deslizamiento del tendón del glúteo mediano. Por debajo de ella existe otra superficie, mucho mayor, en la que se aloja la bolsa serosa del glúteo mayor.

La cara interna del trocánter mayor se confunde casi en su totalidad con la extremidad externa del cuello. Sin embargo, se desprende de ésta en su parte posterior y en este sitio presenta una depresión profunda, conocida con el nombre de fosa trocánteriana.

En cuanto a los bordes del trocánter mayor se distinguen el superior, inferior, anterior y posterior. El borde superior, casi horizontal, presenta en su parte media una pequeña carilla, redonda u oval, para la inserción del piramidal. El borde inferior se continúa con el cuerpo del hueso; está marcado exteriormente por una cresta rugosa, de dirección ligeramente oblicua.

El borde posterior, perfectamente marcado por arriba, en donde constituye el límite posterior de la cavidad digital, se presenta menos limpio en su parte inferior. Por otra parte, el borde anterior, muy grueso y de forma rectangular, alcanza casi las dimensiones de una verdadera cara.

- El *trocánter menor* es una apófisis cónica, posteroinferior respecto al cuello del fémur. Se encuentra unido al trocánter mayor por medio de las líneas intertrocánterianas. De dichas líneas, la anterior va por delante, mientras que la línea intertrocánteriana posterior, se encuentra detrás. Ésta última está mucho más desarrollada que la primera.
- Por otro lado, se definen los dos cuellos presentes en dicho hueso largo. El *cuello anatómico*, que sostiene la cabeza articular y la une a los trocánteres, presentando forma de cilindro aplanado en sentido anteroposterior. Y otro denominado *cuello quirúrgico*, que simplemente es la porción de hueso que une el extremo superior del fémur con la zona diafisaria o cuerpo de éste.

2.3.2. Diáfisis

Se denomina diáfisis femoral al cuerpo principal del fémur. Tiene forma aproximadamente prismática triangular y en ella se pueden describir tres caras y tres bordes. La cara anterior es lisa y ligeramente convexa en sentido transversal. Los bordes externo e interno separan la zona anterior de la posterointerna y posteroexterna. A pesar de que los bordes externo e interno no se encuentran marcados de manera precisa, si que podemos encontrar bien delimitado el borde posterior por una especie de línea gruesa, saliente y rugosa, más bien conocida como “*la línea áspera*” (Fig. 2.1). Dicha línea se divide de distinta forma según en la zona en la que nos encontremos. En la zona inferior se bifurca en dos líneas muy divergentes que van a buscar a cada una de las protuberancias inferiores denominadas cóndilos. Forma así en dicha superficie un espacio peculiar denominado espacio poplíteo o triángulo poplíteo. En la zona superior, la línea áspera se separa en tres ramas distintas. La rama externa se dirige al trocánter mayor y es la más acusada de todas. La rama media por su parte busca al trocánter menor y la rama interna viene a terminar en la parte anterior e inferior del cuello.

2.3.3. Epífisis inferior

El voluminoso extremo o epífisis inferior se organiza en los cóndilos, dos protuberancias laterales respecto al plano sagital de la diáfisis: cóndilo interno y cóndilo externo. En ellos se desarrolla la *tróclea*, superficie lisa para la articulación del fémur con la tibia (Fig. 2.1) en la rodilla (articulación femorotibial).

El *cóndilo interno o medio* es prominente hacia dentro y en su cara lateral cutánea destacan dos relieves óseos característicos. Por su parte el *cóndilo externo o lateral* se presenta más voluminoso que el interno. En las caras medias de ambos cóndilos (respecto al eje del fémur) se insertan los ligamentos cruzados de la articulación de la rodilla.

Finalmente, las caras anterior, inferior y posterior son articulares. En conjunto conforman la tróclea femoral con una depresión en medio, la garganta de la tróclea. Por debajo y por la zona trasera, los cóndilos están completamente separados por la profunda escotadura o fosa intercondílea.

Por encima de la tróclea y en la zona delantera destaca, el hueco supratroclear. Representa la parte inferior del triángulo poplíteo al que aludimos en la descripción de la línea áspera. En este hueco se aloja la rótula cuando la pierna está en extensión.

2.4. Inserciones musculares

Se denominan inserciones musculares a cada uno de los puntos anatómicos donde nace un determinado músculo al igual que a los puntos donde éste termina. A continuación se exponen las inserciones de los principales grupos musculares presentes en el fémur. Se hace una diferenciación entre los que se insertan en la epífisis femoral superior, los insertados en la diáfisis y los que presentan cabida en la epífisis inferior femoral.

2.4.1. Inserciones en la epífisis superior

Seguidamente se citan las principales inserciones musculares presentes en las distintas zonas del extremo superior del fémur:

- En la cabeza articular, justamente un poco por debajo y por detrás de su centro, encontramos una pequeña depresión rugosa llamada fosilla del *ligamento redondo*. En este lugar se inserta dicho ligamento, el cual conforma parte de la articulación coxofemoral citada con anterioridad.
- En el trocánter mayor se encuentra una pequeña superficie plana, ocupada por una bolsa serosa, destinada a favorecer el deslizamiento del tendón del *glúteo mediano* (Fig. 2.2). Por debajo de ella existe otra superficie, mucho mayor, en la que se aloja la bolsa serosa que ayudará al deslizamiento del tendón del *glúteo*

mayor. Por otro lado, en la zona de la fosa trocanteriana, se insertan el *obturador externo*, el *obturador interno* y los dos *gémicos*.

