

# **CAPÍTULO TRES**

## **ANÁLISIS DE LA MARCHA**

### **INTRODUCCIÓN**

En el siguiente capítulo se define la marcha común del ser humano y se explican los elementos funcionales que hacen posible esta acción. De la misma forma se explicará detalladamente las diferentes fases del ciclo común de la marcha. Se incluyen los ángulos alcanzados por las articulaciones de las extremidades inferiores durante todo este ciclo, así como la posición aproximada del vector de fuerza ocasionado por la masa corporal.

### **3.1 DEFINICIÓN DE LA MARCHA**

El caminar o andar de una persona, se define como la repetición de una serie de movimientos simultáneos, que desplazan el cuerpo sobre una línea de progresión deseada. Y al mismo tiempo mantienen una postura estable, soportando el peso corporal.

La movilidad libre de las articulaciones y el trabajo que desempeñan los músculos es importante para el éxito de esta tarea. Estos últimos deben actuar en el momento preciso y con la intensidad necesaria. La falta de ciertas acciones durante la marcha debe ser sustituida por otras, con el fin de mantener la estabilidad y la progresión deseada.

### 3.2 DINÁMICA DE LA MARCHA.

A cada secuencia de la actividad de las extremidades inferiores se les conoce como ciclo común de la marcha.

#### 3.2.1 Ciclo común

Este requiere de un periodo de apoyo conocido como postura y de un intervalo de avance que se le conoce como oscilación. Durante este ciclo, aproximadamente el 60% del tiempo se utiliza en la postura y el otro 40% en la oscilación. Durante la fase de postura ambas extremidades inferiores comparten la responsabilidad de soportar al cuerpo. Normalmente durante el 10% inicial y final de esta fase, ambos pies están en contacto con el piso, y el 40% restante solo una de las extremidades soporta el peso ya que la otra se encuentra en oscilación para poder avanzar. Como se puede observar en la Fig. 3.1

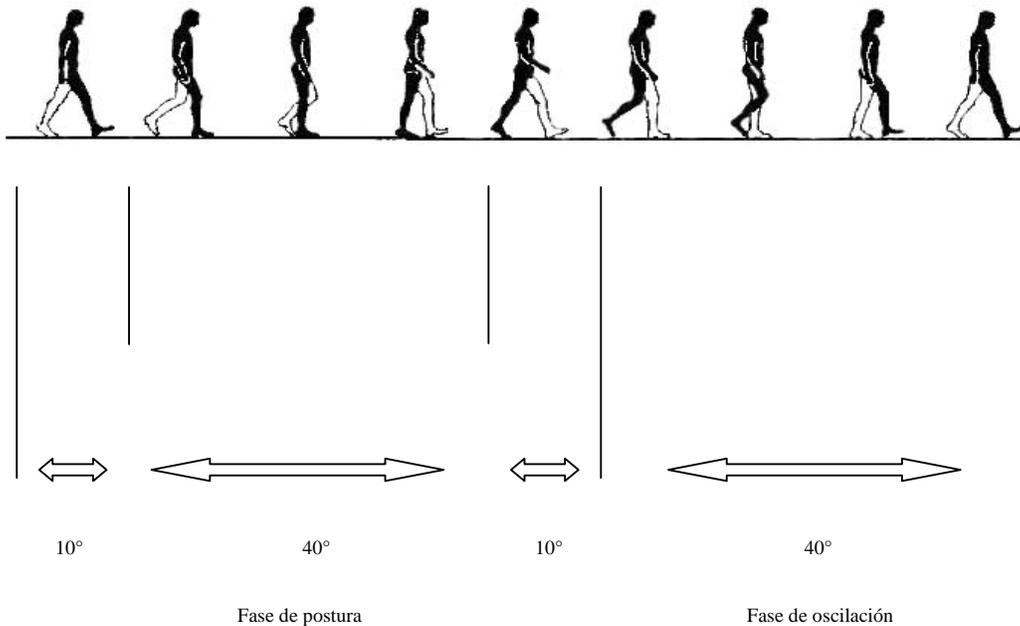


Fig. 3.1 Ciclo de la marcha [19]

### 3.2.2 Elementos funcionales

La marcha humana se puede dividir en tres elementos funcionales conocidos como:

- Progresión o avance.
- Estabilidad.
- Conservación de energía.

