

ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERIA TÉCNICA INDUSTRIAL DE ZARAGOZA

Anexo I

Anatomía del pie y ciclos de la marcha humana

Carlos Fernández Manchado

Escuela Universitaria de Ing. Técnica Industrial de Zaragoza	ANEXO I	Carlos Fernández Manchado	
		Total n°: 32 Hoja n°: 2	FECHA 5/5/2010

ÍNDICE

1.- ANATOMIA DEL PIE.....	3
1.1.- EL PIE OSEO.....	3
1.2.- ARTORLOGÍA.....	7
1.2.1.- ARTICULACIÓN DEL TOBILLO	7
1.2.2.- ARTICULACIÓN MEDIOTARSIANA O DE CHOPART.....	11
1.2.3.- ARTICULACIONES DEL TARSO ANTERIOR.....	13
1.2.4.- ARTICULACIONES INTERMETATARSIANAS.....	14
1.2.5.- ARTICULACIÓN TARSOMETATARSIANA O DE LISFRANC.....	14
1.2.6.- LIGAMENTO CALCANEOCUBOIDEO O GRAN LIGAMENTO PLANTAR	16
1.2.7.- ARTICULACIONES METATARSOFALÁNGICAS	17
1.2.8.- ARTICULACIONES INTERFALÁNGICAS	17
1.3.- BIOMORFOLOGÍA: ESTRUCTURAS FUNCIONALES.....	19
1.3.1.- COMPLEJO ARTICULAR PERIASTRAGALINO	19
1.3.2.- TOBILLO	19
1.3.3.- PIE	20
1.3.4.- TALÓN	21
1.3.5.- BOBEDA PLANTAR (EXCAVACIÓN TARSOMETATARSIANA)	23
1.3.6.- EMINENCIA DIGITOPANTAR (ANTEPIÉ).....	26
1.3.7.- APONEUROSIS PLANTAR Y CÁPSULAS ARTICULARES	27
2.- CICLO DE LA MARCHA HUMANA.....	29

Escuela Universitaria de Ing. Técnica Industrial de Zaragoza	ANEXO I	Carlos Fernández Manchado	
		Total nº: 32 Hoja nº: 3	FECHA 5/5/2010

1.- ANATOMIA DEL PIE

Para facilitar la comprensión de lo que se va a tratar en este proyecto se expone a continuación un breve resumen de las partes y tipos de componentes que forman el pie humano ([1], [2]) atendiendo al tipo de tejido podemos diferenciar los siguientes grupos:

1. Óseo
2. Muscular
3. Tendinoso
4. Nervioso
5. Sanguíneo

Para los casos a tratar se han suprimido (por no ser de utilidad en este proyecto) el conjunto de vasos sanguíneos que pasan por el pie. Se dejará de lado la introducción anatómica del grupo muscular ya que para este proyecto los músculos del pie serán obviados debido a que estructuralmente no son relevantes.

1.1.- EL PIE OSEO

El pie tiene **26 huesos**, a los que se añaden una cantidad variable de huesos sesamoideos y accesorios. Unidos entre sí por medio de ligamentos, constituirán articulaciones variables en su configuración y grados de movilidad, cuya estabilidad y congruencia aseguran unos ligamentos de interconexión, reforzando las cápsulas articulares.

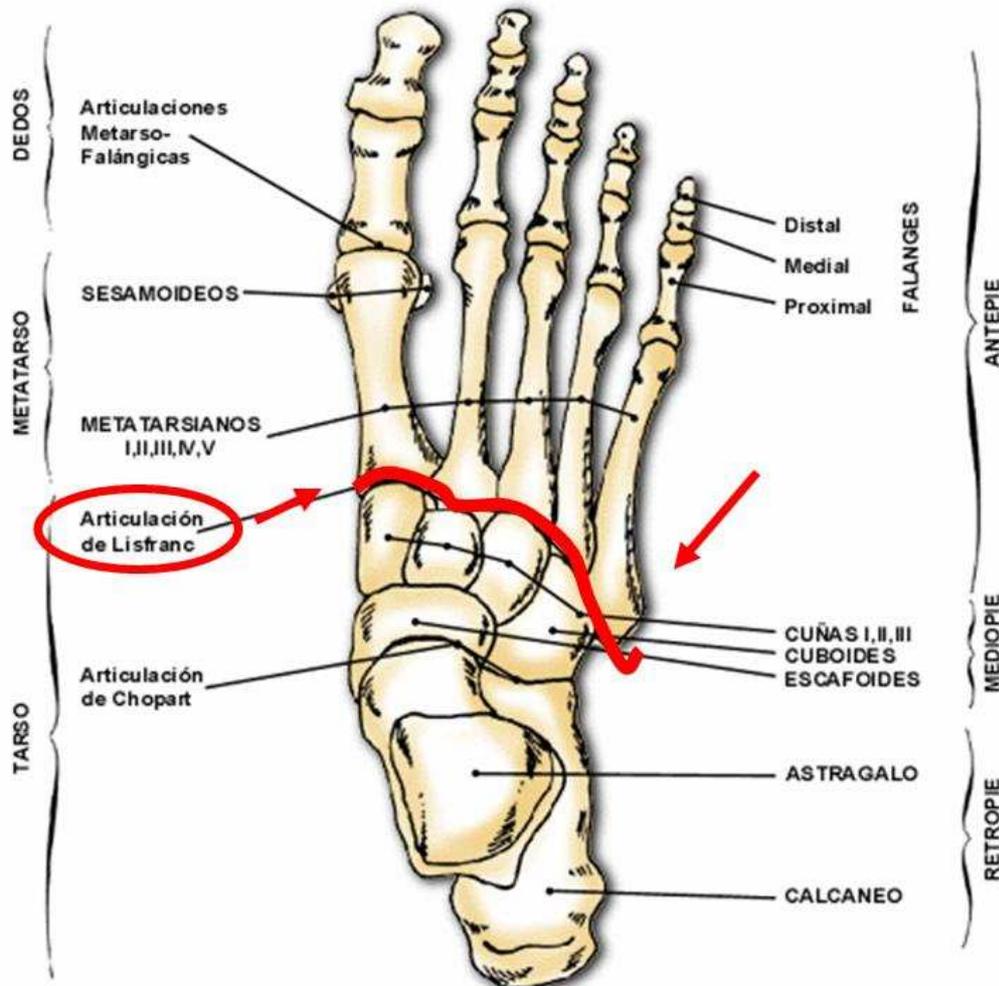


Fig. 1.1: Vista dorsal de los huesos del pie

Son **14 las piezas óseas que constituyen los dedos**, y 3 de ellas, denominadas 1ª, 2ª y 3ª falanges, contribuyen a la construcción de los cuatro dedos laterales. El dedo gordo consta únicamente de 2 falanges. Las falanges que constituyen los dedos también se denominarían (en orden desde su articulación con los metatarsos) falange proximal, medial y distal. El dedo gordo solo contaría con falange proximal y distal.

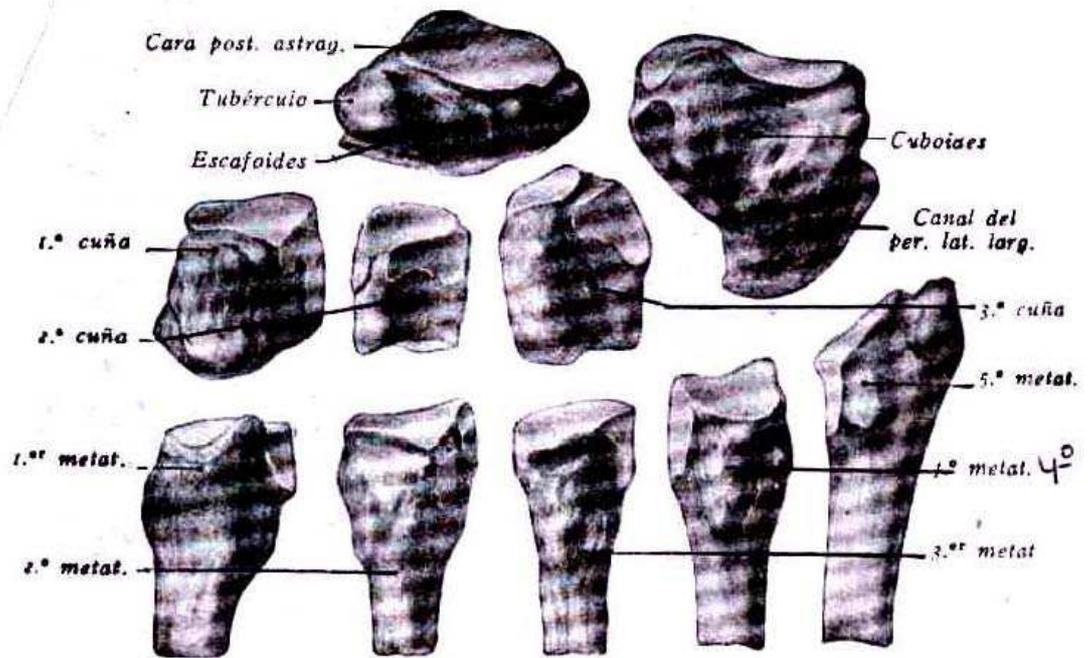


Fig. 1.2: Vista dorsal de los huesos del tarso

De los 12 huesos restantes, **7 constituyen el tarso y 5 el metatarso** (de dorsal a ventral). El tarso lo forman el astrágalo, el calcáneo, el escafoides y el cuboides y las 3 cuñas. El metatarso lo forman 5 huesos largos denominados metatarsianos, que se designan con los números ordinales, del primero al quinto, considerados de medial a lateral.

El pie, desde una visión superior en el plano horizontal, aparece con sus elementos óseos posteriores agrupados en 2 columnas superpuestas formadas por el astrágalo y el calcáneo. De ellas emergen 2 hileras óseas contiguas que divergen progresivamente en sentido ventral: una interna, formada de atrás hacia adelante por el astrágalo, el escafoides, las 3 cuñas y los 3 primeros metatarsianos; otra externa, formada por el calcáneo, el cuboides y los 2 últimos metatarsianos. Estas dos hileras se sitúan una al lado de otra en la posición media y anterior del pie (pie astragalino y pie calcáneo), y superpuestas, como se ha dicho anteriormente en la posterior.

Solamente un hueso del pie (el astrágalo) se articula con los huesos de la pierna, hecho que, unido a la disposición descrita, explica que la cara inferior del pie no sea plana, sino cóncava de delante hacia atrás. Así mismo, los metatarsianos y

cuñas tampoco forman un apoyo plano en sentido transversal, sino cóncavo. Esta concavidad que presenta el pie en ambos sentidos es la llamada “bóveda plantar”.

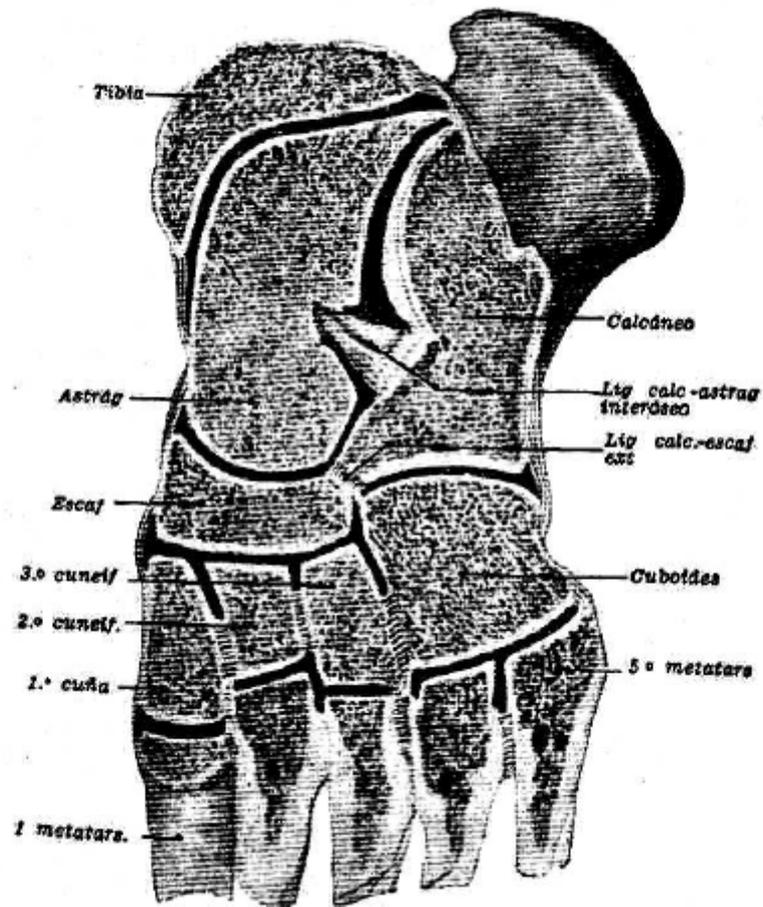


Fig. 1.3: Sección oblicua de los huesos del pie, en que se muestran las articulaciones del tarso v metatarso

Escuela Universitaria de Ing. Técnica Industrial de Zaragoza	ANEXO I	Carlos Fernández Manchado	
		Total n°: 32 Hoja n°: 7	FECHA 5/5/2010

1.2.- ARTORLOGÍA

La disposición que presentan los huesos del pie muestra que el astrágalo está situado entre los huesos de la pierna y los del pie y, como consecuencia, interviene de una forma decisiva en los movimientos de este, mediante una articulación compleja que se denomina articulación del tobillo. En ella coexisten 2 articulaciones: una supraastragalina, mediante la cual el astrágalo se articula con los huesos de la pierna, y otra subastragalina, mediante la cual se articula con los restantes huesos del tarso.

Existen otras articulaciones entre los restantes huesos del pie cuya intervención en los movimientos de éste es muy escasa, desempeñando en cambio un papel muy importante en sus mecanismos de resistencia y elasticidad.

Por último la bóveda plantar se basa en la existencia de una infraestructura o armazón óseo “en mosaico”, agrupado en una serie de unidades funcionales articulares o complejo articular periastragalino. Dicho complejo lo forman las articulaciones tibioperoneoastragalina, subastragalina y mediotarsiana.