En la cresta rugosa que existe en la zona exterior del borde inferior (cresta del vasto externo) se fijan las inserciones *del vasto externo*. En la zona inferior del borde posterior se presta inserción a las inserciones *superiores del músculo cuadrado crural*. El borde anterior por su parte está ocupado por las rugosidades de inserción del *glúteo menor* (Fig. 2.2), huellas que por su extremidad superior alcanzan en parte el borde superior.

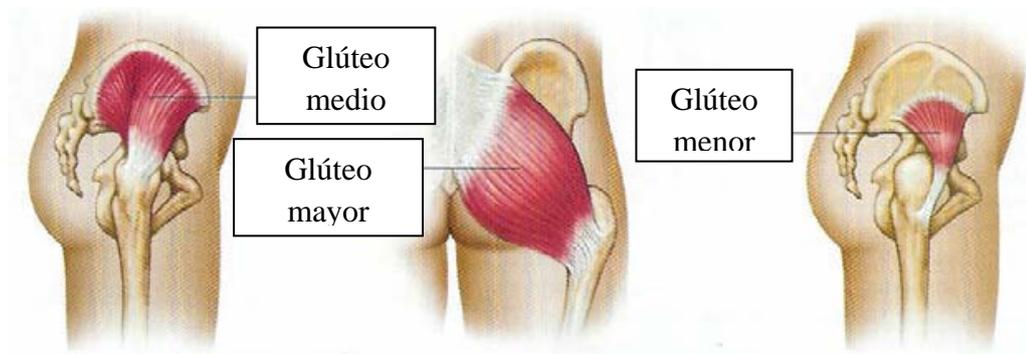


Figura 2.2: Glúteo mayor, medio y menor (Uhm, 2004).

- En la apófisis cónica del trocánter menor se inserta el músculo *psosilíaco (iliopsoas)* (Fig. 2.3). En la línea intertrocanteriana anterior es donde encontramos insertado el *ligamento ilio-femoral* mientras que la línea intertrocanteriana posterior da cabida al músculo *cuadrado crural*.

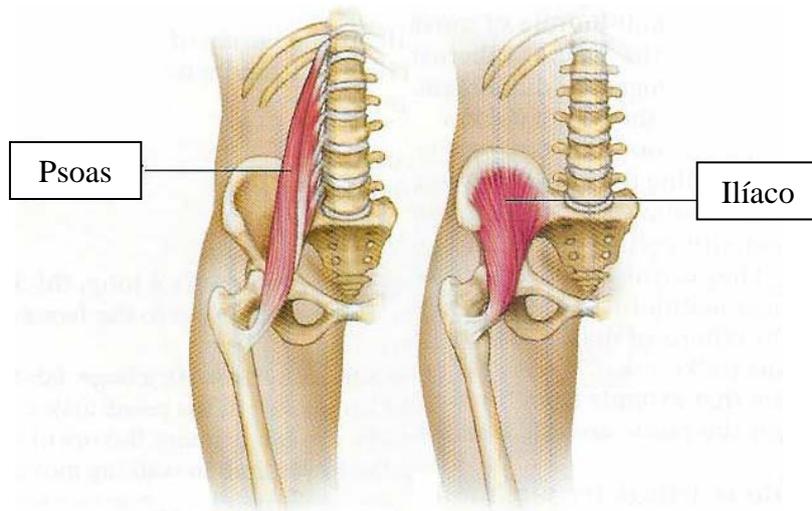


Figura 2.3: Psoasiliaco (Uhm, 2004).

2.4.2. Inserciones en la diáfisis

En la cara anterior de la diáfisis femoral, y en particular en la zona superior, tenemos la inserción del *crural*, y más abajo del *subcrural*. Las zonas posteroexterna y posteroexterna las recubren los *vastos medio (interno)* y *lateral (externo)* (Fig. 2.5). Igualmente, el músculo *crural* cubre ligeramente las dos caras y se inserta en ellas, principalmente en la externa. Dichos músculos conforman el *cuádriceps*, y posibilitan el movimiento de extensión de la pierna.

El labio externo de la línea áspera sirve de punto de inserción al *vasto externo* y su labio interno presta inserción al *vasto interno*. En el intersticio de ésta se insertan sucesivamente, de arriba abajo, los tres músculos *aductores* del muslo (Fig. 2.4) y además la porción corta del *bíceps femoral*.



Figura 2.4: Aductores (Uhm, 2004).

En la zona superior, la línea áspera se separa en tres ramas distintas. La rama externa presta inserción al *glúteo mayor* (también se le conoce como cresta del glúteo mayor). La rama media presta inserción a otro músculo, al *pectíneo*, denominándose ésta cresta del pectíneo. En la rama interna se inserta el vasto interno del cuádriceps crural (cresta del vasto interno).

Otro de los músculos que se encuentran en la zona de la diáfisis y que cruzan diagonalmente la región anterior del fémur es el *sartorio*, con forma de cinta (Fig. 2.5). Además de éste encontramos otros grupos musculares de gran importancia como son el *tensor de la fascia lata*, con inserción en la cresta ilíaca (pelvis) y su respectivo *tracto o cinta iliotibial* con inserción en la en la tuberosidad lateral de la tibia y borde externo de la rótula. Este último soporta las funciones de abducción, flexión y rotación del muslo medio.