Los cuales cumplen diversas funciones en la mecánica de la marcha que serán explicadas brevemente a continuación

#### *Progresión o avance.*

La progresión o avance, como su nombre lo dice consisten en hacer avanzar el cuerpo, o trasladarlo de un lugar a otro.

Existen dos fuerzas principales de avance:

1. La primera se da con la caída del peso del cuerpo hacia delante. Y comienza cuando el cuerpo está sostenido sobre una sola de sus extremidades, el tobillo se flexiona hacia delante y se acelera con el levantamiento del talón.
2. La segunda es ocasionada por la oscilación de la otra extremidad.

En la Fig. 3.2 podemos ver encerradas por el círculo las fases que comprenden la etapa de avance y las fuerzas mencionadas.

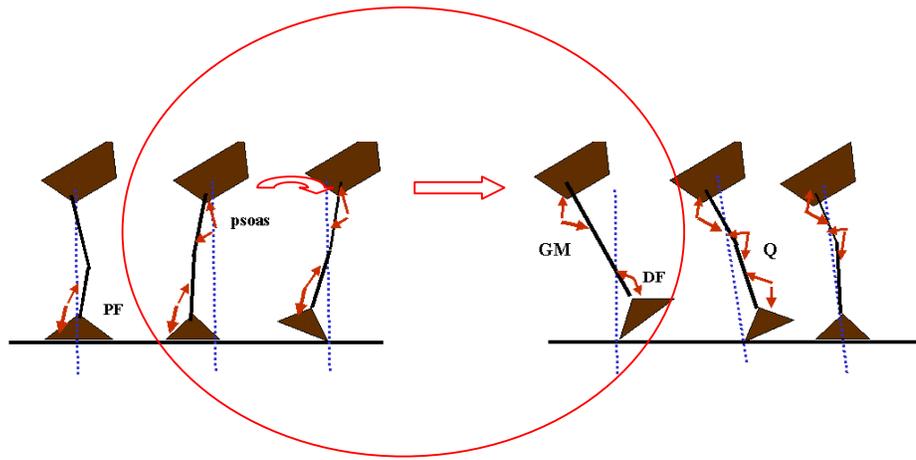


Fig. 3.2 Ciclo de marcha [20]

Estas fuerzas generan un momento de inercia que es preservado al inicio de la siguiente fase de postura, que inicia con el contacto del talón con el piso. Seguido de esta acción el pie cae al piso y los músculos de la tibia la empujan hacia delante. Al mismo tiempo los cuádriceps mantienen el fémur rígido para lograr que el muslo avance de la misma forma de manera más lenta. Durante la fase de postura el pie y el tobillo sirven como mecedora, permitiendo que el cuerpo avance balanceándose sobre el pie de apoyo.

### *Estabilidad.*

El balance o la estabilidad es una tarea difícil, esto se debe a que el cuerpo es mas pesado en su parte superior, y que el andar altera continuamente la alineación. Durante la marcha podemos dividir al cuerpo en dos sistemas: el locomotor y el pasajero. Esta división se realizó analizando que partes del cuerpo contribuyen a la locomoción y que partes no lo hacen, donde los brazos, la cabeza y el tronco constituyen la unidad pasajera, y los músculos del cuello y de la espalda sirven para mantener las vértebras en alineación neutra. La oscilación de los brazos es una reacción pasiva del momento de inercia generado en la marcha. Se dice que es pasiva debido que si se anula el movimiento de los brazos en la marcha, no se ha demostrado que esto ocasione un incremento en el consumo de energía [24].

Las extremidades inferiores unidas por medio de la pelvis conforman el sistema locomotor. Se puede decir que la pelvis forma parte de ambos sistemas, el locomotor y el pasajero. Esta cuenta con dos sitios de unión altamente móviles, la espina lumbar y las articulaciones de la cadera.

