

Biomecânica do Pé

Paulo Roberto Miziara Yunes Filho

BIOMECÂNICA DO PÉ

- O ser humano adota uma postura ortostática e uma locomoção bipodálica baseada em ciclos de pêndulos harmônicos que é única entre os mamíferos.¹ Há diversas teorias que procuram determinar os fatores que levaram os primatas quadrúpedes a assumir essa postura, dado que ela apresenta uma série de desvantagens em relação à velocidade de movimento e ao dispêndio de energia naqueles primatas que apresentam posição ortostática “eventual”. Entre as teorias para a evolução ao bipedalismo estão: melhora visual do ambiente circunjacente (The Watching Out Hypothesis), liberação das mãos para outras funções que não a marcha (The Freeing of the Hands Hypothesis), lançar objetos, carregar comida, carregar a prole, etc.
- O fato é que os seres humanos adaptaram-se fisicamente para uma postura ereta em que o centro de massa do corpo fica verticalmente centralizado sobre a base de apoio que são os dois pés. Isso de uma forma harmônica e com baixo dispêndio de energia.² Apesar disso, o aparelho locomotor parece não ter o seu melhor desempenho na postura ereta estática, que é desconfortável após longos períodos, provocando mais fadiga nos membros inferiores do que a caminhada.³ Nosso estudo tem como foco principal a caminhada ou marcha.

MARCHA

- Para entendermos a biomecânica do pé, precisamos entender as tarefas que o pé desempenha. Obviamente a função primordial é a de deslocamento. Entretanto, a despeito das irregularidades do terreno e obstáculos em geral, o ser humano consegue desempenhar essa tarefa de forma graciosa e suave.
- Para que haja deslocamento, o membro inferior precisa fazer uma propulsão para frente. Para isso, precisa de um pé suficientemente rígido que possa atuar como uma alavanca transmitindo a energia dos músculos e ligamentos no ato de desprendimento deste com o solo.
- Por outro lado, quando o pé novamente entra em contato com o solo, este precisa ser flexível o suficiente de forma a absorver a energia desse impacto poupando obviamente as estruturas do aparelho locomotor mas, principalmente armazenando essa energia cinética em forma de energia potencial nos diversos ligamentos e músculos. Essa energia mais tarde será convertida novamente em energia cinética, fechando o ciclo. Esse sistema mostra-se muito eficiente do ponto de vista energético.
- Como veremos adiante, essa dupla função do pé, ora rígido e ora flexível se deve ao funcionamento da articulação transversa do pé, ou articulação de Chopard. Essa articulação

tem um papel central na biomecânica do pé e diversas características anatômicas concorrem sinergicamente para “bloquear” ou “desbloquear” a articulação de Chopard nas diversas fases do ciclo da marcha.

- Vale notar ainda mais uma capacidade do pé humano: o pé executa essas funções descritas anteriormente de forma independente da regularidade ou irregularidade do solo, pois adapta-se a essas irregularidades sem grande prejuízo do seu desempenho. Isso se deve aos movimentos de pronação e supinação do pé que, como veremos mais tarde, são movimentos complexos combinados de diversas articulações.

ARTICULAÇÃO TRANSVERSA TARSAL (CHOPARD)

- Começaremos então por essa articulação. Ela é composta pelas articulações talonavicular e calcaneocuboídea. Ambas as articulações isoladamente permitem um pequeno movimento de flexão e extensão do antepé em relação ao retropé. Elas possuem eixos paralelos quando a articulação subtalar está em posição valga, e nesse caso estão ambas livres para fletir ou estender, isto é, estão **desbloqueadas**. Quando a subtalar assume uma posição vara, no entanto, o plano de movimento destas articulações perde esse paralelismo, porque a talonavicular mantém-se alinhada ao tálus, enquanto a calcaneocuboídea variza junto ao calcâneo. Elas então se impedem mutuamente de fletir ou estender por serem adjacentes, gerando um impedimento mecânico. Elas estão então **bloqueadas**. (*Figura 1*)