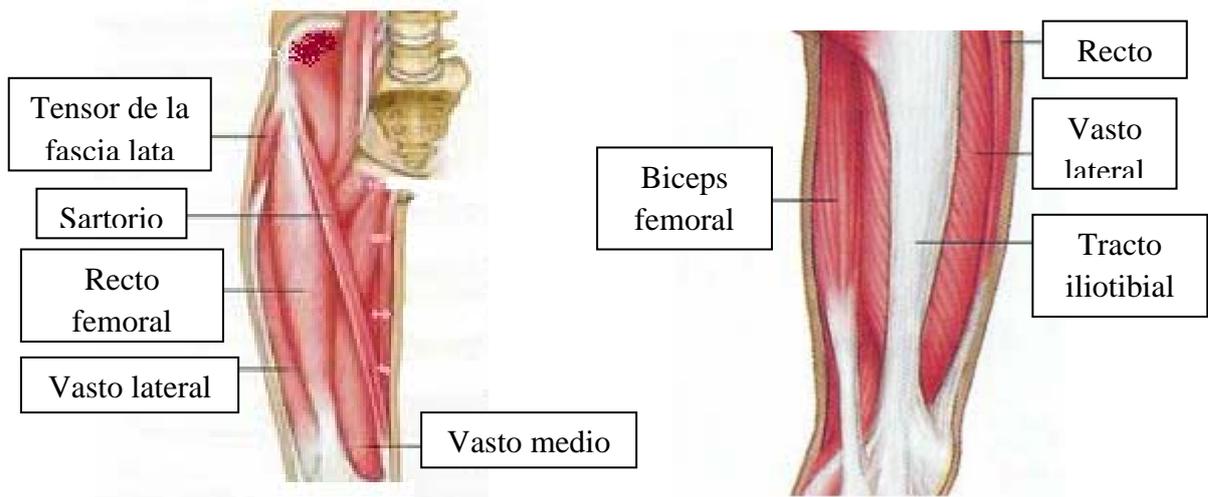


Figura 2.5: Vistas de las caras anterior y lateral del fémur (Uhm, 2004).

2.4.3. Inserciones en la epífisis inferior

El voluminoso extremo o epífisis inferior se organiza en los cóndilos, dos protuberancias laterales respecto al plano sagital de la diáfisis: cóndilo interno y cóndilo externo. En ellos se desarrolla la *tróclea*, superficie lisa para la articulación del fémur con la tibia (Fig. 2.6) en la rodilla (articulación femorotibial).

En la cara lateral del cóndilo interno se inserta el *ligamento lateral interno* de la articulación de la rodilla. Esto ocurre justamente en uno de los dos relieves óseos característicos, en la tuberosidad interna. Por otra parte está el tubérculo del *aductor mayor*, para el músculo del mismo nombre. Además se inserta en esta cara el *gemelo interno*.

En el cóndilo externo se inserta el *ligamento lateral externo* de la articulación de la rodilla, en la tuberosidad externa de su cara lateral. Igualmente ocurre para el *gemelo externo* y *poplíteo*.

En las caras medias de ambos cóndilos (respecto al eje del fémur) se insertan los *ligamentos cruzados* de la articulación de la rodilla. Por otra parte, al referirse al espacio poplíteo, se encuentra el tubérculo supracondíleo interno, para el *gemelo interno*, y el tubérculo supracondíleo externo, para el *gemelo externo*.

2.5. Composición interna del fémur

El fémur presenta la estructura característica de todos los huesos largos, formado principalmente por: hueso cortical, hueso trabecular, periostio, endostio, médula ósea y el cartílago articular (Fig. 2.6).

- El *hueso cortical* es una capa altamente resistente, debido entre otras cosas a su bajísima porosidad (entre 0.05 y 0.1) (Martínez Reina, 2006) denominada hueso cortical. Éste conforma aproximadamente el 80% de la estructura ósea del cuerpo humano. El grosor de esta capa es de dimensiones apreciables en la zona de la diáfisis, tornándose cada vez más estrecha conforme nos acercamos a los extremos epifisarios.
- El *hueso trabecular o esponjoso* es un tipo de estructura que presenta una porosidad altísima (entre 0.75 y 0.95). En los adultos, las trabéculas que lo conforman se comunican directamente entre la epífisis y la diáfisis.
- La *línea epifisaria* es una placa cartilaginosa que separa, mayormente en niños y adolescentes en crecimiento, la diáfisis de los centros de osificación que se encuentran en cada una de las epífisis respectivamente. Dicha placa se une con la diáfisis mediante unas columnas de hueso esponjoso denominada metafisis y que en ocasiones da nombre a dicha zona. Es por tanto un lugar de crecimiento óseo.