1.2.1.- ARTICULACIÓN DEL TOBILLO

Es una unidad funcional integrada por la suma de varias articulaciones morfológicamente independientes. Una articulación supraastragalina, **tibioperoneoastragalina** o cámara proximal, dados los huesos que la forman, y otra **subastragalina** o cámara distal, subdividida en dos: la subastragalina anterior o astragalocalcaneoescafoidea.

Articulación tibioperoneoastragalina

La articulación tibioperoneoastragalina de la garganta del pie o del tobillo comprende una trocleartrosis y una sindesmosis.

- Sindesmosis tibioperonéa

Esta sindesmosis o articulación tibioperonea distal está reforzada por 2 potentes ligamentos (anterior y posterior) que parecen continuar la membrana interósea. Es una articulación de gran relevancia funcional a causa de la diferencia de anchura anteroposterior de la polea astragalina; permite cierta separación entre la tibia y el peroné durante los movimientos de flexoextensión, más el movimiento de rotación del peroné.

Escuela Universitaria de Ing. Técnica Industrial de Zaragoza	ANEXO I	Carlos Fernández Manchado	
		Total n°: 32 Hoja n°: 8	FECHA 5/5/2010

Articulación tibioastragalina

Pertenece al género de las articulaciones en polea. La forman las extremidades distales de los huesos de la pierna, constituyendo la mortaja articular tibioperonea para el cuerpo del astrágalo. Por parte de la tibia intervienen dos superficies articulares:

- La cara inferior de su extremidad distal, con su superficie articular en negativo de polea, más amplia por delante que por detrás; se articula con la cara superior del cuerpo del astrágalo, y
- La segunda superficie articular de la tibia, labrada en la cara externa del maléolo tibial para la correspondiente superficie articular de la cara interna del cuerpo astragalino. Se dice que ambas superficies articulares tienen forma de coma.

El peroné forma parte de la articulación por medio de la superficie de su maléolo, que presenta en su cara interna una superficie articular, para articularse con la faceta que ofrece la cara externa del cuerpo del astrágalo. La cápsula se fija en el contorno de las superficies articulares, excepto en su parte anterior, que queda algo más alejada. Es laxa por su parte anterior y posterior y apretada lateralmente.

La articulación está reforzada lateral y medialmente por los ligamentos lateral externo (con sus tres componentes, peroneoastragalino anterior, posterior y peroneocalcáneo) e interno o deltoideo. Contribuyen además a sostener firmemente el talón en la articulación tibioperoneoastragalina. Es importante señalar que los maléolos actúan también como ligamentos laterales, descendiendo más el peroneo que el tibial. La sinovial tapiza la cara interna de la cápsula, constituyendo por delante y por detrás los fondos de saco anterior y posterior. Suele presentar una prolongación que se introduce poco más de 1 cm entre la tibia y el peroné.

Escuela Universitaria de Ing. Técnica Industrial de Zaragoza	ANEXO I	Carlos Fernández Manchado	
		Total n°: 32 Hoja n°: 9	FECHA 5/5/2010

Articulación subastragalina

Constituida por dos articulaciones morfológicamente independientes, pero que funcionalmente se movilizan por intermedio de un eje común para ambas. Clásicamente se describen 2 cámaras articulares: una cámara posterior o astragalocalcánea y otra anterior o astragalocalcaneoescafoidea, que morfológicamente son articulaciones de tipo trocoide y enartrosis, respectivamente. Al superponerse el astrágalo sobre el calcáneo se enfrentan entre sí las ranuras astragalina y calcánea, quedando así constituido el denominado seno del tarso que separa ambas cámaras articulares.

Ocupando el seno del tarso, se encuentra el ligamento astragalocalcáneo o interóseo, que une ambos huesos entre sí. Sus fascículos son de mayor longitud en su parte anterior y se adaptan a la forma del seno. Las fibras ligamentosas se orientan en dos planos (anterior y posterior), y entre ambos hay planos de grasa e incluso una bolsa serosa. Pueden considerarse como dos ligamentos para cada una de las articulaciones subastragalinas: las fibras posteriores forman el ligamento anterior de la articulación astragalocalcánea y las anteriores, el ligamento posterior de la articulación astragalocalcánea y las anteriores, el ligamento posterior de la articulación astragalocalcaneoescafoidea.

- Articulación astragalocalcánea

Se denomina también astragalocalcánea posterior o posteroidal del tobillo. Las carillas son, por parte del astrágalo, la superficie articular calcánea posterior, es decir, la que se labra en la cara inferior del cuerpo del astrágalo. Es de forma ovalada, fuertemente cóncava según su eje mayor, dirigido hacia delante y hacia fuera. Por parte del calcáneo interviene su carilla denominada superficie articular astragalina posterior, que es un segmento de cilindro macizo adaptado a la superficie astragalina. Desde el punto de vista morfológico, la articulación se incluye dentro de las trocoides.

Como corresponde a toda diartrosis, presenta una cápsula insertada en las proximidades de las superficies articulares, con su correspondiente sinovial. La cápsula se encuentra reforzada por ligamentos, denominados astragalocalcáneos: a) anterior, que no es sino el plano posterior del ligamento interóseo del seno del tarso, ya descrito; b) posterior, formado por fibras que se extienden desde el tubérculo posteroexterno del astrágalo a la cara posterior del calcáneo; c)

Escuela Universitaria de Ing. Técnica Industrial de Zaragoza	ANEXO I	Carlos Fernández Manchado	
		Total n°: 32 Hoja n°: 10	FECHA 5/5/2010

astragalocalcáneo externo, que sigue la misma dirección que el peroneocalcáneo, pero situándose por delante de este, y d) astragalocalcáneo interno, que cierra por dentro el seno del tarso, constituyéndose a partir de fibras del ligamento deltoideo que se insertan en la apófisis menos del calcáneo.

- **Articulación subastragalina anterior**

La segunda, o cámara anterodistal, es una enartrosis. Desde un punto de vista funcional ha sido llamada articulación distal del tobillo. La cabeza del astrágalo se aloja en una cavidad denominada por algunos autores, acetabulum pedis, contribuyendo a formar una enartrosis. El techo de dicho acetábulo lo forma el ligamento astragalocalcaneoescafoideo dorsal y el repliegue capsular, mientras que el fondo corresponde a la superficie articular dorsal del escafoides. El suelo está constituido por las superficies articulares anterior y media del calcáneo y por el ligamento calcaneoescafoideo plantar, cuya cara superior (que forma parte de la cavidad articular descrita) se encuentra revestida del cartílago hialino, hecho este que da robustez a la articulación, siendo comparable a un rodete glenoideo. La pared medial está constituida por el ligamento calcaneoescafoideo superior y medial; la pared lateral, por el ligamento calcaneoescafoideo lateral (rama del ligamento bifurcado) y por el repliegue capsular. La cápsula articular se inserta en los límites de las superficies articulares, con excepción de la cara dorsal del escafoides y del cuello del astrágalo, donde se inserta a cierta distancia del revestimiento cartilaginoso de estos.

Esta articulación se sitúa en la zona de cruce de las 2 columnas óseas del pie, contribuyendo de manera importante a su forma. Está reforzada por un auténtico nudo o dispositivo ligamentoso formado por los tendones de los músculos tibial posterior, flexor largo de los dedos y flexor largo del dedo gordo.

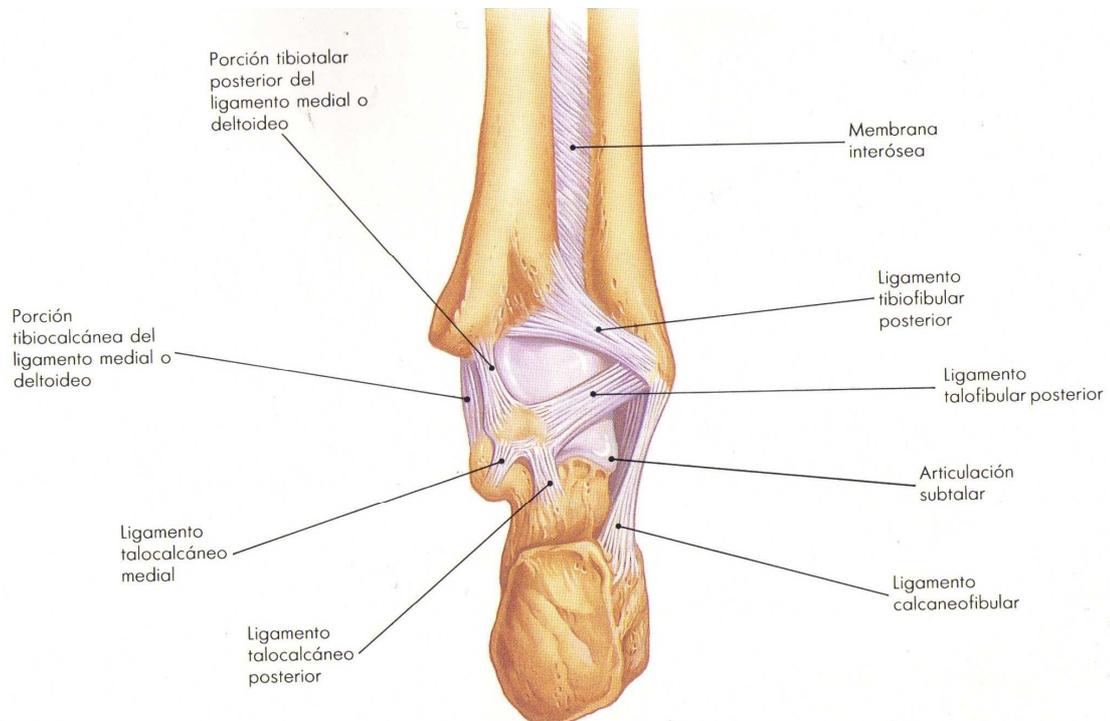


Fig 1.4: Vista posterior de la articulación del tobillo

1.2.2.- ARTICULACIÓN MEDIOTARSIANA O DE CHOPART

Término más quirúrgico que morfológico, define la interlínea articular formada por la doble unión que constituyen las articulaciones de los huesos de la primera fila del tarso con los de la segunda. Dicha interlínea (articulación mediotarsiana o de Chopart) tiene en su conjunto forma de 'S' tumbada, convexa hacia atrás en la parte externa de la línea o articulación calcaneocuboidea, y cóncava en el mismo sentido de la parte interna de la línea o articulación astragaloescafoidea.

Ambas articulaciones tienen un ligamento común, el denominado ligamento clave de la articulación de Chopart, ligamento en 'Y' o 'V', el cual es necesario cortar para desarticular el pie a este nivel. Está situado en el espacio comprendido entre la apófisis mayor del calcáneo, el cuboides y el escafoides. Se inserta por un origen común en la apófisis mayor del calcáneo y otro para el cuboides.

La articulación calcaneocuboidea, de tipo selar, se moviliza más en combinación con la subastragalina que con la astragaloescafoidea. La

refuerzan, además del ligamento en 'Y', los ligamentos calcáneo-cuboideos y los ligamentos (corto y largo) plantares. El tendón del músculo peroneo lateral largo colabora activamente en su estabilización. La sinovial de esta articulación es independiente.

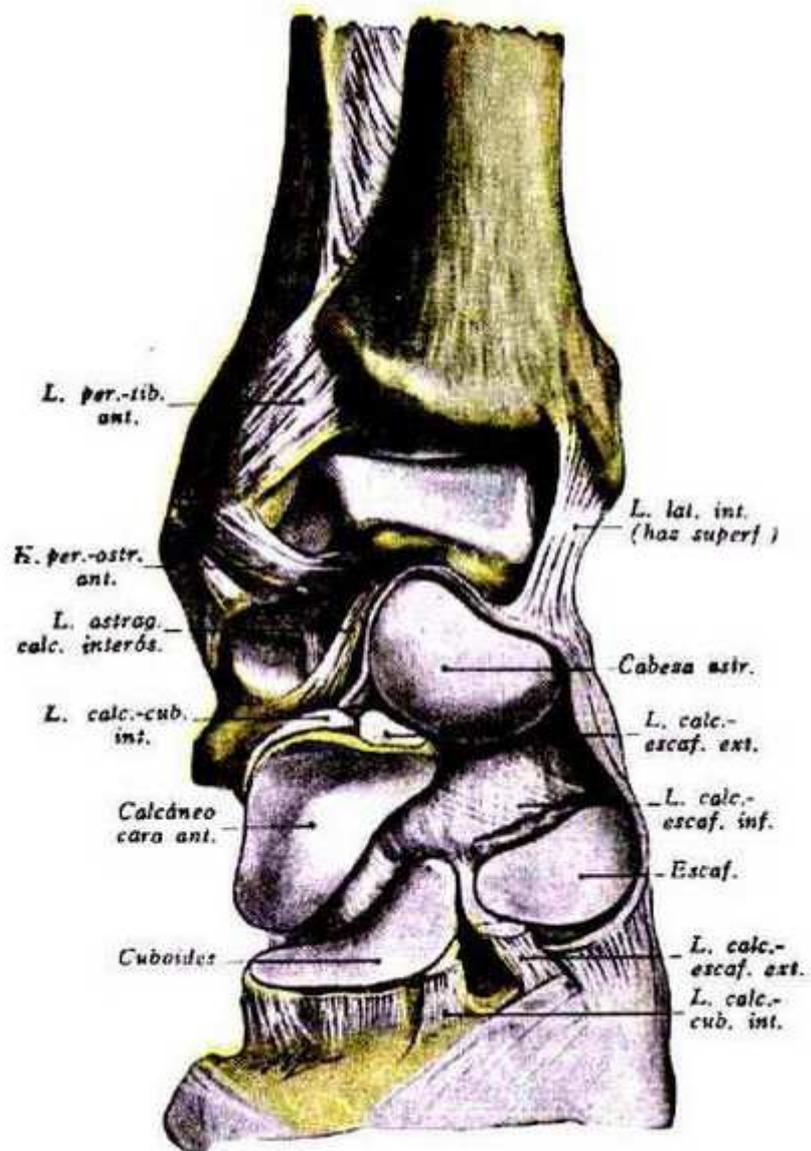


Fig 1.5: Superficie articular de Chopart

Escuela Universitaria de Ing. Técnica Industrial de Zaragoza	ANEXO I	Carlos Fernández Manchado	
		Total nº: 32 Hoja nº: 13	FECHA 5/5/2010

1.2.3.- ARTICULACIONES DEL TARSO ANTERIOR

Las articulaciones del tarso anterior y del tarso con el metatarso (escafoideoscuneales, intercuneales, escafoideocuboidea, etc.) constituyen un grupo de artrodias por sus superficies articulares, si bien por su función se trata de anfiartrosis desprovistas de movimientos activos. Existen cavidades sinoviales, generalmente comunicadas o bien separadas por ligamentos interóseos. Por su parte, las articulaciones tarsometatarsianas están reforzadas por ligamentos dorsales y plantares que, a partir del segundo metatarsiano (ligamentos dorsales) y de la primera y tercera cuñas (plantares), se irradian en abanico. La articulación tarsometatarsiana del segundo radio se encuentra retranqueada dentro del mediopié, constituyéndose en la llave de la configuración de la interlínea articular, ya que al ser más rígida, también es más estable en relación con el primer radio y los tres laterales.