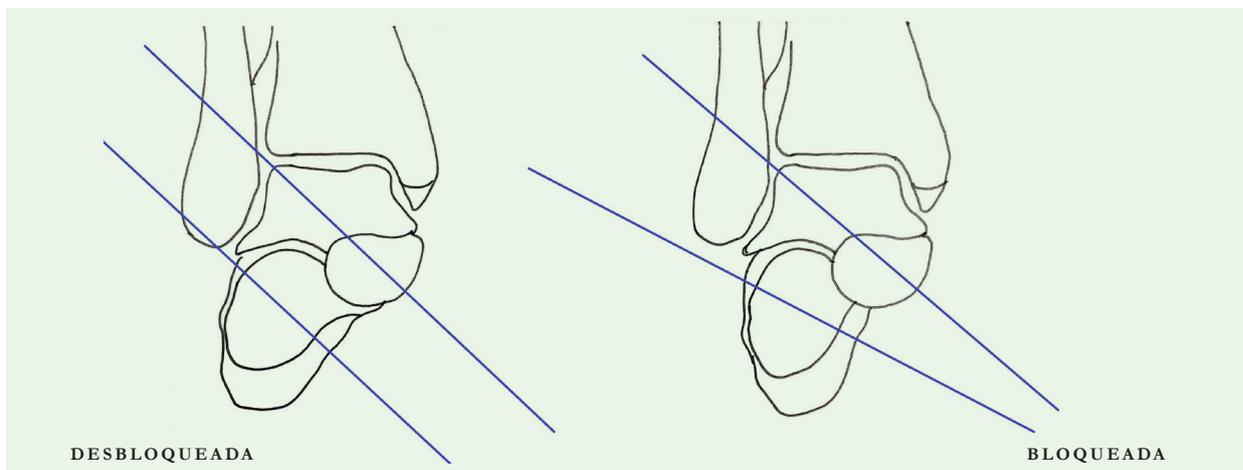


FIGURA 1 | *Articulação Transversa do pé (Chopard)*

- Como podemos observar, a posição de varo ou valgo da subtalar é a que determina esse bloqueio ou desbloqueio da Chopard. Veremos então como é feito esse controle da subtalar pelas diversas articulações nas diversas fases da marcha e como elas atuam de forma sinérgica e harmônica para este fim.

ARTICULAÇÃO DO TORNOZELO

- A articulação do tornozelo é a que permite a dorsiflexão e a flexão plantar do pé. Ela funciona aproximadamente como uma dobradiça, mas ela não é exatamente perpendicular ao eixo da tibia. O eixo da articulação do tornozelo apresenta uma obliquidade que corresponde aproximadamente às pontas dos maléolos, sendo seu eixo então de superoanteromedial para inferoposterolateral, em um ângulo de aproximadamente 82° com o eixo da tibia. Isso faz com que o pé rode externamente no plano transverso quando o tornozelo faz dorsiflexão e rode internamente quando o tornozelo faz flexão plantar. (Figura 2)

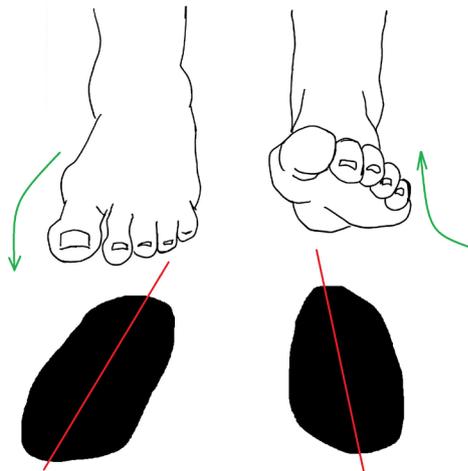


FIGURA 2 | Movimentação da articulação do tornozelo

ARTICULAÇÃO SUBTALAR

- Apesar de haver uma grande variação individual, observa-se que em média, no plano transverso a subtalar apresenta um eixo com obliquidade de anteromedial para posterolateral de 16° e, no plano sagital, um eixo com obliquidade de anterosuperior para posteroinferior de 42° . Quando, tendo o pé fixo ao solo, a perna sofre uma rotação externa, essa nova posição é absorvida pela subtalar, varizando o retropé. No caso de uma rotação interna da perna, o retropé valgiza. (Figura 3)