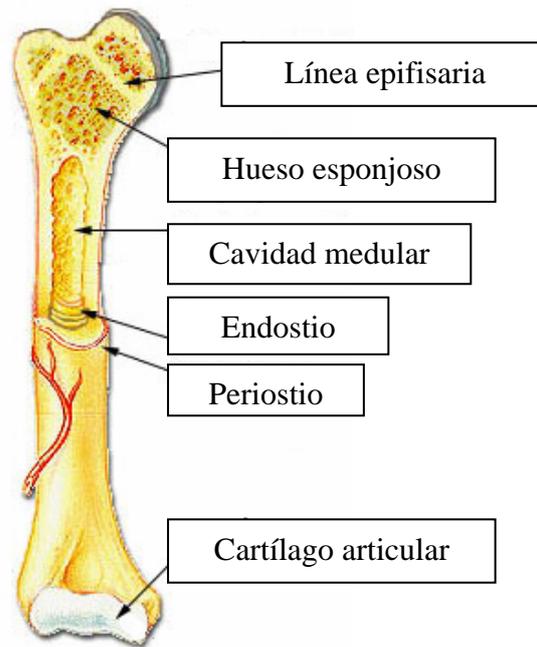


Figura 2.6: Estructura interior y exterior del fémur (Marieb, 2004).

- El *periostio* es la capa dura y más externa que encontramos. Dicha especie de membrana recubre la totalidad del hueso excepto en aquellas zonas cercanas a las articulaciones y obviamente en las superficies de inserciones musculares. El periostio consta de dos capas: una más externa formada principalmente por fibras de colágeno y otra más interna y vascularizada donde proliferan los osteoblastos (células que intervienen en el proceso de consolidación ósea).
- Nos referimos al *endostio* para hacer mención a una fina capa que separa la zona del hueso cortical de la médula.
- La *cavidad medular* es el recinto que queda confinado en el interior del tubo diafisario, y en ella se encuentra ubicada la médula roja (hematopoyética) y amarilla (grasa) (Gómez-Benito, 2005). Es el lugar donde se generan las principales células sanguíneas.

- El *cartílago articular* por su parte, forma como su nombre indica la superficie articular, zona donde los extremos epifisarios de los huesos entrarán en contacto unos con otros. Su función es la de articular la sobrecarga de presión de las superficies en contacto y permitir el desplazamiento de tales superficies óseas sin que se produzca fricción entre ellas. Para llevar a cabo estas funciones el cartílago articular es avascular (sin vasos sanguíneos ni linfáticos) e inervado.

La estructura alargada en forma de cilindro de la diáfisis femoral es óptima desde el punto de vista resistente, trabajando el hueso a flexión en la mayoría de los casos y raramente a torsión. Además la dirección de máxima rigidez de las fibras del tejido coincide con el eje longitudinal de este hueso largo. En las epífisis, las trabéculas que forman el hueso esponjoso presentan direcciones definidas por las de las deformaciones principales. Las cargas en esta zona están más repartidas y no solicitan de tal manera al hueso (como ocurre en la diáfisis), ya que entre otras cosas las absorben los huesos colindantes. Por otro lado la estructura trabecular permite absorber grandes deformaciones, muy importante para que las articulaciones no sufran en momentos puntuales de esfuerzos muy elevados.

2.6. Hueso primario y secundario

Todo hueso está compuesto por células de distintos tipos que se encuentran en el seno de una matriz extracelular. Dicha matriz ósea está formada por grupos de fibras de colágeno inmersas en el seno de una sustancia fundamental mineralizada. La composición de dicha matriz es algo que puede variar dependiendo de la edad de la persona o del estado metabólico. Los principales componentes que la forman son *agua*, *sales minerales orgánicas* y en menor proporción *colágeno* y otras *proteínas* distintas al colágeno, además de *carbohidratos*.

Las fibras de colágeno, aparte de dar consistencia a tracción y cierta elasticidad se disponen como unión entre el hueso cortical y el periostio. Las sales minerales conforman la parte inorgánica de la matriz, dándole consistencia a ésta, dureza, rigidez y resistencia a compresión. De igual forma las propiedades mecánicas del hueso no solo dependen de la composición del mismo, sino de la orientación y organización de sus componentes. De esta forma se distingue entre *hueso inmaduro trenzado o primario* y *hueso maduro laminar o secundario*.

En el hueso *inmaduro trenzado o primario* se encuentran sus elementos dispuestos de forma irregular, formando una malla compleja entretejida. Posteriormente, las fibras de colágeno dispuestas de forma irregular serán reemplazadas por otras con disposición casi paralelas, hecho que dará como resultado la formación del *hueso maduro laminar o secundario*. Este tipo de hueso estructurado por láminas conforma la mayoría del tejido óseo del esqueleto humano y forma la mayor parte tanto del hueso cortical como del esponjoso, aunque la disposición de sus elementos varía de un tipo a otro.

2.7. Tipos de fractura en el fémur distal y tratamiento

Las fracturas del extremo distal del fémur se dividen generalmente en dos grupos, las que afectan la superficie articular y las que no le afectan. Como ocurre con cualquier fractura intrarticular, las fracturas del extremo distal del fémur pueden conducir a una artrosis postramática importante si la reducción y la fijación de la parte intrarticular de la fractura no son satisfactorias.

De igual manera puede darse la fractura con conminución grave tanto de la componente intrarticular como de la extrarticular.