- *Articulaciones escafoidecuneiformes.* Se establecen entre la cara anterior del escafoides (dividida en sus 3 superficies articulares) y la cara posterior de las cuñas. Ligamentos dorsales y plantares refuerzan estas articulaciones.
- *Articulación escafoideocuboidea.* Se establece entre la parte externa del escafoides y la interna del cuboides, por detrás de la que existe para la tercera cuña. Existen tres ligamentos de refuerzo: plantar, dorsal e interóseo.
- *Articulaciones intercuneiformes.* Son 2: una entre la primera y la segunda cuña y otra entre la segunda y la tercera. Están reforzadas por un ligamento dorsal para cada articulación, por uno plantar entre la primera y la segunda, y por otro interóseo, situado entre cada 2 cuñas.
- *Articulación cuboideocuneiforme.* Se encuentra situada entre la cara externa de la tercera cuña y la interna del cuboides. Dispone de 3 ligamentos de refuerzo: plantar, dorsal e interóseo.

Escuela Universitaria de Ing. Técnica Industrial de Zaragoza	ANEXO I	Carlos Fernández Manchado	
		Total nº: 32 Hoja nº: 14	FECHA 5/5/2010

1.2.4.- ARTICULACIONES INTERMETATARSIANAS

Las extremidades proximales de estos huesos se articulan entre sí por medio de artrodias. Generalmente el primero no se articula con el segundo. Los demás se articulan entre sí, presentando su correspondiente cápsula revestida por sinovial. Se encuentran reforzadas por ligamentos plantares, dorsales e interóseos. Presentan escasos movimientos. Básicamente son de deslizamiento y pasivos.

1.2.5.- ARTICULACIÓN TARSOMETATARSIANA O DE LISFRANC

Es la que se establece entre la extremidad proximal de los metatarsos y la distal del tarso, es decir, con el cuboides y las 3 cuñas. El primer metatarso se articula con la primera cuña. El segundo se introduce entre los huesos del tarso, de manera que se articula proximalmente con la segunda cuña y lateralmente con la primera y tercera cuñas. Los metatarsos cuarto y quinto se articulan con el cuboides. De esta manera existe entre el tarso y el metatarso un auténtico engranamiento.

En conjunto, la línea articular no es una línea recta, si no oblicua por detrás y por fuera, fácilmente determinable. En el lado interno tomamos, como puntos de referencia, un través de dedo por delante del tubérculo del escafoides. Lateralmente, es el tubérculo del quinto metatarso el punto que se ha de delimitar. Por otra parte, la línea no es recta, sino quebrada, de tal forma que el segundo metatarso, como ya se ha indicado se hunde en el tarso y la tercera cuña penetra en el metatarso.

Desde el punto de vista anatómico existen en la articulación de Lisfranc 3 articulaciones con 3 cavidades sinoviales: la primera articulación es la de la primera cuña con el primer metatarsiano; la segunda se establece entre la segunda y tercera cuñas con los metatarsianos del mismo orden; la tercera se forma entre el cuboides y los metatarsianos cuarto y quinto.

Existen unos ligamentos de refuerzo dorsales, plantares e interóseos. Los ligamentos interóseos, con interés quirúrgico son tres, y unen las cuñas con los metatarsos (interno, intermedio y externo). El interno, denominado de Lisfranc o ligamento clave de la articulación tarsometatarsiana, es muy potente; une la cara externa de la primera cuña con la interna del segundo metatarso y debe seccionarse para realizar el correspondiente tiempo en las amputaciones.

Todas estas articulaciones realizan pequeños movimientos pasivos de deslizamiento. Tienen una gran importancia en la deambulación, especialmente en la marcha por terreno accidentado, pues gracias a ellas el pie es capaz de adaptarse al terreno, lo que sería imposible si fuese rígido.

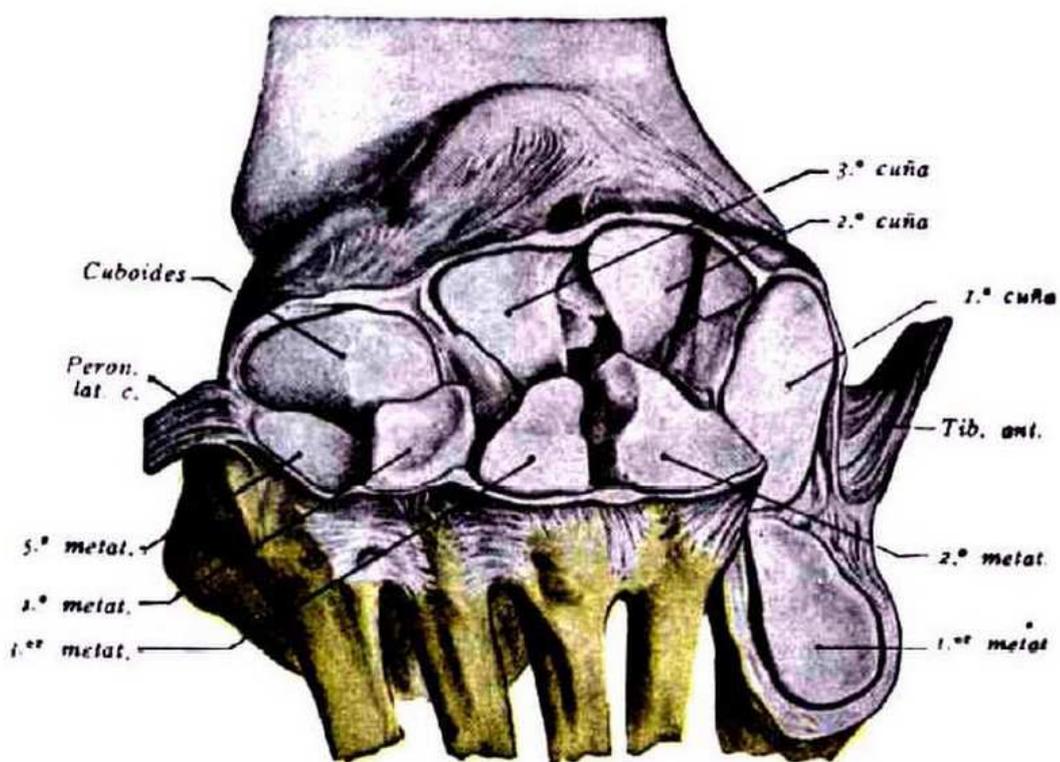


Fig 1.6: Articulación tarsometatarsiana o de Lisfranc

1.2.6.- LIGAMENTO CALCANEOCUBOIDEO O GRAN LIGAMENTO PLANTAR

Toma inserción en la cara inferior del calcáneo, constituyendo un plano fibroso fuerte, nacarado, que se dirige hacia delante. Las fibras más profundas se insertan en la cresta de la cara inferior del cuboides, en tanto que las más superficiales siguen hacia delante y van a finalizar en la extremidad proximal de los 4 últimos metatarsianos. Estas fibras constituyen un túnel osteofibroso para el tendón del peroneo lateral largo. Este ligamento forma un plano fibroso que une entre sí los huesos del tarso y los del tarso con los del metatarso.

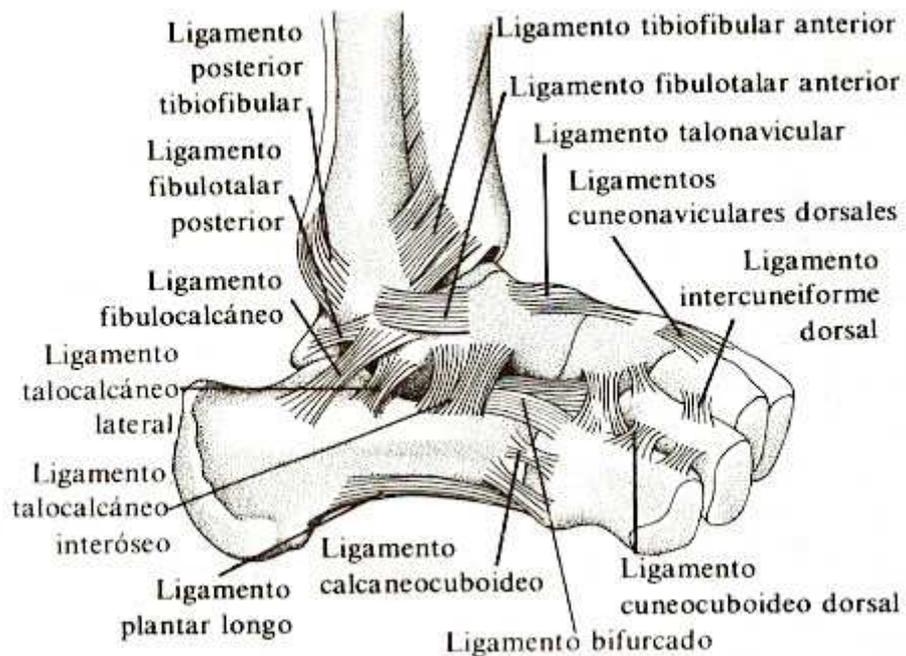


Fig. 1.7: Principales ligamentos del tarso

Escuela Universitaria de Ing. Técnica Industrial de Zaragoza	ANEXO I	Carlos Fernández Manchado	
		Total n°: 32 Hoja n°: 17	FECHA 5/5/2010

1.2.7.- ARTICULACIONES METATARSOFALÁNGICAS

Son enartrosis. La del primer dedo se diferencia de las restantes. Las superficies articulares corresponden, por parte del metatarsiano, a la cabeza articular, que en los 4 últimos dedos está aplastada transversalmente y con una carilla articular mucho más extensa en la cara plantar que en la dorsal. A su vez, las falanges están ensanchadas plantarmente en su cavidad glenoidea por un fibrocartilago. La articulación del primer dedo presenta 2 sesamoideos en su cara plantar, unidos entre sí por un ligamento. En ellos se inserta la musculatura flexoaductora corta del primer radio, conformando un auténtico 'sistema glenosesamoideo'. La cápsula se inserta dorsalmente en el contorno de revestimiento cartilaginoso. En la cara plantar, por el contrario, se inserta a distancia. Existen unos ligamentos de refuerzo laterales (interno y externo), que toman inserción en los tubérculos laterales de los metatarsianos y, ensanchándose, se fijan en los tubérculos de las falanges y en los bordes del fibrocartilago glenoideo. El ligamento transversal del metatarso, a manera de una larga cinta, se extiende transversalmente, uniendo entre sí la cabeza de todos los metatarsianos laterales.

1.2.8.- ARTICULACIONES INTERFALÁNGICAS

Pertenece al género de la trocleares. Hay una en el dedo gordo y 2 en las restantes (interfalángicas proximal y distal). La cápsula y los ligamentos de estas articulaciones tienen la misma disposición que en las metacarpofalángicas de la mano.

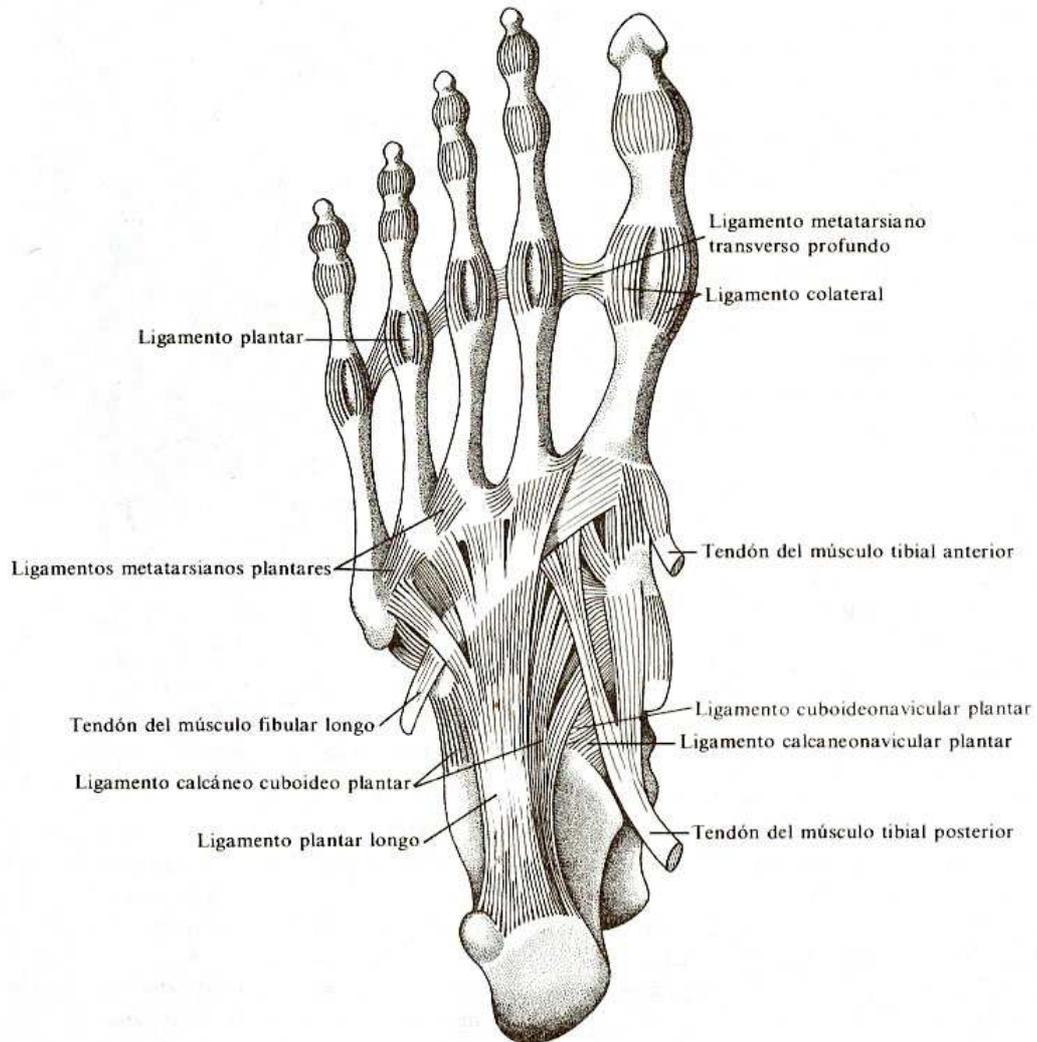


Fig. 1.8: Vista plantar de las articulaciones del pie y sus ligamentos

Escuela Universitaria de Ing. Técnica Industrial de Zaragoza	ANEXO I	Carlos Fernández Manchado	
		Total n°: 32 Hoja n°: 19	FECHA 5/5/2010

1.3.- BIOMORFOLOGÍA: ESTRUCTURAS FUNCIONALES

1.3.1.- COMPLEJO ARTICULAR PERIASTRAGALINO

El tobillo y el pie constituyen una unidad ontogénica, morfofuncional y clínica que es preciso considerar integrada en la cadena cinemática del miembro inferior, de la cual constituyen el eslabón distal. Este hecho exige una suerte de superestructura que, englobando diferentes unidades articulares y formaciones hísticas, proporcione al pie posibilidades no ya de resistencia y flexibilidad, sino, muy especialmente, de suplencia. Esta superestructura existe y es el complejo articular periastragalino, que engloba las articulaciones tibioperoneoastragalina, mediotarsiana y tarsometatarsiana.