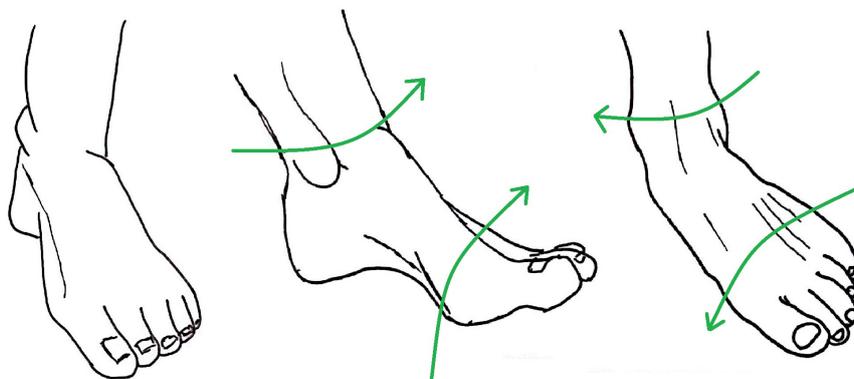


FIGURA 3 | Movimentação da articulação subtalar

- As articulações intertarsais apresentam movimentação limitada.

ARTICULAÇÃO DE LISFRANC

- Importa saber nesta articulação que há grande movimentação do primeiro raio na 1ª articulação cunhometatarsal. Embora o músculo fibular longo exerça um controle ativo desta articulação, o papel exercido pela fáschia plantar não pode ser ignorado.
- A fáschia plantar origina-se na tuberosidade do calcâneo e insere-se na base das falanges proximais. Ela participa na formação da placa plantar sob as cabeças metatarsais e age passiva e mecanicamente abaixando (ou fletindo) o primeiro metatarso quando ocorre a dorsiflexão da 1ª metatarsofalangeana. Esse mecanismo assemelha-se a um cabo numa roldana, onde a roldana é a cabeça no metatarso e o cabo é a própria fáschia plantar. Essa flexão do primeiro raio eleva o arco plantar varizando o antepé. Esse movimento se transmite ao retropé quando o pé está apoiado e essa varização do retropé transmite-se à tibia rodando-a externamente. (Figura 4)

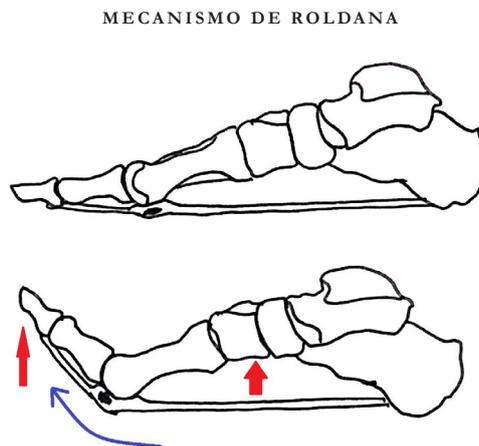


FIGURA 4 | Fáschia plantar

FÓRMULA METATARSAL

- A fórmula metatarsal promove uma obliquidade na linha das diversas articulações metatarsofalangeanas, devido ao maior comprimento do segundo metatarso em relação aos metatarsos laterais progressivamente mais curtos, sendo que o quinto é o mais curto. O primeiro metatarso funcionalmente atua no mesmo comprimento do segundo metatarso. Em média, observa-se uma obliquidade de 50° a 70° com o maior eixo do pé. No desprendimento do calcâneo, o pé fica apoiado no antepé. Conforme vai ocorrendo dorsiflexão das metatarsofalangeanas com os dedos fixos ao solo, ocorre uma supinação do pé devido a essa obliquidade da fórmula metatarsal que novamente transmite-se ao retropé em forma de varização.

MOVIMENTOS DO PÉ

- As diversas articulações do pé executam movimentos combinados que resultam na pronação e na supinação do pé. A pronação ocorre pelo movimento combinado da dorsiflexão do tornozelo com a eversão da subtalar e da abdução do antepé (rotação externa). Já a supinação consiste na combinação oposta: flexão plantar do tornozelo, inversão da subtalar e adução do antepé (rotação interna).

