

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE EDUCAÇÃO FÍSICA, FISIOTERAPIA E DANÇA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS DO MOVIMENTO HUMANO

**A fisiomecânica da corrida em inclinação extrema:
Fundistas versus velocistas**

Leonardo De Los Santos Bloedow

Porto Alegre

2021

Leonardo De Los Santos Bloedow

**A fisiomecânica da corrida em inclinação extrema:
Fundistas versus velocistas**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências do Movimento Humano da Escola de Educação Física, Fisioterapia e Dança da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências do Movimento Humano.

Orientador: Prof. Dr. Leonardo Alexandre Peyré Tartaruga

Porto Alegre

2021

Leonardo De Los Santos Bloedow

**A fisiomecânica da corrida em inclinação extrema:
Fundistas versus Velocistas**

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Natalia Andrea Gomeñuka
Universidad Católica de las Misiones - UCAMI - Argentina

Prof. Dr. Flávio Antônio de Souza Castro
Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS

Prof. Dr. Fábio Juner Lanferdini
Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

Prof. Dr. Aldo Savoldelli
Università degli Studi di Verona - UNIVR

Orientador - Prof. Dr. Leonardo Alexandre Peyré Tartaruga
Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS

CIP - Catalogação na Publicação

Bloedow, Leonardo De Los Santos

A fisiomecânica da corrida em inclinação extrema:
Fundistas versus velocistas / Leonardo De Los Santos
Bloedow. -- 2021.

60 f.

Orientador: Leonardo Alexandre Peyré Tartaruga.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Escola de Educação Física, Programa
de Pós-Graduação em Ciências do Movimento Humano,
Porto Alegre, BR-RS, 2021.

1. Locomoção. 2. trabalho mecânico. 3. potência
mecânica. 4. massa mola. I. Tartaruga, Leonardo
Alexandre Peyré, orient. II. Título.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família principalmente aos meus pais, o exemplo e a educação que eles me proporcionaram são motivos de grande orgulho. Espero seguir seus passos e cultivar seus ensinamentos.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Leonardo Alexandre Peyré-Tartaruga pela confiança e pela oportunidade de fazer parte do grupo de pesquisa Locomotion, é um grande privilégio ser seu aluno.

Agradeço a todos os integrantes da banca de avaliação Profa. Dra. Natalia Andrea Gomeñuka, Prof. Dr. Flávio Antônio de Souza Castro, Prof. Dr. Fábio Juner Lanferdini e Prof. Dr. Aldo Savoldelli pelo gentil aceite e importantes contribuições com o trabalho.

Agradeço a todos os colegas do grupo Locomotion em especial meus grandes amigos Patrick Guimarães e André Ivaniski Mello por toda dedicação e comprometimento em todo o desenvolvimento desse trabalho.

Por fim, agradeço a todos os professores que participaram da minha formação acadêmica.

Resumo

Na corrida em terreno plano existe a participação do mecanismo minimizador do gasto energético denominado *Massa mola* fornecendo energia elástica armazenada e liberada pelos tendões e músculos durante a passada favorecendo um menor custo metabólico. Em inclinações positivas a contribuição desse sistema passa a ser negligenciável modificando a mecânica da corrida. Os objetivos do presente estudo foram comparar os determinantes fisiomecânicos da corrida em inclinação extrema, em velocidades máximas e percentuais da máxima, entre corredores fundistas e velocistas. Nossas hipóteses foram que o componente vertical seria o determinante mais importante do trabalho mecânico externo e potência externa; e o componente de membros inferiores seria o determinante mais importante do trabalho mecânico interno e potência interna. Ambos sendo os maiores responsáveis pela magnitude do trabalho mecânico total e potência mecânica total. A dissertação é dividida em quatro capítulos. Após a apresentação geral da dissertação (capítulo 1), nós introduzimos a justificativa para o objetivo principal do estudo (capítulo 2) e fornecemos uma base teórica para a realização do nosso experimento (capítulo 3). Com o objetivo de analisar a fisiomecânica da corrida em inclinação extrema, realizamos um estudo empírico (capítulo 4) em que parâmetros energéticos e espaço-temporais foram analisados em inclinação de 25% em velocidade máxima e em velocidades de 80%, 60% e 40% da velocidade máxima, por vinte quatro corredores divididos em dois grupos: doze fundistas e doze velocistas. Observamos que o trabalho mecânico total aumentou em função do aumento da velocidade, tendo o grupo velocistas apresentado valores mais altos. O trabalho mecânico externo vertical e o trabalho mecânico interno de membros inferiores foram os componentes que mais influenciaram em magnitude os resultados do trabalho mecânico total, por conta de ajustes na técnica de corrida, como os aumentos da frequência e comprimento de passada impostos pela inclinação e velocidade dos testes. O custo metabólico de correr aumentou em função da velocidade em ambos os grupos, com o grupo velocistas atingindo maiores valores, devido aos maiores trabalho e potência mecânica realizados em todas intensidades de corrida. A partir desses achados é possível observar que as diferenças entre os grupos possivelmente estão relacionadas à maior capacidade de desenvolver potência dos velocistas, visto que a inclinação extrema de 25% influenciou diretamente os