El complejo articular periastragalino existe tanto estructural como funcionalmente, pero sobre todo responde a la necesidad formal de dar una solución mecánica a un diseño concebido para asumir muy distintas exigencias en situaciones de carga y de descarga. En este sentido, y a partir del concepto ya expresado de unidad del tobillo y pie, entendemos que las alteraciones o trastornos que afectan a alguno de sus componentes terminan por dañar indefectiblemente todo el conjunto, hecho este tanto más cierto cuanto más proximal sea la lesión. Curiosamente, la unidad tobillo-pie presenta especial resistencia a desarrollar procesos degenerativos generalizados (fuera de las afecciones sistémicas). Dicha unidad requiere, como sustrato morfológico, la existencia de estructuras funcionales que, integradas, expliquen la fisiopatología del pie.

1.3.2.- TOBILLO

La articulación tibioperoneoastragalina se configura anatómica y funcionalmente de manera que su componente distal, el astrágalo, se moviliza por intermedio de su cara superior (en forma de polea o tróclea) en el interior de un marco (o mortaja tibioperonea) formado por 2 huesos cuya unión tiene lugar mediante una sindesmosis. La estabilidad articular se mantendrá básicamente por la configuración de las carillas articulares, por el sistema ligamentario (medial y lateral) y por la cápsula articular y ligamentos interóseos.

Se trata de una articulación de tipo troclear, que se verá reforzada por un sistema de contención ósea y de retención capsuloligamentosa, con objeto de impedir los movimientos de varo y valgo del astrágalo dentro de la

Escuela Universitaria de Ing. Técnica Industrial de Zaragoza	ANEXO I	Carlos Fernández Manchado	
		Total nº: 32 Hoja nº: 20	FECHA 5/5/2010

mortaja tibioperonea. El astrágalo queda encerrado en un círculo o aro elástico cuyos topes óseos los forman la pinza maleolar, el pilón tibial y la articulación subastragalina, en tanto que la sindesmosis tibioperoneal, los ligamentos de la articulación tibioperoneoastragalina y la cápsula articular constituyen el cierre elástico de tal mecanismo.

De los fascículos del ligamento lateral externo, el **peroneoastragalino anterior** limita el desplazamiento posterior de la pierna, transmitiendo su tensión rotadora externa al astrágalo. El ligamento peroneocalcáneo en extensión adopta una dirección vertical y actúa como un verdadero ligamento lateral del tobillo al impedir el deslizamiento del astrágalo. Por su parte, el **ligamento peroneoastragalino posterior** abraza el astrágalo dorsalmente, con lo que limita la extensión del pie y el desplazamiento anterior de la pierna, contribuye a resistir la rotación externa del astrágalo en la mortaja y ayuda a transmitir la fuerza rotacional interna de la pierna a éste. El ligamento lateral interno (o deltoideo), al igual que sucede con la membrana interósea, contribuye a mantener la estabilidad transversal del tobillo. La sección aislada del fascículo superficial origina una pequeña inestabilidad tibiotarsiana, con aparición de cajón rotatorio externo. La sección de ambos fascículos producirá una importante inestabilidad; el movimiento de cajón anterior se exagerará (aún más en equino) y el valgo de retropié hará bascular el astrágalo fuera de la mortaja.

1.3.3.- **PIE**

Es la parte más distal del cuerpo humano, que sirve de soporte esencial para la disposición humana de ortostatismo. Es preciso estudiar el pie en carga y en descarga para poder explicar mejor sus cambios de forma y su capacidad de adaptación funcional. Las fuerzas desarrolladas en el cuerpo humano se transmiten por el pie al suelo; por otra parte, el diseño del pie exige la suficiente elasticidad para acomodarse a los cambios de orientación de las superficies de carga y a sus irregularidades. Dichos cambios y adaptaciones se producen merced a la existencia de unas «formas funcionales». Estas formas son el talón, la bóveda plantar y la eminencia digitoplantar.

Escuela Universitaria de Ing. Técnica Industrial de Zaragoza	ANEXO I	Carlos Fernández Manchado	
		Total nº: 32 Hoja nº: 21	FECHA 5/5/2010

1.3.4.- TALÓN

Es la región posterior y plantar del pie. Está conformada básicamente a expensas del calcáneo e informa de la orientación espacial del pie con respecto a la pierna. Junto con la bóveda plantar forma la parte más característica del pie humano. Constituye una zona de transición mecánica entre la pierna y el antepié, diseñada morfológicamente para el apoyo estático y funcionalmente para la propulsión dinámica. La línea del talón se corresponde con la posición del calcáneo en el plano frontal. Su desviación respecto de la línea de la pierna (o de Helbing) define su alineación en valgo o varo.

Desde el punto de vista filogenético se advierte una clara evolución en la forma de apoyo del pie, derivada del tipo de apoyo y marcha desarrollados por cada especie (arborícolas, plantígrados, etc.) y cuya manifestación morfológica estará constituida por la progresiva orientación del calcáneo hasta adoptar la definitiva.

La almohadilla plantar cumple un papel fundamental en el apoyo y reparto de fuerzas del talón. Su mayor o menor grosor, así como el mantenimiento de sus propiedades mecánicas, son signos del correcto apoyo plantar. Su espesor se puede medir mediante xerorradiografías o resonancia magnética. Se ha comprobado un aumento de espesor de la almohadilla grasa en afecciones diversas, como acromegalia, edema generalizado, obesidad o acropaquía tiroidea; por el contrario, se produce una disminución con la edad, a veces, secundariamente a traumatismos. La grasa (almohadilla) plantar es una estructura altamente especializada en la que hay componentes neuronales, vasculares fibrosos y elásticos entrelazados con células adiposas. Histológicamente la almohadilla grasa subcalcánea se estructura en una matriz de tejido conectivo fibroso elástico organizado en tabiques que contienen paquetes apretados de células grasas. En el adulto, el grosor medio de la grasa plantar es de 18 mm. El grosor de la grasa bajo las cabezas de los metatarsianos disminuye progresivamente del primero al quinto (de 15 a 10 mm). Tiene un comportamiento viscoelástico no lineal, y se mantiene prácticamente constante en todas las zonas del talón.

El índice de compresibilidad y el módulo elástico es más elevado bajo la cabeza del primer metatarsiano (55,9% y 1,39 kg/cm²) y menor bajo la cabeza del quinto (50,8% y 1,23 kg/cm²). La suela grasa bajo el quinto metatarsiano tiene mayor relación de disipación de energía (33,7%) y amortigua menos. La grasa plantar bajo el calcáneo está sujeta a

Escuela Universitaria de Ing. Técnica Industrial de Zaragoza	ANEXO I	Carlos Fernández Manchado	
		Total nº: 32 Hoja nº: 22	FECHA 5/5/2010

compresión cíclica y tiene un comportamiento resiliente, es decir, devuelve un 70% de la energía utilizada para deformarla. Se modifica poco por los cambios de frecuencia, pero una disminución de la temperatura de 37 a 10° produce un importante aumento de la energía disipada al hacerse más rígida.

La almohadilla plantar degenera gradualmente con la edad y el peso su grosor, índice de compresibilidad y módulo elástico; con lo que la relación de disipación de energía aumenta. La pérdida de la elasticidad de la almohadilla plantar se ha sugerido como una de las causas del dolor en el talón, debido a la disminución de su capacidad de absorción de cargas y, secundariamente, al aumento de la presión local.

La *función de la almohadilla plantar es la de absorber el choque del talón* y permitir su rodamiento sobre el suelo. Se calcula que absorbe entre el 20 y el 25% de la fuerza recibida durante la fase de contacto del talón con el suelo. Durante la carrera, los picos de fuerza pueden ser entre 9 y 13,3 veces el peso del cuerpo.

Sistema calcáneo-aquileo-plantar

En el plano sagital, además del ligamento interóseo subastragalino, que impide el deslizamiento del astrágalo hacia delante del calcáneo, la estabilidad del talón se mantiene por el sistema calcáneo-aquileo-plantar. Está constituido por el tendón de Aquiles, el sistema trabecular posteroinferior del calcáneo y la parte de los músculos cortos del pie, especialmente el flexor corto plantar y el abductor del dedo gordo. Dicho sistema es definido como una unidad funcional, que sirve para colocar el pie en posición de puntillas, básica en la fase de despegue de la marcha normal y necesaria para movimientos como la carrera, el salto o la danza. Para cumplir dicha función, el sistema cuenta con el tendón de Aquiles, el más voluminoso y potente del cuerpo humano (5-6 cm de longitud, 12-15 mm de anchura y un grosor de 5-6 mm). Clásicamente descrito como poco vascularizado. Asimismo, la zona de inserción del tendón en el calcáneo presenta una distribución vascular especial y abundante, que indica la existencia de un área sometida a grandes exigencias mecánicas.

El sistema aquileo-calcáneo-plantar cumple las siguientes funciones:

- *De suspensión:* Inserciones en suspensión de las aponeurosis plantares al esqueleto óseo.
- *De sostén:* La superposición astragalocalcánea y el arco calcaneometatarsiano necesitan elementos de sostén pasivos que

Escuela Universitaria de Ing. Técnica Industrial de Zaragoza	ANEXO I	Carlos Fernández Manchado	
		Total nº: 32 Hoja nº: 23	FECHA 5/5/2010

descarguen los músculos. Éstos son el ligamento calcaneocuboideo plantar y la aponeurosis plantar, a distancia.

- *De adherencia al suelo:* Por medio de la almohadilla plantar, que asegura una óptima transmisión de fuerzas de tracción y de cizallamiento sin pérdida de rendimiento mecánico.
- *De propulsión:* Su acción se prolonga al final del desarrollo del paso en el flexor propio del dedo gordo. En definitiva, permite la intervención del tríceps sural en continuidad con la aponeurosis plantar sobre el triángulo dinámico o de impulsión del pie. (Clásicamente se define un triángulo posterior del pie, de apoyo, y otro anterior, dinámico o de propulsión.)

1.3.5.- **BOBEDA PLANTAR (EXCAVACIÓN TARSOMETATARSIANA)**

Desde un punto de vista arquitectural se puede definir como una bóveda sostenida por 3 arcos, sujetos al suelo por 3 puntos dispuestos sobre el plano horizontal en los vértices de un triángulo. Los arcos se tienden entre 2 apoyos consecutivos con un punto cenital o clave de bóveda, desde donde las fuerzas se reparten a través de los arbotantes, también llamados «estribos del arco». En el pie humano, el cenit se sitúa en la articulación astragaloescafoidea, a unos 15-18 mm del suelo, y el reparto de carga se realiza por medio de los metatarsianos, que extendidos a modo de radios, se elevan desigualmente del plano de apoyo (15-18° el primer radio y, en sentido decreciente, 15, 10, 8 y 5° los siguientes).

Pueden distinguirse:

- Un arco posterior, formado por la parte anterior del ensamblaje de las 3 cuñas y el cuboides, y por la parte proximal de las bases de los metatarsianos. Estático, transmisor de presiones, da cobertura a las partes blandas y condiciona la alineación metatarsiana.
- Un arco anterior, de flecha más corta, constituido por las cabezas de los 5 metatarsianos. Dinámico, elástico, regula presiones y actúa como bisagra en el despegue.

La excavación que ambos arcos configuran no es regular y presentan diferentes alturas en relación con el suelo de cada uno de los componentes. El arco posterior es más elevado, hecho que está determinado por la oblicuidad del eje calcáneo, en tanto que el arco anterior disminuye progresivamente debido a la oblicuidad de los ejes metatarsianos y al

ángulo de incidencia de éstos contra el suelo, como ya se ha indicado. Es una zona de encrucijada entre el pie astragalino (de marcha, o dinámico) y el pie calcáneo o estático.

Los 5 radios del pie presentan distinta movilidad. El más móvil y potente, por la musculatura que en él se inserta, es el primero seguido del quinto, en tanto que el cuarto metatarsiano, por su articulación con el cuboides, es el más rígido.

¿Cómo se comporta el antepié ante las diferencias exigencias mecánicas?

- *Con el pie en descarga* (arco en reposo). El primer y quinto metatarsianos, móviles, descienden por la acción de la musculatura debajo de los metatarsianos centrales (prácticamente inmóviles en la articulación tarsometatarsiana o de Lisfranc), formando un arco cuya anchura es inferior a la que adquiere con el pie en carga.
- *Con el arco en apoyo estático*. La flecha del arco disminuirá, con el consiguiente apoyo de todas las cabezas metatarsianas.
- *Con el arco en apoyo dinámico*. Se producirá una progresiva liberación de las cabezas metatarsianas laterales, con transferencia de carga hacia el aparato glenosesamoideo de la cabeza del primer metatarsiano, para que pueda iniciarse la fase de despegue de los dedos; para ello actuará a modo de bisagra.