CICLO DA MARCHA

- Agora vamos entender como as características individuais das articulações do pé atuam sinergicamente de forma a executar as suas funções mecânicas.
- A marcha humana consiste numa progressão rítmica e cíclica que envolve todos os segmentos corporais de forma a efetuar a função de deslocamento com o menor dispêndio de energia possível. O centro de massa do corpo inevitavelmente sofre um deslocamento vertical e lateral, inerentes à marcha bipodálica, ao transferir o peso do corpo, de um membro ao outro. Entretanto, no ser humano esse deslocamento é minimizado e suavizado em ambos os planos através da coordenação das diversas articulações desde a pelve até o pé. (Figura 5)

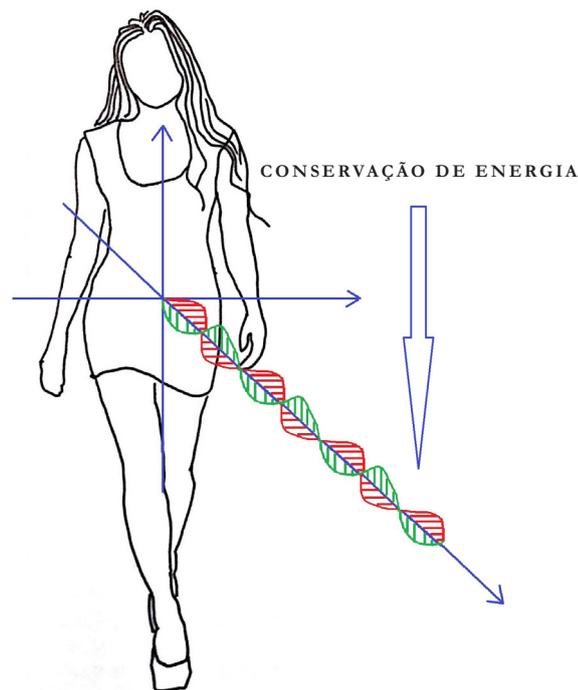


FIGURA 5 | Balanço do centro de gravidade durante a marcha

- Um ciclo completo da marcha consiste no toque do calcâneo de um pé até o toque do calcâneo do mesmo pé. O pé então passa por duas fases que consistem na fase de balanço, que corresponde a aproximadamente 38% do ciclo, e na fase de apoio, correspondendo aos demais 62%. A fase de apoio é a que nos interessa, pois é nesta fase que o pé sustenta o peso do corpo assim como absorve e transmite a energia cinética corporal.

- A fase de apoio pode ser dividida em 3 etapas ou intervalos:
 - 1º intervalo
 - Compreende 0 a 15% do ciclo. Ocorre do toque do calcâneo até o apoio completo do pé ao solo (flat foot). Nessa fase ocorre flexão plantar gradual do pé através de uma atividade do compartimento anterior da perna, em contração excêntrica.
 - Ocorre uma pronação ou varização do retropé desbloqueando a Chopard. Concomitantemente ocorre uma rotação interna da tibia. Nessa fase ocorre absorção do peso do corpo pelo pé com diminuição do arco plantar às custas do desbloqueio da articulação transversa.
 - Os diversos ligamentos do pé “absorvem” essa energia cinética transformando-a em energia potencial, assim como os músculos do compartimento posterior vão se alongando progressivamente em relação ao seu comprimento de repouso, o que permite posteriormente a recuperação desta energia cinética de forma relativamente passiva também pelo músculo, dando esse caráter de eficiência a esse mecanismo, do ponto de vista energético.
 - 2º intervalo
 - Compreende de 15% a 40% do ciclo. Nesta fase ocorre a transferência então do centro de massa do corpo por sobre o tornozelo, levando à dorsiflexão progressiva dele até a sua dorsiflexão máxima antes do desprendimento do calcâneo. A atividade muscular agora fica por conta da musculatura intrínseca do pé, compartimento posterior e lateral.
 - Ocorre rotação externa progressiva da tibia porque o membro contralateral, em fase de balanço, está passando para a frente do corpo, o que leva a um reposicionamento da pelve que se transmite para a perna de apoio. Como o pé está fixo ao solo, essa rotação externa da perna se dissipa na subtalar que, como visto anteriormente, promove uma inversão gradual do retropé com aumento da estabilidade da articulação de Chopard (bloqueio da articulação transversa).
 - O mediopé passa de uma estrutura flexível absorvedora de impacto para uma estrutura rígida com função de braço de alavanca propulsora.
 - 3º intervalo
 - Compreende de 40% a 62% do ciclo da marcha. Ocorre desprendimento do calcâneo com uma transferência gradual do peso do corpo para o membro contralateral. Com a flexão plantar gradual do pé, há uma atividade da musculatura intrínseca do pé, assim como do compartimento posterior da perna. Agora passa a atuar também o mecanismo de roldana da fásia plantar assim como a obliquidade da fórmula metatarsal, promovendo ainda mais inversão do retropé com estabilização da Chopard para o impulso final de desprendimento do pé.