determinantes mecânicos da corrida incapacitando o sistema massa mola de fornecer energia elástica.

Palavras-chave: Locomoção, trabalho mecânico, potência mecânica, massa mola.

Abstract

In running on flat terrain, the primary mechanism that minimizes energy expenditure called the spring-mass model provides elastic energy stored and released by tendons during the stride, favoring a lower metabolic cost. On positive slopes, the contribution of this system becomes negligible by modifying the running mechanics. The objective of the present study was to compare the biomechanical determinants of running on extreme slopes, at maximum speeds and percentages of the maximum, between long distance runners and sprinters. Our hypotheses were that the vertical component would be the most important determinant of external mechanical work and power; and the lower limbs component would be the most important determinant of internal mechanical work and power. Both being largely responsible for the magnitude of total mechanical work and power. The dissertation is divided into four chapters. After a general presentation (chapter 1), we introduce the justification for the main objective of this dissertation (chapter 2) and provide a theoretical basis for the achievement of our experiment (chapters 3). In order to analyze the biomechanics of running at extreme slope, we conducted an empirical study (chapter 4) in which energetic and spatiotemporal parameters were analyzed at 25% slope at maximum speeds and at speeds of 80%, 60% and 40% of the maximum, for twenty-four runners divided into two groups: twelve long distance runners and twelve sprinters. We observed that the total mechanical work increased due to the increase in speed, with the sprinters group having higher values. The vertical external mechanical work and the internal mechanical work of the lower limbs were the components that most influenced the magnitude of the total mechanical work, due to adjustments in the running technique, such as increases in frequency and stride length imposed by slope and speed of the tests. The metabolic cost of running increased due to the speed in both groups, with the sprinters group reaching higher values, due to the greater mechanical work and power performed in all running intensities. From these findings, it is possible to observe that the differences between groups are possibly related to the greater capacity to develop power for sprinters, since the extreme 25% slope directly influenced the running mechanical determinants, disabling the spring mass system to provide elastic energy.

Keywords: Locomotion, mechanical work, mechanical power, spring mass.

LISTA DE FIGURAS

Figura 8 – Modelo conceitual das variáveis mecânicas na corrida em inclinação extrema. 56

LISTA DE ABREVIações

C: Custo metabólico

COM: Centro de massa corporal

Df: Duty factor

Eff⁺: Eficiência positiva

Eff: Eficiência negativa

EK: Energia cinética

EKL: Energia cinética médio-lateral

EKv: Energia cinética vertical

EKF: Energia cinética horizontal

EL: Energia potencial elástica

EM: Energia mecânica

EMV: Energia mecânica vertical

END: Grupo de corredores de endurance

GMM: General mixed models

PE: Energia potencial gravitacional

P_{Fw}: Potência externa horizontal

P_{Ext}: Potência mecânica externa

P_{Int}: Potência mecânica interna

P_{Lw}: Potência mecânica interna de membros inferiores

P_{Tot}: Potência mecânica total

P_{Up}: Potência mecânica interna de membros superiores

P_{Trk}: Potência mecânica interna do tronco

Pv: Potência externa vertical

SF: Frequência de passada

SL: Comprimento de passada

SPT: Grupo de corredores velocistas

TA: Tempo da fase aérea da passada

TC: Tempo de contato do pé com o solo

TP: Tempo da passada

W_{Tot}: Trabalho mecânico total

W_{Ext}: Trabalho mecânico externo positivo

W_{Fw}: Trabalho externo horizontal

W_{Int} : Trabalho mecânico interno

W_{Neg} : Trabalho mecânico externo negativo

W_v : Trabalho externo vertical

W_{Lw} : Trabalho interno de membros inferiores

W_{Up} : Trabalho interno de membros superiores

W_{Trk} : Trabalho interno de tronco

SUMÁRIO

1. Apresentação geral	13
2. Introdução	14
2.1Objetivos e hipóteses	16
3. Revisão de literatura	16
4. Conclusão	25
5. References	27