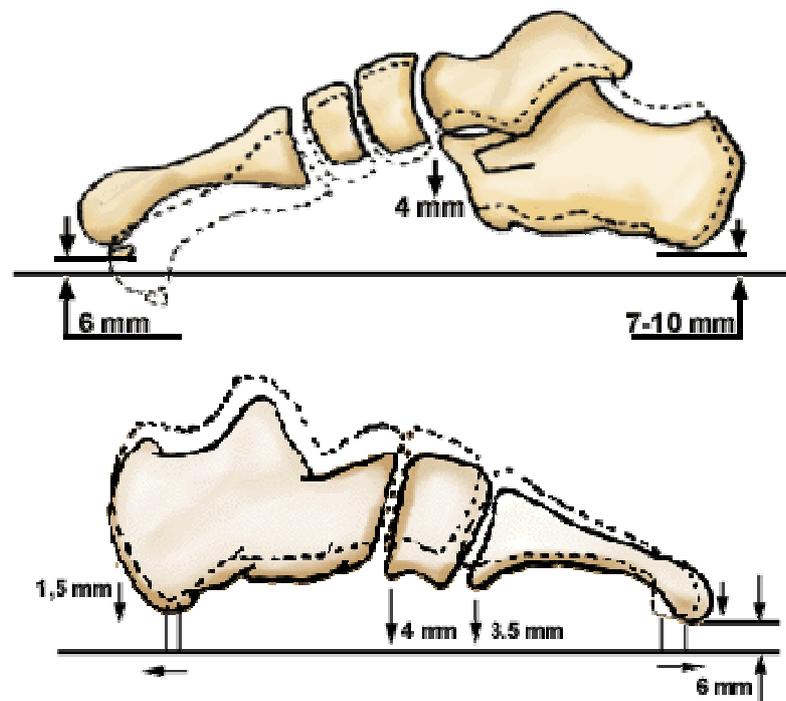


Fig. 1.9: Cambios del arco longitudinal medial (img. Sup.) y del lateral (img. Inf.) en carga

Escuela Universitaria de Ing. Técnica Industrial de Zaragoza	ANEXO I	Carlos Fernández Manchado	
		Total n°: 32 Hoja n°: 25	FECHA 5/5/2010

Mecánicamente se constituye en un **sistema funcional viscoelástico** merced a sus componentes musculotendinoso y dermoaponeurótico. Dicho sistema, adaptándose a las cargas externas (fuerzas) e internas (estrés), reacciona frente a ellas para recuperar su disposición arquitectural. Además, se constituye en un sistema funcional osteoligamentario que, agrupado en diferentes unidades articulares, conferirá a la bóveda la rigidez necesaria para soportar las sollicitaciones mecánicas.

La aparición del arco (o bóveda) longitudinal, añadida a la transversal, proporciona a la planta del pie el aspecto de semicúpula cóncava hacia abajo. Esta excavación, o *bóveda plantar*, constituye el carácter más distintivo del pie humano. Dicho carácter permite relacionar la forma de la planta con el plano horizontal a través del plano medio del primer radio y clasificar los pies en cavos (con bóveda elevada), normales y planos (con bóveda hundida). El pie convexo sería un caso particular del plano.

Para cumplir su función, la bóveda plantar se estructura en un sistema funcional constituido por 3 unidades funcionales:

- **Unidad funcional osteoarticular.** La configuración de la bóveda plantar depende fundamentalmente de la disposición del esqueleto del pie y, en especial, de la disposición del calcáneo. Dicha disposición se basa en una construcción en mosaico agrupada en torno al complejo articular periastragalino. Morfológicamente, estas articulaciones mantendrán uniones sólidas entre sí, con independencia del grado de movilidad que les permita la configuración de sus carillas articulares. Y esto es así merced a la existencia de unos potentes ligamentos que, al actuar especialmente en la cara plantar a modo de tirantes que resisten las fuerzas de tensión, mantendrán la cohesión articular.
- **Unidad funcional musculotendinosa.** Habría que esperar que el pie, cuanto más peso soportara, más se aplanara (se hiciera más largo y ancho). Pero no ocurre así, como puede observarse radiológicamente, sino que, al contrario, se acorta y estrecha. Este hecho se debe a la existencia de los tendones de los músculos, que por su línea de acción se comportan a modo de estribos alrededor de la bóveda (tibial anterior, tibial posterior y peroneo lateral largo) para colaborar, con su contracción activa o refleja, al mantenimiento de su arquitectura.
- **Unidad funcional dermoaponeurótica.** En unión de la unidad musculotendinosa representa lo que se denomina «componente

Escuela Universitaria de Ing. Técnica Industrial de Zaragoza	ANEXO I	Carlos Fernández Manchado	
		Total nº: 32 Hoja nº: 26	FECHA 5/5/2010

viscoelástico» de la bóveda. Ya se ha hecho mención anteriormente a la importancia de la almohadilla plantar como elemento protector y repartidor de presiones. Cabe añadir la existencia de la aponeurosis plantar, potente formación ligamentosa que se extiende desde el calcáneo hasta el pie anterior, que tensa en sentido longitudinal la bóveda y contribuye, a modo de cercha, a mantener su disposición arquitectural. En este sentido se han realizado numerosas investigaciones con especímenes en los que se ha tratado de reproducir las condiciones reales de carga en las que trabaja el pie como superestructura. Si se aplica una fuerza de 500N sobre el tobillo, 360N son absorbidos por la aponeurosis plantar y 100N se transmiten por el gran ligamento plantar. Se generan fuerzas axiales sobre las articulaciones tarsometatarsianas de 170N para el tercer radio y de 150N para el primero. En resumen, la musculatura realiza un papel importante en la estabilidad de los arcos plantares. Sin embargo, su función como portadora de cargas no está bien evaluada.

1.3.6.- EMINENCIA DIGITOPANTAR (ANTEPIÉ)

Es la región anterior de la planta del pie definida por la existencia de un abultamiento alargado en sentido transversal, correspondiente a las cabezas de los 5 metatarsianos articuladas con las bases de las primeras falanges.

El examen de diferentes tipos de antepiés ha permitido establecer variaciones en la terminación de los dedos y de los metatarsianos. Dichas variaciones son la base de las denominadas fórmulas digital y metatarsal.

- **Fórmula digital.** A partir de la relación entre longitudes de los dedos. los pies se clasifican en:
 - o *Pies egipcios.* El dedo gordo es más largo que el segundo y los demás son sucesivamente más cortos.
 - o *Pies griegos.* El dedo gordo es más corto que el segundo y éste es más largo que los siguientes.
 - o *Pies cuadrados.* El dedo gordo es aproximadamente igual al segundo, y estos dos son más largos que los restantes.
- **Fórmula metatarsiana.** Examinando radiografías de antepié, se pueden definir tres tipos de correlación metatarsiana:
 - o *Index minus,* si el primer metatarsiano es más corto que el segundo.

Escuela Universitaria de Ing. Técnica Industrial de Zaragoza	ANEXO I	Carlos Fernández Manchado	
		Total n°: 32 Hoja n°: 27	FECHA 5/5/2010

- *Index plus minus*, si el primero y segundo son iguales.
- *Index plus*, si el primer metatarsiano es más largo que el segundo.

Cualquier pie con los tipos de fórmula digital y metatarsiana descritos es completamente normal. No obstante, la fórmula digital con pie egipcio predispone más a padecer metatarsalias de origen biomecánico. La desestructuración de la fórmula metatarsiana y de la alineación frontal de los metatarsianos condicionará la aparición de alguno de los síndromes que se definen como «metatarsalgias». De ahí se infiere la existencia de un «pie ideal», con patología más infrecuente y al que deberá tenderse siempre en las reconstrucciones quirúrgicas. Es aquel que presenta un dedo gordo tipo griego con un primer metatarsiano tipo index plus.

1.3.7.- APONEUROSIS PLANTAR Y CÁPSULAS ARTICULARES

Representan un factor estabilizador muy importante de la articulación metatarsofalángica. La **almohadilla plantar** es la estructura que mejor resiste la dorsiflexión de la articulación metatarsofalángica. Durante la deambulación, los grados de flexión dorsal de la metatarsofalángica varían. La resistencia estática de la cápsula plantar, unida a las fuerzas dinámicas de los flexores intrínsecos que traccionan de la primera falange hacia atrás, tiende a orientar en una posición neutra la metatarsofalángica. Al igual que ocurre en la mano, las articulaciones metatarsofalángicas e interfalángicas son enartrosis y trocleartrosis, respectivamente. Por esta razón, y en unión a la articulación tibiotarsiana deben ser consideradas articulaciones de movimiento, en contraposición a las de carga (como la subastragalina). En los sesamoideos se insertan los músculos cortos plantares de la porción medial del pie, que transmiten su fuerza al dedo gordo a través de los ligamentos glenofalángicos. Este sistema actúa como una rótula que, durante la marcha o en la posición de puntillas, mantiene el dedo fuertemente aplicado al suelo, conservando el equilibrio de todo el cuerpo en dicha postura. La cabeza del primer metatarsiano gira sin trasladarse, esto es, se desliza.

Por el contrario, las articulaciones metatarsofalángicas de los cuatro últimos dedos, al no disponer de tal sistema, se comportan de manera distinta: durante la marcha o en posición de puntillas, la cabeza metatarsal al girar se trasladará también, empujando hacia delante la falange correspondiente; ésta, a su vez, se verá frenada por los tendones flexores y

extensores largos, por lo que existirá una tendencia fisiológica a adoptar la posición de dedo en garra, tendencia sólo parcialmente contrarrestada por la acción de los músculos interóseos y lumbricales, que aplican los dedos sobre el suelo. La función de las articulaciones interfalángicas de los dedos sirve de complemento a la de las metatarsofalángicas, facilitando la adaptación de los dedos al terreno irregular. Esta acción es muy débil con el pie calzado.



Fig. 1.10: Situación de la fascia plantar y el tendón de Aquiles

2.- CICLO DE LA MARCHA HUMANA

Para entender la forma en la que aplicamos las cargas y condiciones de contorno en el modelo de elemento finitos, se debe hacer una breve explicación sobre las diferentes condiciones de apoyo del pie, según la marcha humana.

Las cargas del pie no son constantes en la acción de caminar, sino que cambian tanto su valor y dirección como el lugar de aplicación. Por lo tanto habrá que dividir el proceso de caminar en diferentes posiciones o estados.

Así, estudios realizados han propuesto dividirlo en 6 fases: Inicial-Contact, Heel-Strike, Midstance, Forefoot-Contact, Push-elOff y Toe-off ([6], [7], [8], [9]).

- **Initial-Contact:** Contacto inicial del pie con el suelo. Es el momento en el que el talón ó calcáneo es la única parte del pie que se apoya. Recibe, por tanto, todo el peso del cuerpo.

Fig. 2.1

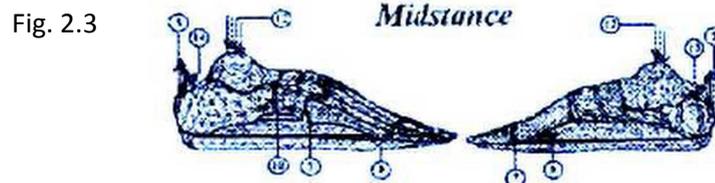


- **Heel-Strike:** Momento en el que la articulación del tobillo gira hacia adelante con la intención de hacer contactar las almohadillas de las falanges con el suelo, pero sin llegar al contacto todavía. La superficie apoyada con el suelo continúa siendo el calcáneo, pero en una proporción mayor a la fase anterior.

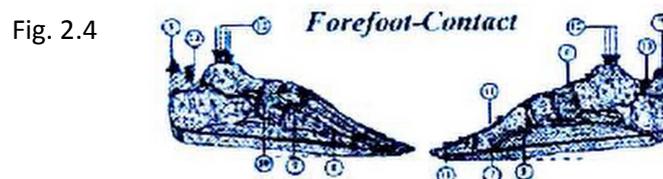
Fig. 2.2



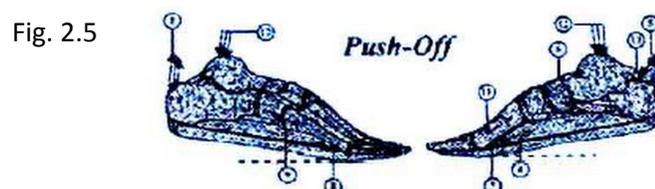
- **Midstance:** Posición de apoyo total de la planta del pie sobre el suelo. La carga sobre el pie en esta fase equivale al peso corporal de sujeto, la cual se reparte por el calcáneo y el apoyo de la zona delantera del pie, que no es otra que las cabezas inferiores de los metatarsianos.



- **Forefoot-Contact:** Estado en el cual el tendón de Aquiles ejerce la fuerza necesaria para levantar el talón, que, por tanto, deja de estar en contacto con el suelo. Se sabe que generalmente el primer metatarso en la fase anterior forma veinte grados con el suelo, por tanto en esta fase éste formaría un ángulo ligeramente mayor. En este momento inicial el pie sufre la mayor sollicitación de cargas, llegando a soportar hasta cinco veces el peso corporal del individuo.



- **Push-Off:** Caso inmediatamente siguiente al estado forefoot-contact, donde el talón se encuentra más elevado. El primer metatarso forma un ángulo con el suelo mayor. No existe una frontera exacta para determinar qué ángulo es el que nos dice si estamos en la fase anterior o en esta, puesto que todos los pies son diferentes y los ángulos evidentemente también. Se puede considerar que el sujeto se encuentra en esta fase cuando la carga sobre el pie cae ligeramente a aproximadamente un valor alrededor de cuatro veces el peso corporal.



- **Toe-Off:** Última fase del proceso de caminar, en ésta, el primer metatarso forma con el suelo de noventa grados en adelante hasta que el contacto entre ellos desaparece por completo. La superficie de apoyo con el suelo es menor que en cualquiera de las demás fases, y corresponde a la superficie inferior de los dos primeros dedos, hasta que éstos dejan de tener ningún tipo de contacto. Debido a lo comentado, la carga que soporta el pie va disminuyendo hasta llegar a anularse por acción de tener el pie totalmente en el aire.