La estructura ósea está diseñada para el movimiento, lo que significa que necesita de mecanismos estabilizadores. En la cadera existe un ligamento muy fuerte que va de la parte anterior de la cadera a la parte posterior de la rodilla, el cual estabiliza dicha articulación. Por otro lado en el tobillo se cuenta con un rango de flexión libre, ya sea dorsiflexión, flexión plantar, inversión o eversión, los cuales son controlados por músculos para estabilizar la tibia sobre el pie. Otra característica importante por la cual la estabilidad se ve desafiada, es la diferencia de áreas que el pie ofrece tomando al tobillo como referencia, ya que en la parte posterior, la zona de apoyo del talón es poco mayor a un centímetro, mientras que la zona de apoyo anterior al tobillo, que se extiende hasta las cabezas del metatarso, promedia en adultos alrededor de 10 cm.

El tobillo actúa de forma pasiva y activa. Es pasivo cuando actúa como mecedora, y activo una vez que el peso del cuerpo pasa por enfrente del eje de la articulación. Una vez que esto sucede, se requiere un aumento rápido en la respuesta muscular para obtener el despegue del pie. La intensidad y la rapidez con la que tienen que actuar los músculos están directamente relacionadas con el peso corporal y el centro de la articulación que ese músculo controla. El torque creado es el producto de la fuerza por el brazo de palanca, y la longitud de la palanca es la distancia perpendicular entre la línea del peso corporal y el centro de la articulación. La fuerza básica de la marcha es

proporcionada por el peso corporal, el cual provoca distintos efectos dependiendo de la dirección en la que vaya. Esto quiere decir que al principio y al final de la fase de postura el cuerpo se deja caer de forma rápida hacia el suelo, provocando fuerzas de reacción mayores a la fuerza provocada por el peso. A la mitad de la fase de postura el cuerpo se eleva un poco debido a que la pierna de apoyo alcanza una posición vertical, lo cual provoca que disminuya la fuerza dirigida al suelo. Esta disminución de alturas obtenidas al caminar las podemos observar en la Fig. 3.3.

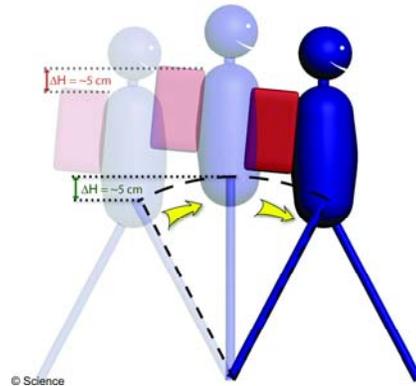


Fig. 3.3 Diferencia de altura provocada por la marcha [21]

### *Conservación de la Energía*

Este tema va de la mano con la eficiencia de la marcha. La eficiencia puede estar definida como el gasto de energía por trabajo desarrollado, que en el caso de la marcha, está dado en consumo de oxígeno por metro avanzado. El oxígeno es consumido cuando los músculos se contraen, por lo que la eficiencia de la marcha se mejora disminuyendo el esfuerzo muscular para caminar. Esto se da gracias a dos mecanismos: (1) sustituyendo el esfuerzo muscular por el uso de los momentos de inercia producidos en la marcha, y (2) evitar al máximo que el cuerpo salga de la línea de progresión.

El uso de los momentos es máximo cuando la persona camina a una velocidad natural. Ya que cuando lo hace más rápido o más lento, existe mayor esfuerzo muscular. En cuanto a la minimización de la pérdida de la línea de progresión, se realiza gracias a la coordinación de los movimientos de la rodilla, la pelvis y el tobillo, para mantener una distancia constante entre las extremidades durante la postura.

### **3.3 MOVIMIENTO DE LAS ARTICULACIONES.**

Para obtener un resultado satisfactorio de los tres elementos funcionales explicados con anterioridad, se requiere de una interacción compleja y cambiante en cada una de las secciones de la extremidad inferior. Durante la fase de postura los cambios son inducidos pasivamente por el peso corporal, y, durante la etapa de oscilación, el movimiento es provocado por la acción de los músculos. La interacción de las secciones de la extremidad puede ser analizada por el movimiento aislado de cada una de las articulaciones, en este caso, la de mayor importancia a considerar es la del tobillo por lo que se menciona primero.