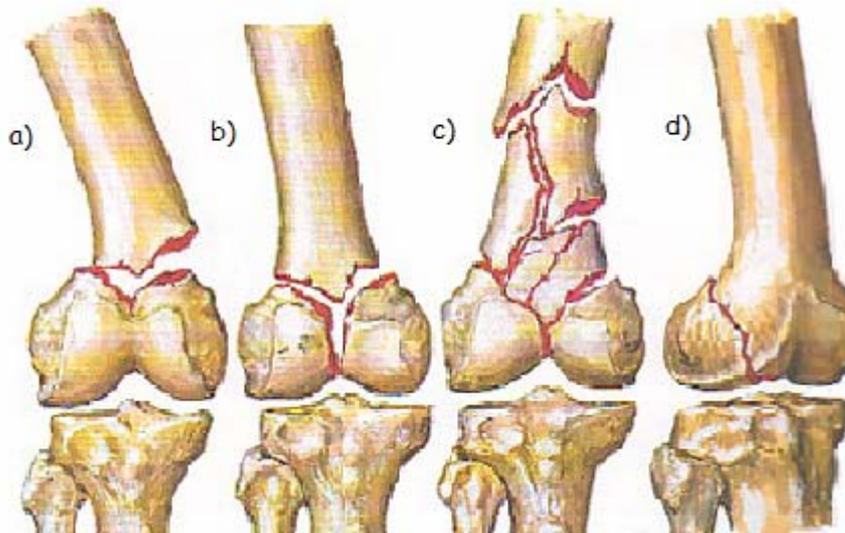


Figura 2.8: Tipos de fractura extremo distal del fémur (Netter)

En la figura 2.8 se observan ejemplos de los distintos tipos de fracturas:

- a) *Fractura transversal supracondilar* en la que la articulación no se ve afectada.
- b) *Fractura intercondílea* en forma de T o en Y. En este caso la superficie articular se ve afectada.
- c) *Fractura conminuta* que se extiende a la diáfisis. Igualmente se ve afectada la superficie articular.
- d) *Fractura de un cóndilo*, con clara afectación de la superficie articular como ocurre en los dos casos anteriores. Puede producirse en el plano frontal o en el oblicuo.

Las fracturas con afección articular requieren tratamiento mediante reducción abierta y fijación interna, primero para lograr una fijación firme de los fragmentos intrarticulares y después para unirlos al fémur distal intacto. Las fracturas intrarticulares suelen tratarse con un clavo-placa o un tornillo-placa supracondíleos o sistemas de placas de estabilidad angular. La eficacia del tratamiento con estos sistemas depende de una técnica quirúrgica meticulosa y de la disponibilidad de un hueso lo suficientemente fuerte para la fijación.

Los mismos problemas de fracaso del implante o de la fijación que se presentan en el tratamiento de las fracturas subtrocantéreas también pueden complicar el tratamiento en el extremo distal del fémur. En áreas de gran conminución metafisaria, la colocación de injerto óseo en la cara medial puede ayudar a prevenir el fracaso de la placa. Los pacientes con un hueso de mala calidad pueden beneficiarse de una tracción o de un sistema intramedular modificado como el clavo supracondíleo de Zickel (clavo intramedular).

Las fracturas del fémur distal que sólo afectan a un cóndilo pueden estabilizarse de forma segura con tornillos de compresión aislados o asociados a una placa. Esta técnica permite movilidad precoz con un riesgo mínimo de desplazamiento en la superficie articular.

Recientes estudios (Marti *et al*, 2001; Markmiller *et al*, 2004 o Kolb *et al*, 2008) han confirmado el sistema de fijación mediante placa LISS (Fig. 2.9) como más que aceptable para el tratamiento de fracturas supracondilares del fémur distal y de la tibia proximal. Estas placas han sido preconformadas para ajustarse al fémur distal y presentan una guía externa que permite la inserción percutánea de los tornillos diafisarios proximales. La cabeza de los tornillos del sistema tiene una rosca que se une a la placa, lo que crea dispositivos de múltiples ángulos fijos. Este sistema basado en la fijación mediante tornillos a una placa anatómicamente conformada presenta una serie de ventajas sobre otros sistemas de fijación. Por un lado permite adaptarse perfectamente a la forma del hueso en una zona tan compleja como es la zona próxima a la articulación de la rodilla. Por otro lado, se necesita una menor deformación irreversible para conseguir una primera estabilización de la fractura. Otra ventaja importante es que la falta de contacto directo entre la placa y el hueso junto con las pequeñas inserciones que se realizan para los tornillos provocan una interrupción menos invasiva de la vascularización en la zona afectada. De igual forma, la mayor flexibilidad que exhibe este tipo de sistema permite un mejor y más rápido proceso de curación, ya que desde el inicio del proceso, se genera un estímulo espontáneo de curación que induce igualmente la formación del callo. Otra de las características importantes a tener

en cuenta son los bajos niveles de infección que se registran con este sistema de fijación así como los menores problemas de mal alineamiento axial con respecto a otros sistemas utilizados.

Por su parte presenta otras desventajas con respecto a otros sistemas utilizados, como que la rotación de la placa puede producir la rotura de los tornillos, por lo que se necesita una técnica depurada y la realización de un planning preoperativo de colocación de los tornillos (especialmente en fracturas intrarticulares y periprotésicas). El número mínimo de tornillos a colocar en la zona proximal restringen su utilización respecto a otros métodos en alguno de los casos. Otra de las ideas a tener en cuenta es que la reducción de la fractura debe de realizarse antes de la colocación de la placa LISS, ya que ésta no ayuda a la reducción de la fractura.