Fig. 2.6



El ciclo de estancia de la marcha, además de poder subdividirse en seis subfases, también es común dividirlo en tres momentos del ciclo. Es interesante conocer estas tres fases, puesto que es una definición de los estados de la marcha muy extendida a nivel médico. Estas fases o momentos son:

- **Primer momento del ciclo o primer rocker:** Abarca desde el primer contacto del talón con el suelo (Initial-contact) hasta justo antes del contacto total de la planta del pie de adelante a atrás.
- **Segundo momento del ciclo o segundo rocker:** Comienza justo en el momento en que el pie está totalmente apoyado sobre el suelo (Midstance), y termina en el instante anterior a levantar el talón.
- **Tercer momento del ciclo o tercer rocker:** Última fase del ciclo de estancia de la marcha humana. Parte desde el momento en que el talón se despega del suelo (Forefoot-contact), hasta que el pie se separa totalmente de éste, quedando como es evidente, en el aire (instante inmediatamente siguiente al Toe-off).

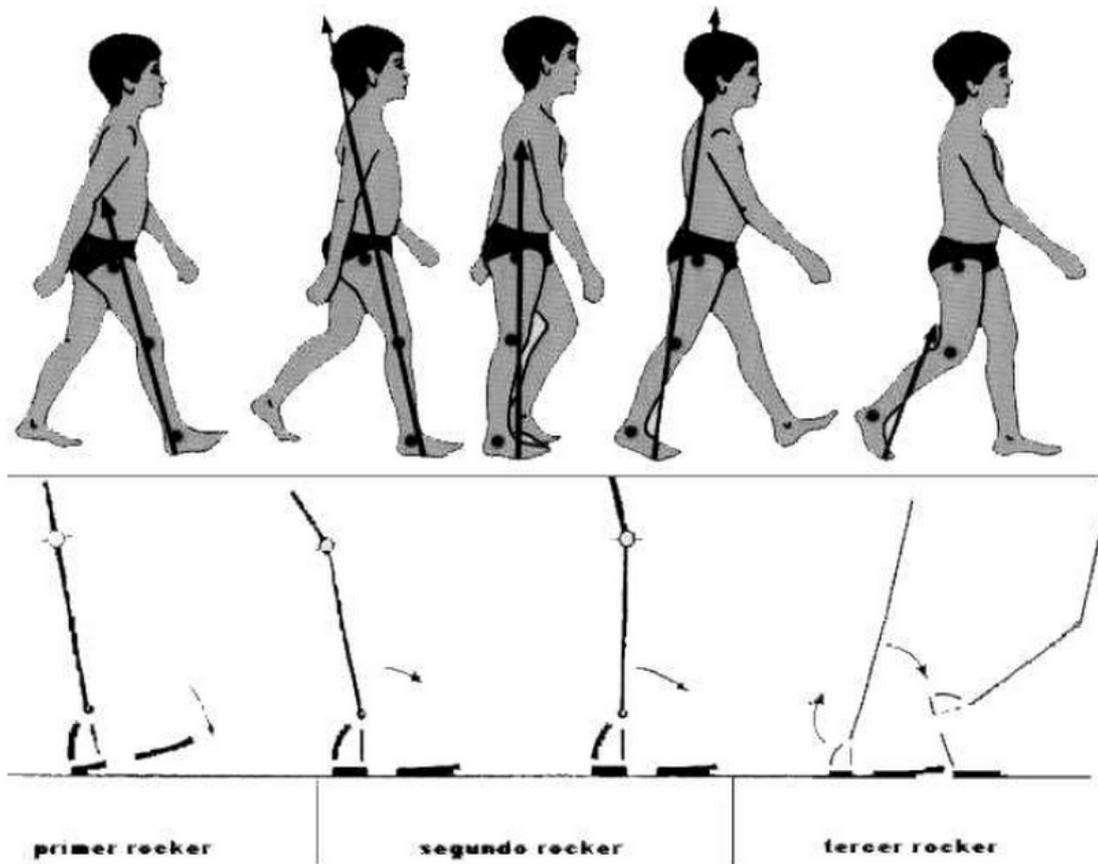


Fig 2.7: Ciclo de la marcha humana.

ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERIA TÉCNICA INDUSTRIAL DE ZARAGOZA

Anexo II

Preparación para el cálculo

Carlos Fernández Manchado

<i>Escuela Universitaria de Ing. Técnica Industrial de Zaragoza</i>	ANEXO II	Carlos Fernández Manchado	
		Total nº: 11 Hoja nº: 2	FECHA 5/5/2010

ÍNDICE

0.- INTRODUCCIÓN	3
1.- DEFINICIÓN DE LOS TIPOS DE MATERIAL.....	3
2.- ASIGNACIÓN DE LOS MATERIALES A LOS DIFERENTES GRUPOS DE ELEMENTOS.....	4
3.- CONTACTOS Y FUNCIÓN 'TIE'.....	5
3.1.- FUNCIÓN TIE	5
3.2.- CONTACTO SUELO-PIEL.....	7
3.3.- CONTACTO FLEXORES HUESO.....	8
4.- CARGAS Y CONDICIONES DE CONTORNO	9
4.1.- PARA EL SEGUNDO MOMENTO DE APOYO	9
4.2.- PARA EL TERCER MOMENTO DE APOYO	10

Escuela Universitaria de Ing. Técnica Industrial de Zaragoza	ANEXO II	Carlos Fernández Manchado	
		Total n°: 11 Hoja n°: 3	FECHA 5/5/2010

0.- INTRODUCCIÓN

En el siguiente anexo se pretende exponer el código editado sobre el archivo `inp` (archivo de texto que puede ser modificado y contiene el m.e.f. a calcular) de ABAQUS y sobre el que se haría el cálculo. Estas comandos definen las siguientes características para los modelos de elementos finitos: propiedades de materiales, condiciones de contorno y cargas aplicadas principalmente.

1.- DEFINICIÓN DE LOS TIPOS DE MATERIAL

Los tipos de materiales establecidos y sus propiedades van situadas antes de la definición de los grupos de elementos. Son ambas iguales, tanto para el pie en el tercer momento de apoyo como en el segundo, ya que son los mismos materiales para ambos.

*MATERIAL,NAME=MCORTICAL	450,0.3
*ELASTIC,TYPE=ISOTROPIC	*MATERIAL,NAME=MFASCIA
17000,0.3	*ELASTIC,TYPE=ISOTROPIC
*MATERIAL,NAME=MESPONJOSO	350,0.3
*ELASTIC,TYPE=ISOTROPIC	*MATERIAL,NAME=MGRASA
700,0.3	*ELASTIC,TYPE=ISOTROPIC
*MATERIAL,NAME=MCARTILAGO	1,0.3
*ELASTIC,TYPE=ISOTROPIC	**HYPERELASTIC, OGDEN, N=1
10,0.4	**0.01645,6.82,0.01
*MATERIAL,NAME=MFINOS	*MATERIAL,NAME=MPIEL
*ELASTIC,TYPE=ISOTROPIC	*ELASTIC,TYPE=ISOTROPIC
260,0.3	10,0.3
*MATERIAL,NAME=MPLANTAR	*MATERIAL,NAME=SHELL
*ELASTIC,TYPE=ISOTROPIC	*ELASTIC,TYPE=ISOTROPIC
350,0.3	0.1,0.3
*MATERIAL,NAME=MFLEXORES	
*ELASTIC,TYPE=ISOTROPIC	

Escuela Universitaria de Ing. Técnica Industrial de Zaragoza	ANEXO II	Carlos Fernández Manchado	
		Total nº: 11 Hoja nº: 4	FECHA 5/5/2010

2.- ASIGNACIÓN DE LOS MATERIALES A LOS DIFERENTES GRUPOS DE ELEMENTOS

La asignación de los materiales a los grupos de elementos se realiza inmediatamente después de la definición de los tipos de material.

Para los elementos tipo shell (o membrane) y beam hay que especificar además el espesor y el diámetro respectivamente.

Los grupos globales de elementos (cortical, esponjoso, grasa, etc.) son los mismos para ambos modelos de pie (segundo y tercer momento) por lo que este apartado será el mismo para ambos.

```
*SOLID SECTION,ELSET=ESPONJOSO,MATERIAL=MESPONJOSO
*SOLID SECTION,ELSET=CORTICAL,MATERIAL=MCORTICAL
*SOLID SECTION,ELSET=CARTILAGOS,MATERIAL=MCARTILAGO
*SOLID SECTION,ELSET=GRASA,MATERIAL=MGRASA
*BEAM SECTION,ELSET=LIGAMENTOSFINOS,MATERIAL=MFINOS,SECTION=CIRC
0.12,
*BEAM SECTION,ELSET=LIGAMENTOSSIPERFICIAL,MATERIAL=MPLANTAR,SECTION=CIRC
1.53,
*BEAM SECTION,ELSET=LIGPLANTARMETATARSIANO,MATERIAL=MPLANTAR,SECTION=CIRC
1.53,
*BEAM SECTION,ELSET=FLEXORES,MATERIAL=MFLEXORES,SECTION=CIRC
2,
*MEMBRANE SECTION, ELSET=SC_HUESO, MATERIAL=SHELL
0.1,
*SHELL GENERAL SECTION,ELSET=PIEL1,MATERIAL=MPIEL
1,
*SHELL GENERAL SECTION, ELSET=PIEL2, MATERIAL=MPIEL
4,
*SHELL GENERAL SECTION,ELSET=FASCIA,MATERIAL=MFASCIA
2,
```

Escuela Universitaria de Ing. Técnica Industrial de Zaragoza	ANEXO II	Carlos Fernández Manchado	
		Total n°: 11 Hoja n°: 5	FECHA 5/5/2010

3.- CONTACTOS Y FUNCIÓN ‘TIE’

Ambos tipos de funciones de interacción se editan tras la definición de grupos.

El código para el contacto entre el suelo y la malla, y el pegado (TIE) de la fascia al hueso es para el segundo y tercer momento igual ya que se ha llamado a las superficies de contacto de igual manera.

3.1.- FUNCIÓN TIE

Definimos las superficies de contacto para ABAQUS mediante los grupos creados anteriormente en I-DEAS con los elementos de las superficies. A continuación se detalla la definición de estas superficies:

*SURFACE,NAME=CALC, SCALC	*SURFACE,NAME=FCALC, SFCALC
*SURFACE,NAME=SESA1, SSESA1	*SURFACE,NAME=FSESA1, SFSESA1
*SURFACE,NAME=SESA2, SSESA2	*SURFACE,NAME=FSESA2, SFSESA2
*SURFACE,NAME=MET2 SMET2	*SURFACE,NAME=FMET2 SFMET2
*SURFACE,NAME=MET3 SMET3	*SURFACE,NAME=FMET3 SFMET3
*SURFACE,NAME=MET4 SMET4	*SURFACE,NAME=FMET4 SFMET4
*SURFACE,NAME=MET5 SMET5	*SURFACE,NAME=FMET5 SFMET5
*SURFACE,NAME=FP1, SFP1	*SURFACE,NAME=FFP1, SFFP1
*SURFACE,NAME=FP2, SFP2	*SURFACE,NAME=FFP2, SFFP2
*SURFACE,NAME=FP3, SFP3	*SURFACE,NAME=FFP3, SFFP3
*SURFACE,NAME=FP4, SFP4	*SURFACE,NAME=FFP4, SFFP4
*SURFACE,NAME=FP5, SFP5	*SURFACE,NAME=FFP5, SFFP5

Como se puede observar, al definir una superficie, en la primera línea se pone el nombre que tendrá la superficie en el contacto, y en la segunda el grupo de elementos que engloban esa superficie (que es el que se había definido en I-DEAS).

Escuela Universitaria de Ing. Técnica Industrial de Zaragoza	ANEXO II	Carlos Fernández Manchado	
		Total n°: 11 Hoja n°: 6	FECHA 5/5/2010

En la primera columna están definidas las superficies de contacto pertenecientes al hueso, cuyos elementos son tipo ‘membrane’, los cuales, como se comento anteriormente se crearon en I-DEAS sobre la superficie del hueso; y en la segunda columna tenemos las superficies de contacto de la fascia, que son los elementos ‘SHELL’ con los que se ha definido la fascia en I-DEAS.

Se realizaron los ‘pegados (TIE)’, los cuales se definieron como sigue:

```
*TIE,NAME=PRIMERO,POSITION TOLERANCE=0.3
FCALC, CALC
*TIE,NAME=SEGUNDO,POSITION TOLERANCE=0.3
FSESA1, SESA1
*TIE,NAME=TERCERO,POSITION TOLERANCE=0.3
FSESA2, SESA2
*TIE,NAME=CUARTO,POSITION TOLERANCE=0.3
FFP1, FP1
*TIE,NAME=QUINTO,POSITION TOLERANCE=0.3
FFP2, FP2
*TIE,NAME=SEXTO,POSITION TOLERANCE=0.3
FFP3, FP3
*TIE,NAME=SEPTIMO,POSITION TOLERANCE=0.3
FFP4, FP4
*TIE,NAME=OCTAVO,POSITION TOLERANCE=0.3
FFP5, FP5
*TIE,NAME=M2,POSITION TOLERANCE=0.3
FMET2, MET2
*TIE,NAME=M3,POSITION TOLERANCE=0.3
FMET3, MET3
*TIE,NAME=M4,POSITION TOLERANCE=0.3
FMET4, MET4
*TIE,NAME=M5,POSITION TOLERANCE=0.3
FMET5, MET5
```

La primera superficie que se pone es la esclava, que es la que ABAQUS acercaría a la segunda, que es la maestra. La ‘position tolerance’ es la distancia, en milímetros, que usa ABAQUS para acercar la superficie esclava en el pegado. Esta distancia es perpendicular a la maestra, y con origen en esta; y toda superficie esclava a menos de esa distancia del la maestra, será con la que se realice el pegado.

<i>Escuela Universitaria de Ing. Técnica Industrial de Zaragoza</i>	ANEXO II	Carlos Fernández Manchado	
		Total n°: 11 Hoja n°: 7	FECHA 5/5/2010

3.2.- CONTACTO SUELO-PIEL

Como se comento en la memoria de este proyecto, el contacto entre el suelo y la piel finalmente no se usó por la dificultad de conseguir la convergencia en el cálculo, pero se dejó en el modelo para futuros intentos.

La forma de aplicar un par de contacto es muy similar a la forma de definir un 'tie' (pegado): primero se definen las superficies que van a contactar, y luego se especifica el par, dándole un nombre y poniendo primero la superficie esclava y después la maestra; la única diferencia es que hay que definir antes del par como es el tipo de interacción, que en nuestro caso sería una interacción superficial sin fricción y además, cuando defines el par, indicar que estás trabajando con la hipótesis de pequeños desplazamientos/deslizamiento (small sliding).