#### **3.3.1 Tobillo**

El tobillo presenta dos periodos de dorsiflexión y flexión plantar durante cada ciclo de la marcha. Al principio de la fase de postura (contacto del talón con el piso) el tobillo presenta  $90^\circ$  ó  $0^\circ$  grados, como algunos autores prefieren expresarlo, para éste trabajo se utiliza  $0^\circ$  cuando no se presenta ningún tipo de flexión. Con la caída del pie al piso, alcanza  $10^\circ$  de flexión plantar, seguido de un movimiento opuesto hasta alcanzar  $10^\circ$  de

dorsiflexión. Cuando esto sucede, se reanuda la flexión plantar hasta alcanzar  $20^\circ$  al final de la fase de postura. Durante la oscilación de la rodilla, el tobillo regresa rápidamente a su posición neutral y se queda así hasta el inicio del siguiente ciclo. Estos ángulos los podemos observar en la siguiente figura donde FP significa flexión plantar y DF significa Dorsiflexión.

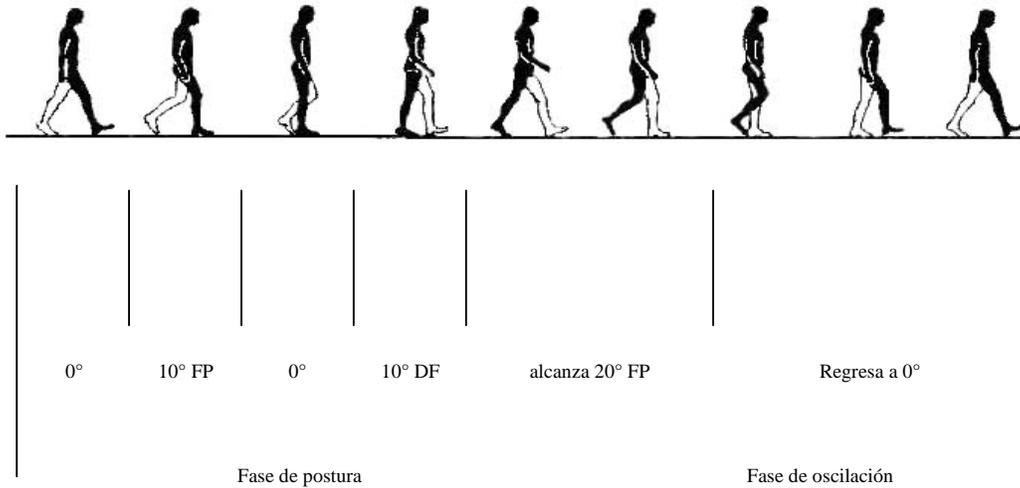


Fig. 3.4 Ciclo de la marcha [19]

### 3.3.2 Rodilla

La rodilla, así como el tobillo, tiene dos periodos de flexión y dos periodos de extensión durante cada ciclo de marcha. Comienza extendida completamente, y en algunos casos puede estar flexionada  $5^\circ$ , cuando el talón toca el piso. Rápidamente se flexiona  $15^\circ$  grados y progresivamente regresa a neutro o extensión total. Cuando comienza el apoyo con ambos pies, al final de la fase de postura, esta se comienza a flexionar nuevamente hasta alcanzar los  $60^\circ$  durante la fase de oscilación de la rodilla.

### 3.3.3 Cadera

La cadera presenta solo un periodo de extensión y flexión en cada ciclo de marcha. Cuando el pie toca el piso comienza flexionada  $30^\circ$ , durante la etapa de postura esta se

extiende lentamente hasta alcanzar 10° de hiperextensión. La flexión comienza nuevamente al final de la fase de postura cuando el peso está sostenido por ambos pies y ésta continúa hasta alcanzar los 30° iniciales.