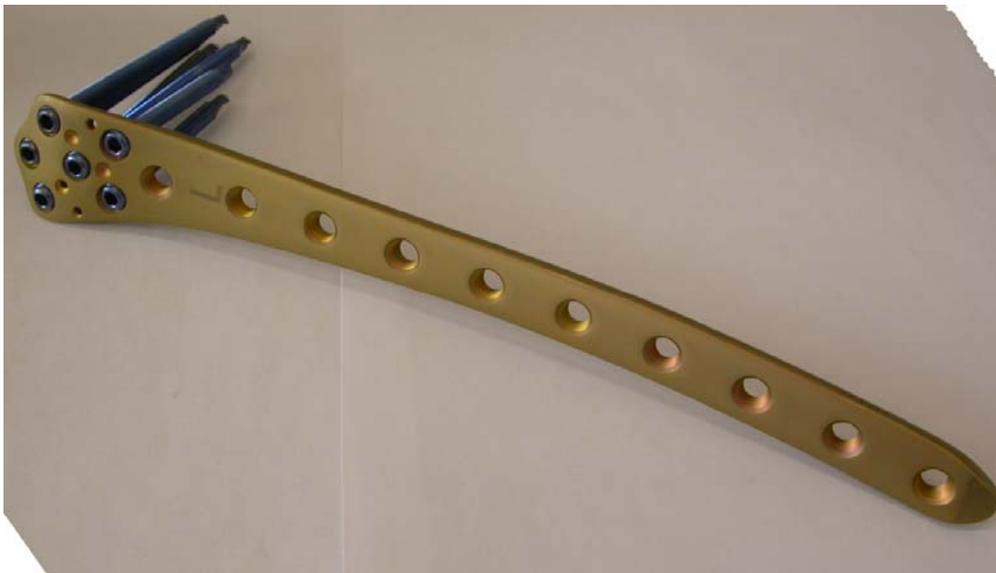


Figura 2.9: Placa LISS genérica

2.8. Consolidación ósea

Las fracturas óseas tienen como consecuencia, entre otras cosas, el desplazamiento de los extremos del hueso fracturado, seccionamiento de vasos sanguíneos, la muerte de células, desgarros en el periostio y en el endostio o la destrucción de la propia matriz

ósea. Todo lo expuesto lleva consigo la pérdida de estabilidad en el miembro fracturado. El proceso de consolidación ósea tiene como principal objetivo recuperar la rigidez del hueso original. La formación del nuevo hueso, tiene lugar principalmente a través de dos tipos de osificación: *intramembranosa o endocondral*. En la primera de ellas el hueso se forma a partir de una membrana fibrosa muy vascularizada, mientras que en el segundo caso el hueso nuevo se forma por reemplazo del cartílago hialino.

Por ello y, dependiendo de algunos factores como pueden ser el ambiente mecánico o la distancia entre los extremos fracturados, el proceso de consolidación ósea se lleva a cabo de dos maneras posible: la consolidación primaria o directa y la consolidación secundaria o indirecta.

La *consolidación primaria o directa* (Fig. 2.10) constituye un proceso casi perfecto de reducción y estabilización de fracturas. La aparatamenta utilizada para estos casos consiste en un sistema de fijación interna muy rígido, que elimina casi en su totalidad el movimiento interfragmentario. Esto trae como consecuencia que los fragmentos consoliden por remodelación osteonal (sin formación del callo de fractura).

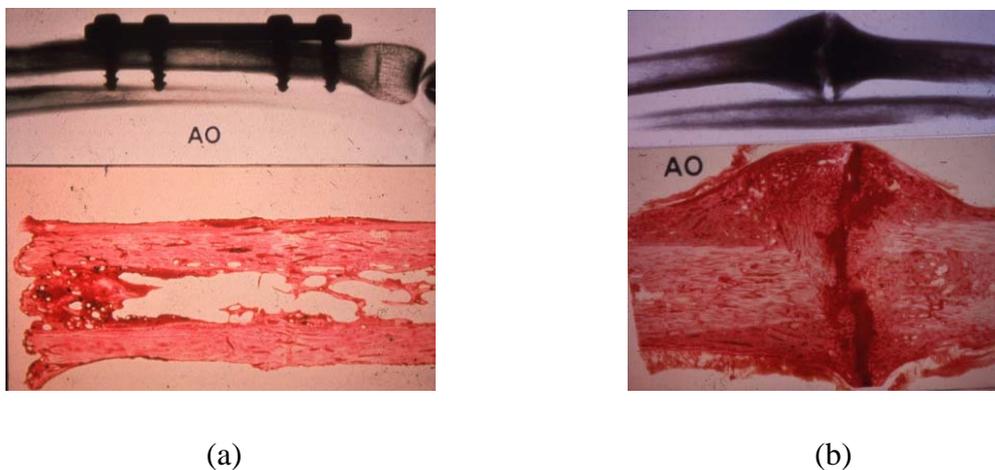


Figura 2.10: a) Consolidación ósea primaria y b) consolidación ósea secundaria (Messmer, 2006).

La *consolidación secundaria o indirecta* (Fig. 2.10) presenta una estabilidad interfragmentaria menor que el caso anterior, produciéndose la rotura de vasos. De esta forma no existe suficiente vascularidad para que se produzca una remodelación osteonal. Aparece un callo de fractura y el proceso de unión tiene lugar mediante la combinación de la osificación intramembranosa y endocondral. El sistema de fijación que se desarrolla a lo largo de este estudio (con placa LISS) conlleva un proceso de consolidación de este tipo, por tanto será el que se describe a continuación.

Las distintas fases que conforman el proceso de consolidación indirecta o secundaria son: Inflamación, callo blando, callo duro y remodelación (Gómez Benito, 2005).