Los comandos para el contacto talón-suelo y eminencia digitoplantar-suelo, serían los siguientes mediante superficie esclava elemental (iguales en ambos modelos de pie):

- Superficies de contacto:

```
*SURFACE, NAME=SPIEL2, TYPE=ELEMENT
PIEL2, SNEG
*SURFACE, NAME=SSUELO2, TYPE=ELEMENT
SUELO2, SNEG
```

- Tipo de interacción

```
*SURFACE INTERACTION, NAME=APOYO
*FRICTION
0.2,
```

- Tipo de contacto

```
*CONTACT PAIR, INTERACTION=APOYO, SMALL SLIDING
SPIEL2, SSUELO2
```

Para la superficie esclava nodal sería prácticamente lo mismo: solo hay que cambiar TYPE=ELEMENT por TYPE=NODE en la superficie esclava y PIEL2 por NDPIEL2, que sería la superficie nodal de la piel que se supone que contacta.

Como se puede observar, a la hora de definir las superficies, se definió (en la línea donde se pone el grupo de elementos que forman la superficie) el vector direccional de esta, que deben ambos apuntar hacia la superficie contraria. En nuestro caso ambas tendrían el vector negativo (sneg).

Escuela Universitaria de Ing. Técnica Industrial de Zaragoza	ANEXO II	Carlos Fernández Manchado	
		Total nº: 11 Hoja nº: 8	FECHA 5/5/2010

3.3.- CONTACTO FLEXORES HUESO

Esto se realizó mediante contacto nodal, por ser más sencilla la convergencia y se despreció la fricción entre ambas superficies, para hacer más fácil el contacto.

```

*****
** DEFINICIÓN DEL PAR DE CONTACTO 1
*****
*SURFACE INTERACTION,NAME=LUBRIC1
*FRICTION
0.0 ,
*CONTACT PAIR,INTERACTION=LUBRIC1,SMALL SLIDING
NODFLEX1,SUPCON1
*****
** DEFINICIÓN DEL PAR DE CONTACTO 2
*****
*SURFACE INTERACTION,NAME=LUBRIC2
*FRICTION
0.0 ,
*CONTACT PAIR,INTERACTION=LUBRIC2,SMALL SLIDING
NODFLEX2,SUPCON2
*****
** DEFINICIÓN DEL PAR DE CONTACTO 3
*****
*SURFACE INTERACTION,NAME=LUBRIC3
*FRICTION
0.0 ,
*CONTACT PAIR,INTERACTION=LUBRIC3,SMALL SLIDING
NODFLEX3,SUPCON3
*****
** DEFINICIÓN DEL PAR DE CONTACTO 4
*****
*SURFACE INTERACTION,NAME=LUBRIC4
*FRICTION
0.0 ,
*CONTACT PAIR,INTERACTION=LUBRIC4,SMALL SLIDING
NODFLEX4,SUPCON4

```

Escuela Universitaria de Ing. Técnica Industrial de Zaragoza	ANEXO II	Carlos Fernández Manchado	
		Total n°: 11 Hoja n°: 9	FECHA 5/5/2010

4.- CARGAS Y CONDICIONES DE CONTORNO

Las cargas y las condiciones van situadas dentro del INP, en último lugar, para finalizar el archivo.

4.1.- PARA EL SEGUNDO MOMENTO DE APOYO

Se definió la aplicación de las cargas en dos ‘pasos’, primero la aplicación de las cargas verticales (eje y) y después las horizontales (eje z). Esto se hizo como técnica para aumentar las probabilidades de convergencia en el contacto.

```

*STEP
**STEP,INC=10000,NLGEOM
*STATIC
**0.001,1,.00000001,0.1
**CONTACT CONTROLS, AUTOMATIC TOLERANCES
*CLOAD
NDPERONE,2,0.58899,
NDTIBIA,2,0.58899,
CARGATALONAQUILES,2,-27.35576,
*BOUNDARY
NDSUELO3,2,2,0.2
S3NDFIJOS,1,1,0
S3NDFIJOS,3,3,0
*END STEP
*****
*STEP
**STEP,INC=10000, NLGEOM
*STATIC
**0.001,1,.0000001,0.2
**CONTACT CONTROLS, AUTOMATIC TOLERANCES
*CLOAD
**NODOS_CARGA_ASTR1,3,-0.1246,
NDTIBIA,3,0.103856,
NDPERONE,3,0.103856,
CARGATALONAQUILES,3,-4.82355,
*END STEP

```

Escuela Universitaria de Ing. Técnica Industrial de Zaragoza	ANEXO II	Carlos Fernández Manchado	
		Total n°: 11 Hoja n°: 10	FECHA 5/5/2010

4.2.- PARA EL TERCER MOMENTO DE APOYO

Antes de definir las secuencias de aplicación de las cargas (STEP) se le tiene que dar a los flexores la propiedad de elementos pretensados. Esto se hace como se muestra a continuación:

```
*PRE-TENSION SECTION, ELEMENT=881599, NODE=164680
*PRE-TENSION SECTION, ELEMENT=881604, NODE=164681
*PRE-TENSION SECTION, ELEMENT=881585, NODE=164684
*PRE-TENSION SECTION, ELEMENT=881588, NODE=164683
*PRE-TENSION SECTION, ELEMENT=881592, NODE=164678
*PRE-TENSION SECTION, ELEMENT=881914, NODE=164676
*PRE-TENSION SECTION, ELEMENT=881915, NODE=164682
*PRE-TENSION SECTION, ELEMENT=881920, NODE=164677
*PRE-TENSION SECTION, ELEMENT=881921, NODE=164679
```

Seguidamente se exponen las secuencias de aplicación de las cargas y condiciones de contorno (STEP). Al igual que para el segundo momento de apoyo, las cargas se aplicaron en dos pasos (STEP), primero el pretensado de los flexores, y después la carga vertical y horizontal.

```
*STEP
**STEP,INC=10000, NLGEOM
*STATIC
*CLOAD
164680, 1, 22
164681, 1, 22
164684, 1, 22
164683, 1, 22
164678, 1, 22
164676, 1, 22
164682, 1, 22
164677, 1, 22
164679, 1, 22
*BOUNDARY
CARGATALONAQUILES,1,3,1
NDSUELO3,2,2,0.2
S3NDFIJOS,1,1,0
S3NDFIJOS,3,3,0
*END STEP
*****
*STEP
**STEP,INC=10000, NLGEOM
*STATIC
**0.001,1,.0000001,0.2
**MODEL CHANGE, TYPE=CONTACT PAIR, ADD
**SPIEL2, SSUELO2
**CONTACT CONTROLS, AUTOMATIC TOLERANCES
*BOUNDARY,FIXED
```

Escuela Universitaria de Ing. Técnica Industrial de Zaragoza	ANEXO II	Carlos Fernández Manchado	
		Total nº: 11 Hoja nº: 11	FECHA 5/5/2010

164680, 1, 1
164681, 1, 1
164684, 1, 1
164683, 1, 1
164678, 1, 1
164676, 1, 1
164682, 1, 1
164677, 1, 1
164679, 1, 1
*CLOAD
NODOSPARACARGA70,2,4.7,
NODOSPARACARGA70,3,-1.71,
*END STEP

- Nota: Las líneas que empiezan con doble asterisco o más (**) significa que están comentadas, por lo que ABAQUS no las tendrá en cuenta para realizar los cálculos.

En el apartado de cargas y condiciones de contorno estas líneas representan la forma de definir el 'STEP' de cálculo en caso de que realizásemos contacto o usásemos un material no lineal.

ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERIA TÉCNICA INDUSTRIAL DE ZARAGOZA

Anexo III

Técnicas quirúrgicas para el alivio del pie en
garra

Carlos Fernández Manchado

<i>Escuela Universitaria de Ing. Técnica Industrial de Zaragoza</i>	ANEXO III	Carlos Fernández Manchado	
		Total nº: 10 Hoja nº: 2	FECHA 5/5/2010

ÍNDICE

0.- INTRODUCCIÓN	3
1.- ESTUDIO DE DEF. MÁXIMAS PRINCIPALES (POR TRACCIÓN)	6
2.- ANÁLISIS DE DEF. MÍNIMAS PRINCIPALES (POR COMPRES.)	7
3.- CONCLUSIONES	10

Escuela Universitaria de Ing. Técnica Industrial de Zaragoza	ANEXO III	Carlos Fernández Manchado	
		Total nº: 10 Hoja nº: 3	FECHA 5/5/2010

0.- INTRODUCCIÓN

El pie en garra (o martillo) es una deformidad de los dedos del pie. Tal deformidad puede aparecer en cualquiera de los dedos del pie, excepto el primero (dedo gordo). Los dedos se encogen formando una ‘garra’ o ‘martillo’ (denominación que depende de la forma que adquiera la última articulación) a causa de un desequilibrio entre falanges y el tejido blando (flexores principalmente). El esqueleto de los dedos del pie afectados es demasiado largo en relación a la capa de tejido suave, conduciendo a un saliente de la articulación media interfalángica y con el tiempo a su deformación. Tal malposición produce inflamaciones muy dolorosas y también origina problemas con el calzado.

El origen de tal condición clínica se encuentra en dos factores principalmente:

- Las condiciones óseas hereditarias, que estriba en una mayor longitud de los dedos en relación al primero.
El pie griego, en el que el segundo dedo es el más largo, sería el más expuesto a esta patología, afectado principalmente por el calzado y la forma de caminar.
- Alteraciones óseas que propicien la tensión de los músculos flexores plantares y extensores dorsales.

Tal afección puede ser permanente (para todos los momentos de la marcha humana) o producirse solo en el tercer momento de apoyo debido a la carga del pie y a la pretensión de los flexores. Es pues en el tercer momento de apoyo cuando se acentúa tal afección.

En este anexo se pretende estudiar **tres técnicas quirúrgicas** para el alivio de tal patología en el segundo dedo del pie comparando las deformaciones (lo cual es el máximo reflejo de los esfuerzos producidos) que se producen en el segundo metatarso en relación al caso sin operar:

- Transferencia de los flexores largos a las falanges proximales, técnica en la que se cortan los tendones flexores por su extremo y se colocan en las falanges proximales (inicialmente unidos a las distales).
- Transferencia de los flexores cortos a las falanges proximales, igual que la anterior pero con los flexores cortos, que inicialmente están unidos a la falange medial.

Escuela Universitaria de Ing. Técnica Industrial de Zaragoza	ANEXO III	Carlos Fernández Manchado	
		Total n°: 10 Hoja n°: 4	FECHA 5/5/2010

- Fusión de la articulación proximal-medial en la segunda falange, para así evitar la flexión de esta articulación por la pretensión de los flexores.

Estas técnicas, como se puede observar, pretenden evitar que los tendones flexionen más los dedos, con lo que se evita el dolor ocasionado a la hora de caminar.

No hay consenso acerca de qué tipo de intervención es mejor. Con ello se pretende dar una visión más técnica de las intervenciones y facilitar la elección.

El estudio pretende ver la influencia de estas intervenciones en metatarso, considerando que las tensiones y con ello las deformaciones sobre este varían con la flexión del dedo por un incremento de cargas transmitidas a través de la articulación metatarsofalángica. Por ello las diferentes intervenciones influyen notablemente al metatarso, lo que quizás, con el tiempo, pueda producir alguna otra patología clínica.

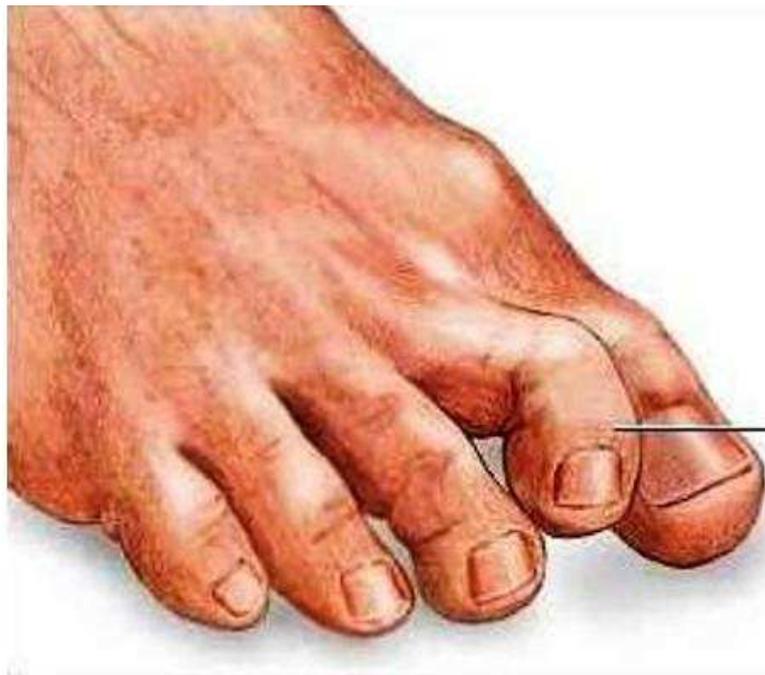


Fig. 1.1: Pie con dedo en garra

Escuela Universitaria de Ing. Técnica Industrial de Zaragoza	ANEXO III	Carlos Fernández Manchado	
		Total nº: 10 Hoja nº: 5	FECHA 5/5/2010

¿Por qué estudiar la influencia en las deformaciones y no en las tensiones?

El mapa de deformaciones principales será continuo ya que este dependerá principalmente del material más rígido ya que es el que más resistencia opone a los desplazamientos; mientras que el tensiones principales tendrá grandes discontinuidades, concentrándose la tensión en aquellas zonas de material más rígido (hueso cortical) y siendo despreciables en comparación con este las del material más blando (hueso esponjoso).

Las tensiones principales de estos materiales están relacionadas directamente con las deformaciones principales mediante la ecuación de Lamé: $\sigma_i = \lambda(\epsilon_I + \epsilon_{II} + \epsilon_{III}) + 2G\epsilon_i$

Podemos ver que el primer término es una constante, así que la tensión principal solo depende para un mismo material, de la variación de la deformación principal del mismo orden que la tensión que queremos hallar (p.ej. σ_I solo dependería de ϵ_I).