### **3.4 FASES DE LA MARCHA**

Las fases de la marcha explicadas anteriormente es posible dividir las en sub-fases para entender mejor el trabajo que realiza cada una de las articulaciones para satisfacer las necesidades de la extremidad completa. Esta división resulta en 8 unidades funcionales conocidas como fases de la marcha y fueron que inicialmente propuestas por Jacqueline Perry [23].

#### **3.4.1 Sub-fases de la Postura**

El objetivo de esta fase de postura consiste en permitir la progresión y mantener el equilibrio mientras soporta al cuerpo. Esto es posible subdividirla en cinco sub-fases

- Contacto inicial
- Carga sobre el pie
- Postura media
- Postura final
- Pre-oscilación

De las cuales se dará una breve explicación a continuación

#### **Contacto Inicial**

Este contacto se da cuando el talón toca el suelo por primera vez. El ángulo más común entre el pie y el suelo es de 25° y en la mayoría de los casos el talón se encuentra en

posición neutral o con  $3^\circ$  de flexión plantar. La rodilla esta flexionada entre  $0^\circ$  y  $5^\circ$ , y la cadera esta flexionada  $30^\circ$ .

Debido a estos ángulos y a la manera en que el peso del cuerpo esta cayendo, crea un vector vertical que pasa por delante de la cadera y la rodilla y detrás del tobillo (sobre el talón). Esto ocasiona torques o momentos en la rodilla, tobillo y cadera. Este vector puede ser observado en la Fig. 3.5.

El trabajo desempeñado por la rodilla y el tobillo es muy importante para poder tener un contacto adecuado con el suelo. La posición neutral del tobillo depende de la movilidad libre de la articulación y del trabajo de los músculos de la tibia. La extensión de la rodilla depende de los cuádriceps y gracias a la cadera se da el ángulo entre el piso y el pie.

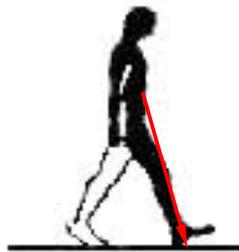


Fig. 3.5 Vector del peso cuando el contacto con el piso ocurre [19]

### **Carga sobre el pie**

El objetivo principal de esta fase es la aceptación del peso de manera que asegura la estabilidad del mismo y siga permitiendo el avance.

### *Tobillo*

Una vez que se hizo contacto el pie se deja caer contra el piso de manera controlada, alcanzando  $10^\circ$  de flexión plantar. El contacto realizado por la planta del pie contra el piso debe ser gradual para evitar lesiones, y este trabajo es realizado por los músculos de la tibia para evitar que el pie azote contra el piso. Existe cierta rotación en la articulación, provocada por el contacto lateral del talón, pero fuertes ligamentos en el tobillo provocan que éste gire hacia adentro y regrese a su alineación normal. El vector de fuerza se encuentra ligeramente por detrás del tobillo como podemos observar en la Fig. 3.6.

#### *Rodilla*

En esta fase la rodilla se encuentra flexionada  $15^\circ$ . Los músculos de la tibia empujan rápidamente a la misma hacia delante para obtener la flexión plantar ya mencionada, y el muslo y el tronco la siguen pero a menor velocidad lo que provoca que el vector de la línea de peso cambie de posición y se ubique detrás de la rodilla provocando un torque o momento en la flexión.

#### *Cadera.*

El gran momento de flexión que se presentó durante el contacto inicial en la cadera se ve atenuado por dos acciones pasivas. El rápido alineamiento trae a la línea de peso del cuerpo muy cerca de la cadera por lo que el brazo de palanca es disminuido a casi nulo y el impulso de la tibia provoca que el fémur avance también.