Resumindo: Fatores que levam à inversão da subtalar

- 1 - Balanço do membro contralateral.
- 2 - Natureza oblíqua da articulação do tornozelo.
- 3 - Função da fásia plantar - mecanismo de roldana.
- 4 - Configuração oblíqua da fórmula metatarsal.

CORRIDA

- Algumas palavras sobre corrida. O ser humano é um corredor nato? Já foi demonstrada a ineficácia da corrida bipodálica versus a corrida quadrúpede.^{1,4} Algumas teorias sugerem que o homem teve um comportamento mais detritívoro do que caçador propriamente dito (The Scavenging Hypothesis)¹ antes do desenvolvimento de armas balísticas. A corrida de explosão é utilizada em outros primatas de forma esporádica em situações de perigo. A corrida de “endurance” entre os primatas é exclusiva do homem e alguns trabalhos sugerem que ela teve um papel migratório nos humanos de forma similar a outros mamíferos não primatas.
- Durante a marcha sempre há um pé em contato com o solo. Conforme a velocidade de deslocamento aumenta, surge uma fase “flutuante” que se incorpora ao ciclo no qual ambos os pés estão sem contato com o solo. A fase de duplo apoio também é inexistente na corrida.
- Conforme a velocidade aumenta, o tempo que o pé passa em contato com o solo diminui percentualmente e também em tempo real.³ E durante esse breve período de contato com o solo, as forças verticais envolvidas são de duas vezes e meia a três vezes o peso corporal.
- 75% dos corredores calçados fazem o toque do pé com o solo do retropé para o antepé (Rear-foot strike - RFS). Os 25% restantes dividem-se em toque pelo médiopé (Mid-foot strike - MFS) e toque pelo antepé (Fore-foot strike - FFS).⁵ Alguns estudos sugerem que a corrida com RFS carrega uma maior sobrecarga mecânica do que a FFS. Estes mesmos autores defendem a corrida descalça FFS em detrimento da calçada RFS sugerindo que a primeira traria menor sobrecarga do aparelho locomotor.⁵ Essa teoria é controversa porque a corrida FFS traz uma maior sobrecarga do tendão calcâneo assim como do antepé, pois aumenta o tempo de contato do antepé com o solo durante o ciclo da corrida.

REFERÊNCIAS

1. The evolution of the upright posture and gait—a review and a new synthesis, C. Niemitz, *Naturwissenschaften* (2010) 97:241–263
2. *Biomechanical Analysis of Fundamental Human Movements*, AE Chapman, p.56-57
3. *Surgery of the foot and ankle 8th edition*, MJ Coughlin, RA Mann, CL Saltzman, p.4
4. Endurance running and the evolution of Homo, DM Bramble, DE Lieberman, *Nature* (2004)
5. Foot strike patterns and collision forces in habitually barefoot versus shod runners, DE Lieberman, M Venkadesan*, WA. Werbel, AI Daoud, S D’Andrea, IS Davis, RO Mang’Eni, Y Pitsiladis, *Nature* (2009)