1 Apresentação geral

Este trabalho faz parte de uma linha de pesquisa do grupo de pesquisa Locomoção sob coordenação do professor Dr. Leonardo Alexandre Peyré-Tartaruga. O principal objetivo do grupo é estudar o mecanismo de economia de energia durante a locomoção humana em diferentes padrões de marcha, condições de tarefas, ambientes e populações. O interesse por investigar as questões relacionadas a fisiomecânica da corrida me acompanha desde a graduação em educação física, quando tive o privilégio de ser aluno de iniciação científica do professor Antônio Carlos Stringhini Guimarães e da professora Carina Wasen Fraga cujos ensinamentos fundaram minha formação como professor, treinador e pesquisador.

Este documento é dividido em quatro capítulos. Após uma apresentação geral (capítulo 1), nós introduzimos a justificativa para o objetivo principal desta dissertação (capítulo 2) e fornecemos uma base teórica para a realização do nosso experimento (capítulo 3). Com o objetivo de analisar a fisiomecânica da corrida em inclinação extrema, realizamos um estudo empírico (capítulo 4) em que parâmetros mecânicos, cinéticos e espaço-temporais foram analisados em inclinação de 25% em velocidades máximas e em velocidades 80%, 60% e 40% da velocidade máxima, por vinte quatro corredores divididos em dois grupos: doze fundistas e doze velocistas.

2 Introdução

Estudos que se dedicam a analisar a energética da locomoção de uma forma integrativa entre aspectos fisiológicos e biomecânicos descrevem a corrida como um dos padrões básicos de locomoção de muitos animais inclusive do ser humano (CAVAGNA; HEGLUND; TAYLOR, 1977). Dentro da sua complexidade destaca-se o fato de que a corrida para o homem, por locomover-se utilizando os membros inferiores, não é uma forma eficiente de movimentar-se, pois os membros devem ser continuamente reposicionados e a velocidade dos pés cai a zero a cada passada, fazendo com que seja adicionada energia metabólica a cada ciclo para reacelerar e manter o movimento (ROBERTS et al., 1998).

A partir dessa análise, o modelo físico-matemático *massa mola* foi desenvolvido para representar o comportamento das energias mecânicas potencial gravitacional (PE), energia cinética (EK) e energia potencial elástica (EL) do centro de massa corporal (COM) durante a corrida. Esse modelo auxilia no entendimento de como é empregada e conservada a energia mecânica buscando uma minimização do custo metabólico (C). Ele define a movimentação do COM como um rebote elástico, o que revela a contribuição da EL armazenada e liberada pelos tendões e músculos, auxiliando na minimização do gasto de energia metabólica (BLICKHAN, 1989). A literatura evidencia a participação da EL ao demonstrar que o dispêndio metabólico praticamente não se altera mesmo com o aumento da velocidade de corrida (CAVAGNA E KANEKO, 1977; CAVAGNA; SAIBENE; MARGARIA, 1964).

Levando em conta os comportamentos energéticos do COM é possível calcular a energia mecânica (EM) do COM e o trabalho mecânico na corrida. O trabalho mecânico total (W_{Tot}) é composto pela soma de seus componentes, o trabalho realizado para elevar e acelerar o COM em relação ao ambiente, denominado trabalho externo (W_{Ext}) e o trabalho realizado para acelerar e girar os segmentos em relação ao COM denominado de trabalho interno (W_{Int}) (CAVAGNA; SAIBENE; MARGARIA, 1963, 1964; WILLEMS; CAVAGNA; HEGLUND, 1995).

Durante a corrida em terreno plano os movimentos do COM para cima e para baixo são semelhantes, fazendo com que os trabalhos externo positivo (W_{Ext}^+) e externo negativo (W_{Ext}^-) também sejam iguais. Isso indica o bom funcionamento do sistema *massa mola*, pois o armazenamento de EL nos músculos e tendões

acontece na fase excêntrica da passada durante a primeira metade da fase de apoio do pé com o solo e é liberada na fase concêntrica durante a segunda metade da fase de apoio do pé com o solo (DEVITA; HELSETH; HORTOBAGYI, 2007).