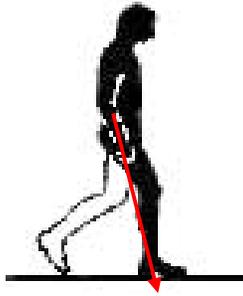


Fig. 3.6 Vector de peso en la carga sobre el pie. [19]

### **Postura – media.**

El objetivo principal es utilizar el apoyo completo del pie para hacer que el cuerpo avance sobre él. Comienza una etapa en la que el cuerpo se apoya sobre un solo pie ya que el otro es despegado del piso para oscilar. Gracias al contacto total que existe entre la planta del pie y el suelo, se cuenta con gran estabilidad cuando el tobillo sirve como mecedora para hacer que el cuerpo avance. El vector del cuerpo pasa del talón a la planta del pie.

### *Tobillo*

Cuando comienza el apoyo sobre solo una de las piernas el tobillo sigue en flexión plantar de al menos  $5^\circ$ , gradualmente el tobillo comienza con flexión contraria hasta alcanzar los  $10^\circ$  de dorsiflexión poco antes de que el talón se levante para la etapa final de la postura. El tobillo sirviendo como mecedora permite que la tibia rebase su posición neutral y el peso del cuerpo se encuentra completamente sobre la planta del pie por delante del tobillo, esto se puede observar en la Fig. 3.7.

### *Rodilla*

La rodilla se flexiona un poco más alcanzando los  $18^\circ$  en el apoyo sobre un solo pie, después la rodilla comienza estirarse gradualmente hasta quedar totalmente extendida. El trabajo máximo de los cuádriceps se realiza al inicial esta fase para provocar que el fémur avance junto con la tibia. Una vez que el vector del peso corporal pasa por delante de la rodilla el trabajo de los cuádriceps se reduce ya que la extensión es provocada por el mismo peso.

### *Cadera*

La flexión de la cadera también se reduce gradualmente, ya que para que el tronco esté derecho una vez que la extremidad busca la verticalidad, se requiere que la cadera esté extendida. El músculo abductor de la cadera realiza el trabajo mientras los extensores se relajan.

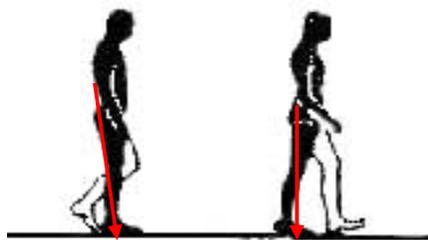


Fig. 3.7 Vectores de peso en la fase de postura – media [19]

### **Postura Final.**

Se inclina el cuerpo dejándolo caer hacia delante para generar fuerzas de propulsión. El levantamiento del talón representa el comienzo de esta fase. De esta forma la planta del pie es la que sirve como mecedora para lograr que el cuerpo avance y el peso del cuerpo

se apoya sobre una sola pierna. Durante esta etapa tanto el tobillo como el pie son de crítica importancia.

### *Tobillo*

Al comienzo de esta etapa el tobillo cae en  $10^\circ$  de dorsiflexión, movimiento que se revierte para alcanzar 5 grados de flexión plantar comenzando el impulso. Cuando el talón se levanta el vector del peso apunta hacia la parte final de la planta del pie (casi en los dedos) y la distancia entre el vector y el centro de la articulación del tobillo genera el torque máximo de dorsiflexión en el ciclo de marcha.

### *Pie*

Debido a que el apoyo se encuentra sobre la planta y el tobillo se genera un torque en la parte media del pie, el cual se corrige con un movimiento de inversión. También gracias a que el apoyo se encuentra en la parte distal del pie concentrado en la cabeza del metatarso, las falanges o dedos se dorsiflexionan hasta  $20^\circ$ , esto con dos objetivos: proporcionar mayor área de apoyo y generar fuerzas de propulsión.

### *Rodilla*

La rodilla puede estar completamente extendida o con una flexión máxima de  $5^\circ$  y esto no se debe la acción de los músculos, sino que gracias a que el peso sigue por delante de la rodilla.

### *Cadera.*

La extensión de la cadera continúa para mantener derecho el tronco, esto hasta lograr una hiperextensión de  $10^\circ$ . Conforme el cuerpo va cayendo sobre la otra extremidad los

abductores se comienzan a relajar. En la siguiente figura podemos observar la posición del vector de peso.