Por lo tanto, las deformaciones principales, constituyen visualmente, una forma mejor de ver como varían las sollicitaciones ejercidas sobre un elemento compuesto por dos o más materiales.

Hay que tener en cuenta que la diáfisis (parte larga o tallo del hueso) del metatarso está formada en su totalidad por hueso cortical y las epífisis (cabezas) están formadas prácticamente por hueso esponjoso.

Este estudio se ha realizado sin tener en cuenta la grasa en el cálculo, ya que interesan los resultados cualitativos principalmente.

1.- ESTUDIO DE DEF. MÁXIMAS PRINCIPALES (POR TRACCIÓN)

Analizando el metatarso en su totalidad (Fig. 1.1) apenas se encuentran diferencias entre los cuatro casos de las deformaciones tanto en distribución como en valor numérico.

Sí se observa un aumento de deformación y consecuentemente tracción en la diáfisis, principalmente en los dos casos de transferencia de flexores.

Podemos ver un aumento la deformación máxima principal en las epífisis y por tanto de las tensiones máximas principales en esta zona, siendo el caso de fusión donde más sufre. Las deformaciones en la diáfisis también aumenta en los tres casos respecto a el caso sin operar, siendo el caso de transferencia de largos donde se nota un mayor incremento. Aun así las diferencias son muy escasas, y apenas notables.

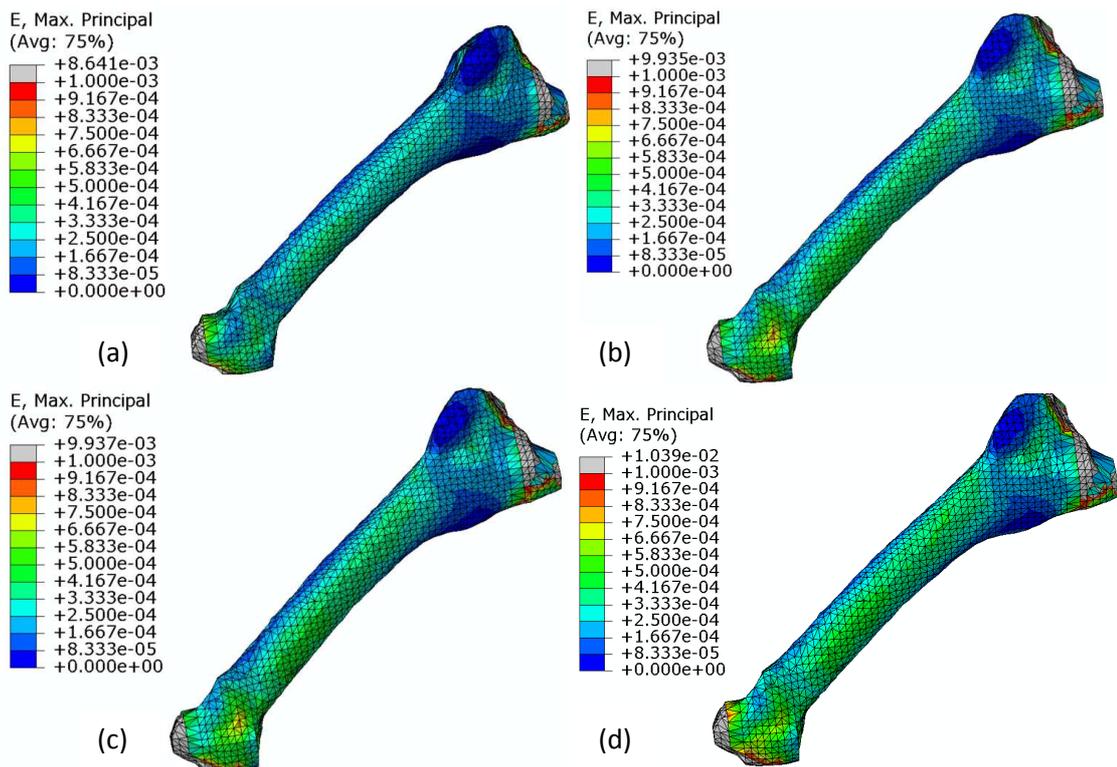


Fig. 1.1: Deformaciones máximas principales en el segundo metatarso para (a) el pie sin operar, (b) transfiriendo largos, (c) transfiriendo cortos y (d) fusionado

Visto la escasa diferencia de deformaciones máximas es preciso aislar diferentes partes de este hueso para poder encontrar diferencias notables.

Se puede ver que las deformaciones por tracción se encuentran localizadas en el lateral del metatarso que ‘mira’ al tercer metatarso, siendo el *caso de transferencia de largos el que mayor deformación por tracción tiene en la diáfisis*, y por lo tanto tensionamiento.

Esto se puede corroborar comprobando las tensiones en la diáfisis, las cuales se exponen en la tabla a continuación:

Sin operar	Transfer. largos	Transfer. cortos	Fusión
6.7	9.638	9.294	7.481

2.- ANÁLISIS DE DEF. MÍNIMAS PRINCIPALES (POR COMPRES.)

En este caso sucede, en general, lo mismo que en las de tracción, el nivel numérico de cada uno de los cuatro casos es similar; sin embargo, la redistribución de deformaciones (y por tanto tensiones) sí que es ahora bastante más notoria en la diáfisis, mientras que en la epífisis apenas hay diferencia.

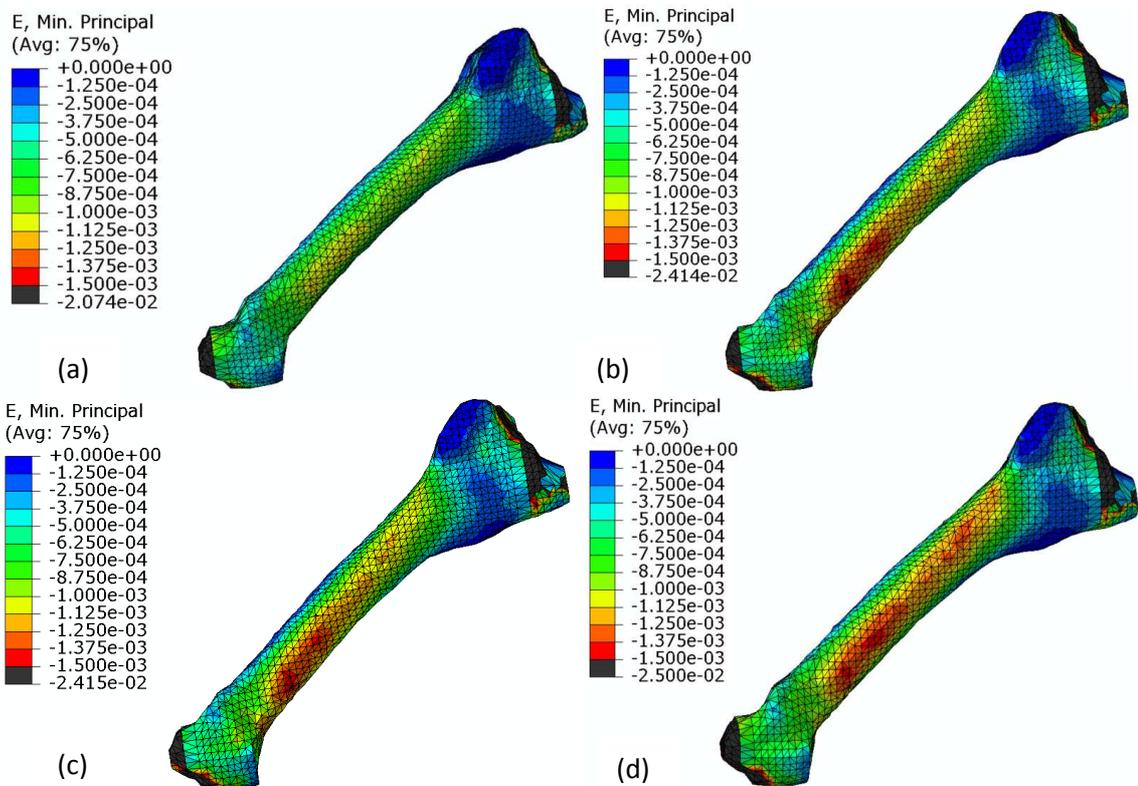


Fig. 2.1: Deformaciones mínimas principales en el segundo metatarso para (a) el pie sin operar, (b) transfiriendo largos, (c) transfiriendo cortos y (d) fusionado

Escuela Universitaria de Ing. Técnica Industrial de Zaragoza	ANEXO III	Carlos Fernández Manchado	
		Total n°: 10 Hoja n°: 8	FECHA 5/5/2010

Los máximos valores de deformación (zonas negras) corresponden a las epífisis metatarsianas, donde tampoco se ve una variación significativa en cuanto a valor de un caso a otro. Esta deformación máxima se produce porque esas zonas están formadas prácticamente de hueso esponjoso, y además las tensiones son mayores ya que como es lógico es la zona que contactaría con el suelo. Los casos operados muestran un valor algo mayor que el caso sin operar, siendo los de transferencia los más bajos.

Lo más relevante es que en el caso de fusión se observa un área comprimida de la diáfisis mucho mayor que en el resto de casos (y con valores más elevados), por lo tanto esa área estará mucho más cargada que en el resto. La distribución para los casos de transferencia se observa que es prácticamente igual para ambas.

Los valores y distribuciones sobre las epífisis los podemos despreciar siendo más relevante los obtenidos sobre la diáfisis.

Podemos corroborar los resultados antes obtenidos con las deformaciones de compresión de la diáfisis más al detalle, en la figura 2.2 de la siguiente página.

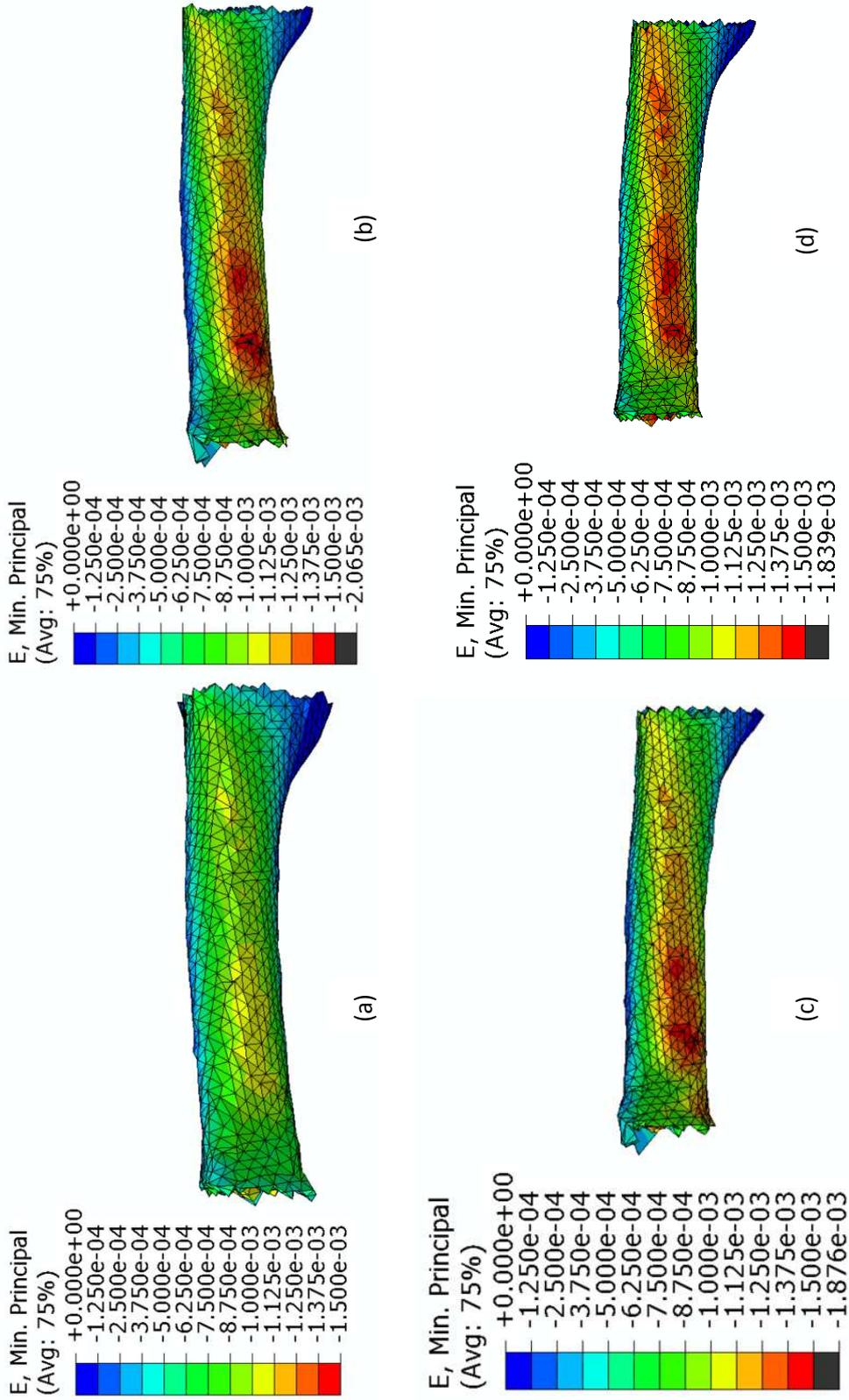


Fig. 2.2: Deformaciones a compresión de la diáfisis del segundo metatarso para (a) el pie sin operar, (b) transfiriendo largos, (c) transfiriendo cortos y (d) fusionado

<i>Escuela Universitaria de Ing. Técnica Industrial de Zaragoza</i>	ANEXO III	Carlos Fernández Manchado	
		Total nº: 10 Hoja nº: 10	FECHA 5/5/2010

3.- CONCLUSIONES

Tras el análisis de de deformaciones realizado en el segundo metatarso, de un pie humano en la posición del tercer momento de apoyo, para los cuatro casos diferentes de cirugía para el alivio del pie en garra se ha concluido que las deformaciones a compresión y por lo tanto las tensiones mínimas son las que arrojan luz en la solución de este problema ayudando a dilucidar las ventajas e inconvenientes de estas intervenciones.

El pie no intervenido nos produce unas tensiones menores tanto mínimas como máximas. Los valores apenas varían de unos a otros, pero es el caso de fusión donde se ve que las tensiones de compresión afectan bastante más al metatarso que en el resto.