- La primera fase, la de *inflamación* (Fig. 2.11.1), se produce tras la fractura. Suele abarcar un total de 4 a 7 días, durante los cuales, los rasgos más significativos son: la hemorragia, el dolor y la consecuente aparición del hematoma. En los extremos fracturados se produce necrosis celular debido a la inexistencia de vascularización. Por tanto, se puede afirmar que el proceso de consolidación tiene lugar lejos del foco de fractura, ya que dichos extremos no participan en la consolidación. La función principal del hematoma, ocupado por células inflamatorias es la de desencadenar, mediante factores de crecimiento, eventos celulares tales como: proliferación, migración y diferenciación de células mesenquimales¹. Todo ello conduce a la formación final de un tejido de tipo granular de escasa rigidez al rededor de la fractura. Cabe mencionar que al proceso de proliferación le afectan factores mecánicos originados en el foco de fractura (Bailón-Plaza & van der Meulen, 2003). Dicho proceso comienza a las 8 horas, tras producirse la fractura. La fase de inflamación se solapa con el de la formación del callo blando que se verá a continuación.

¹*células mesenquimales*: son células madre osteoprogenitoras que proceden de células pluripotenciales. Son las responsables, por ello, de la formación de todos los huesos durante el desarrollo precoz y pueden proliferar y diferenciarse a osteoblastos antes de la formación del hueso. Se encuentran distribuidas además de por la médula ósea, por otros tejidos conectivos.

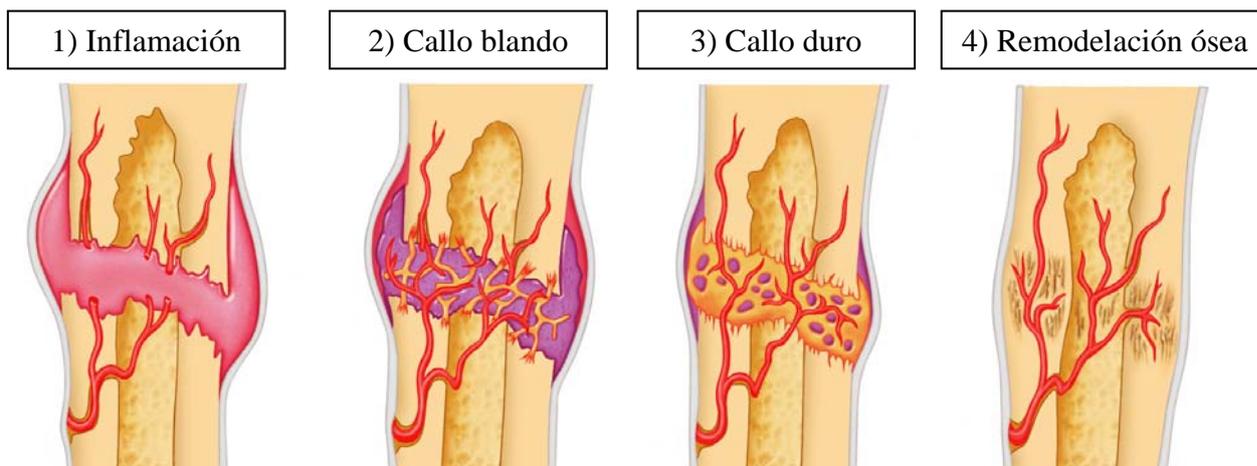


Figura 2.11: Fases del proceso de consolidación ósea (Marieb and Hoehn, 2007).

- La aparición del *callo blando* (Fig. 2.11.2) suele originarse a partir del tercer o cuarto día tras la fractura. El dolor y la hinchazón comienzan a desaparecer y, durante un periodo que suele abarcar un par de semanas, los fragmentos fracturados comienzan a unirse por primera vez dotando a la zona de cierta estabilidad. Ya veremos más adelante que la zona adquirirá una cierta estabilidad gomosa, que permitirá todavía el movimiento de los fragmentos pero que restringirá dicha movilidad de forma más acusada que en el caso inicial del hematoma.

Continúa la proliferación de abundantes células mesenquimales indiferenciadas en distintas regiones del hueso. La diferenciación a osteoblastos² y condroblastos³ permiten la formación del tejido que conformará el callo blando

²*osteoblastos*: células encargadas de la formación de la matriz ósea. Se crean en el periostio además de en la médula y proceden de las mencionadas células madre osteoprogenitoras.

³*condroblastos*: células formadoras de la matriz cartilaginosa, se les considera como condrocitos inmaduros. Dichos condrocitos formarán posteriormente el tejido cartilaginoso.

(Munuera-Martinez, 2002). Se forman los callos perióstico y endóstico, siendo este primero de mayor importancia para el caso que nos incumbe, el de personas adultas durante el proceso de consolidación.

De igual modo, el sistema de fijación empleado en este estudio (placa LISS) lleva como consecuencia la aparición de cierta movilidad fractuaria. La idea fundamental es que se consigan condiciones de hipoxia, obteniendo como resultado la formación de cartílago. Dicho proceso terminará derivando en la creación de hueso mediante osificación endocondral. Los niveles de oxígeno junto a las condiciones anteriores inducen a la desaparición final del hematoma, formándose en su lugar cartílago osteoide proveniente del tejido del callo.