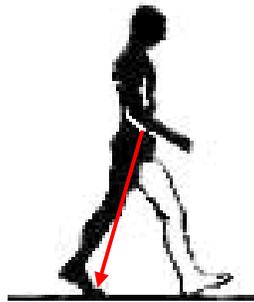


Fig. 3.8 Vector de fuerza de la postura final [19]

### **Pre – oscilación**

La tarea principal de esta fase es preparar a la extremidad para oscilar. La rodilla es la articulación de mayor importancia para realizar esta tarea. La rodilla tiene una flexión rápida y pasiva de  $40^\circ$ , debido a que el peso del cuerpo ha avanzado tanto sobre el eje de la planta del pie que la tibia pierde estabilidad. Se dice que es pasiva ya que no intervienen músculos flexores. Se provoca un torque de flexión.

En la cadera se inicializa la flexión recuperando la hiperextensión alcanzada en la fase anterior llegando a una posición neutra. El tobillo tiene una rápida flexión plantar de  $20^\circ$  y este es otro evento pasivo debido a que los músculos están relajados. En cuanto al pie la articulación del metatarso con las falanges sigue en dorsiflexión y aún existe contacto con el suelo pero el apoyo es mínimo debido a que éste se encuentra en su mayoría sobre la otra extremidad.

### **3.4.2. SUB-FASES DE LA OSCILACIÓN.**

Esta fase tiene la responsabilidad de levantar el pie del piso, oscilarlo para que avance y prepararlo para el contacto inicial del siguiente ciclo. Este lo podemos dividir en tres sub – fases:

- Oscilación inicial
- Oscilación media
- Oscilación final

Que serán explicadas a continuación

### **Oscilación inicial**

La flexión de la cadera y de la rodilla es importante para esta fase. La cadera se flexiona 20° rápidamente cuando se despegan los dedos del piso. De la misma forma la rodilla se flexiona otros 20° hasta alcanzar 60° de flexión total, considerando que alcanzó una flexión previa de 40° de la fase anterior, que es la necesaria para que los dedos del pie no toquen el piso y afecten a la marcha.

La dorsiflexión del tobillo es iniciada pero solo se logran recuperar 10 de los 20° de la flexión plantar obtenida con anterioridad.

### **Oscilación media.**

En esta sub-fase es importante la alineación de la tibia, mientras la extremidad avanza para evitar que el pie choque contra el piso.

La cadera alcanza su máxima flexión de 30°. La relajación de los músculos flexores permite que la rodilla se extienda pasivamente con la ayuda de la gravedad, al final de esta sub-fase la rodilla está únicamente flexionada 30°.

La posición neutra del tobillo se obtiene y es mantenida hasta el final de esta etapa.

### **Oscilación final.**

El avance llega a su fin y la extremidad es preparada para iniciar la fase postura y con esto un nuevo ciclo de marcha manteniendo los  $30^\circ$  de flexión de la cadera y la rodilla se extiende por completo controlada por los cuádriceps. En el tobillo lo ideal es la posición neutra, pero muchas veces ésta tiene una pequeña flexión plantar de  $3^\circ$  a  $5^\circ$ .

Es importante darse cuenta que los músculos del tobillo únicamente son accionados para mantener estable el peso del cuerpo sobre el pie, a diferencia de la rodilla, donde los músculos cuádriceps actúan para flexionar y extender la rodilla en algunas partes del ciclo de marcha. Esto quiere decir que el consumo de energía provocado por el accionamiento de músculos responsables de mover la rodilla, es mucho mayor al consumo ocasionado por los músculos tibiales usados para estabilizar el tobillo.

Es importante conocer y comprender el análisis de la marcha para realizar un diseño con el que se pueda caminar. Este capítulo proporciona los ángulos necesarios en el tobillo en la marcha común de una persona, los cuales serán utilizados como parámetros para poder realizar algunos cálculos en el capítulo del diseño. Cabe mencionar que una persona amputada que utiliza una prótesis, no presenta el mismo patrón de marcha y el diseño busca que se acerque lo más posible al patrón natural.