Las fracturas generadas en la zona de la diáfisis suelen tener bastante voluminosidad, mientras que las que podemos encontrar en las zonas epifisarias carecen en su mayoría de ella debida a la falta de periostio en dicha región (Garcés, 1999; Sedel & Vareilles, 1992). El sistema de fijación utilizado en este trabajo permite tratar fracturas en zonas bastante complicadas, donde otros no podrían hacerlo de forma eficaz. Es por ello que la fractura con la que se trabajará y considerando las condiciones anteriores, al encontrarse en la zona metafisaria experimentará un callo de dimensiones normales, no demasiado voluminoso. La zona del foco se tornará algo más estable que en el caso del hematoma (Munuera-Martinez, 2002; Garcés, 1999) y será a partir de este momento cuando el cartílago creado vaya dejando poco a poco lugar a la formación del nuevo hueso.

- La siguiente fase del proceso es la denominada fase de *callo duro* (Fig. 2.11.3) y abarca aproximadamente un mes desde su inicio (Einhorn, 1998). Su origen, a comienzos de la tercera semana tras la producción de la fractura, lleva consigo un proceso de mineralización y de formación de hueso desordenado e inmaduro. La mineralización es un proceso más lento que todos los vistos anteriormente, siendo más rápido en el caso de formación de nuevo hueso cortical y en el caso de niños y jóvenes (Einhorn, 1998; Munuera-Martinez, 2002).

- Una vez que la unión irregular de los fragmentos fracturados ha tenido lugar mediante la creación de hueso inmaduro, tiene lugar el proceso de *remodelación ósea* (Fig. 2.11.4). Durante este proceso, el hueso inmaduro es sustituido por hueso laminar (remodelación interna) y el volumen del callo disminuye considerablemente (remodelación externa) según podemos observar en los trabajos ya citados anteriormente llevados a cabo por Munuera-Martinez, 2002 y por Garcés, 1999. De esta forma, el cuerpo humano consigue restablecer casi en su totalidad la resistencia original del hueso, permitiendo a éste recuperar la estructura óptima para soportar los esfuerzos principales a los que será sometido.

Siguiendo con ellos, observamos cómo se recupera el nivel de oxígeno en la fractura, la cavidad medular es invadida finalmente por médula ósea y el callo desaparece para que el hueso recupere su forma original (aunque no totalmente en el caso de adultos donde su forma irregular hace que como mucho se produzca un redondeo de éste y se suavice su contorno).

Focalizando el caso de estudio del presente trabajo y según lo referenciado en Yoo & Johnstone (1996), existen zonas de un mismo hueso más ricas en médula ósea que otras, lo que provoca una mayor abundancia de células mesenquimales. Esto hace que al presentar nuestro caso de estudio una fractura del tipo metafisaria, el tiempo de consolidación final pudiera ser menor que el estimado en otras zonas del hueso (como podría ser la zona diafisaria del fémur).

Además de algunos de los factores que se han citado anteriormente y que influyen en el proceso de consolidación, como pueden ser la composición y disposición del hueso o la edad del paciente, se deben de tener en cuenta otros factores que guardan estrecha relación con el fijador en particular (placa LISS) que se utiliza en este caso de estudio:

- La rigidez que el sistema de placas y tornillos proporcione al miembro fracturado debe de ser tal que, sin permitir una movilidad de los extremos

fracturados muy grande, permita el contacto entre ellos para que los factores mecánicos desencadenantes del proceso permitan desarrollar un estímulo beneficiario. De tal forma, veremos más adelante que se partirá de inicio de un sistema lo más rígido posible y se observará de forma progresiva la evolución de las deformaciones principales ocurrientes en el tejido de la zona focal cuando se disminuye la estabilidad mecánica del sistema. Esto se conseguirá cambiando la disposición de los tornillos, el material del que están fabricados y el tipo de ellos. Tendrá lugar una disminución apreciable de la estabilidad en muchos casos (sobre todo cuando se comienza a retirar tornillos), que podría llevar consigo un proceso de consolidación ósea más extenso en el tiempo debido a la falta de vascularización originada. De igual manera la mayor flexibilidad podría generar una mayor formación de cartílago durante la etapa de formación del callo.

- Cabe mencionar que los excesos de tracción retrasan el proceso de consolidación. Por un lado, por la separación que producen entre los fragmentos fracturados y porque el estiramiento del nuevo tejido en fase de tejido de granulación y de tejido fibroso, lleva al estrangulamiento de los vasos. Por ello, la tracción en el tratamiento de las fracturas tiene unas indicaciones muy limitadas y deben ser tenidas en cuenta en el análisis de los resultados del presente trabajo. Todo lo anterior sugiere un tratamiento donde la compresión y una buena vascularización sean el medio reinante para la formación de una buena estructura ósea final en un espacio temporal adecuado.
- Por último, y no menos importante, sería la disposición de la fractura desde el punto de vista del ambiente mecánico en el foco. Nuestro caso de estudio trata una fractura lisa, en disposición transversal y perpendicular al eje del hueso; pero otras posibles fracturas que pudieran ocurrir (por ejemplo de forma oblicua o algo inclinada respecto al eje femoral) no harían más que provocar en la mayoría de los casos una distribución de tensiones en el foco muy desigual, con

zonas de más alta compresión que en otras. Igualmente aparecerían regiones más traccionadas de lo normal, dando lugar a un ambiente mecánico no del todo propicio para que se dé un proceso de consolidación ósea adecuado.