Estudos mostram que alguns fatores externos influenciam nesse equilíbrio prejudicando o funcionamento do sistema minimizador de gasto energético, como por exemplo, a inclinação da superfície de corrida (MARGARIA et al., 1963; MINETTI et al., 2002). Foi observado que conforme aumenta o percentual de inclinação o trabalho mecânico da corrida é quase que exclusivamente dedicado na tarefa de elevar o COM em relação ao ambiente inabilitando o armazenamento da EL, sendo o componente muscular o principal responsável por fornecer energia para a atividade, tendo como limitantes a força e potência muscular disponíveis.

Minetti et al. (1994) apontam que o aumento da inclinação causa o aumento do trabalho mecânico e conseqüentemente do custo metabólico comparando com a corrida no plano. Os autores atribuem esses aumentos de trabalho mecânico e custo aos ajustes na mecânica da corrida, como a diminuição do comprimento de passada (SL) e o aumento da frequência de passada (SF) comparados com os da corrida no plano. Além de alterações nos SL e SF, Vernillo et al. (2015) também apontam que comparando com a corrida no plano, em terreno inclinado há um aumento na fração de tempo de contato do pé com o solo em relação ao tempo de um ciclo de passada, o duty factor (Df), o que concorre para maiores trabalho mecânico e custo em relação ao plano.

Ao nosso conhecimento a maioria dos estudos que analisaram a energética da corrida na inclinação, até o presente momento, foram realizados em baixas velocidades e percentuais de inclinação de no máximo 15%. Considerando que a inclinação afeta diretamente o funcionamento do sistema massa mola e a energia necessária para cumprir a tarefa de subida é fornecida pelos músculos do atleta, ter maior aptidão de desenvolver potência altera as respostas de parâmetros fisiomecânicos da corrida, se avaliados em inclinação extrema, em diferentes velocidades inclusive nas máximas?

Mais especificamente, como se manifestam os determinantes fisiomecânicos da corrida em inclinação extrema desempenhados por atletas de diferentes perfis de treinamento? Esse é a principal pergunta do presente trabalho.

2.1 Objetivos e hipóteses

Objetivo Geral

Comparar os determinantes fisiomecânicos da corrida em inclinação positiva extrema entre corredores fundistas e velocistas.

Objetivos Específicos

Prover uma compreensiva e detalhada descrição dos determinantes do trabalho mecânico e potência mecânica na corrida em inclinação positiva extrema, realizadas por dois grupos de atletas com diferentes características de treinamento (fundistas e velocistas).

Delinear os dois perfis de corredores quanto aos determinantes do trabalho e potência mecânica, calculando as contribuições de suas diferentes partes. Além disso, estimar através de uma equação preditiva o custo metabólico da corrida nessas condições de inclinação.

Hipóteses

Nossas hipóteses foram que o componente vertical seria o determinante mais importante para o W_{Ext} e P_{Ext} ; e o componente de membros inferiores seria o determinante mais importante para o W_{Int} e P_{Int} . Ambos sendo os maiores responsáveis pela magnitude do trabalho mecânico e potência mecânica.

3. Revisão de literatura

Fisiomecânica da corrida

A Fisiomecânica busca analisar os métodos utilizados por seres humanos e até animais para se movimentarem na superfície terrestre. Através de pesquisas, esta ciência empenha-se em apresentar, de uma forma integrativa sob as perspectivas da biomecânica e da fisiologia, descrições detalhadas sobre a mecânica e a energética da locomoção identificando as características e diferenças

entre os padrões de marcha (ALEXANDER, 1991, 1984; CAVAGNA; HEGLUND; TAYLOR, 1977).

O homem, como vários mamíferos terrestres, se locomove utilizando as pernas, o que não é essencialmente eficiente, porque os membros precisam ser continuamente reposicionados no solo e a velocidade do pé cai para zero a cada passo (desaceleração) provocando um adicional custo energético a cada ciclo para manter-se em movimento (ROBERTS et al., 1998). Mas a utilização de pernas oferece algumas vantagens, como a possibilidade de movimentações em qualquer tipo de terreno, superar obstáculos, escalar e trocar de direção com facilidade (HEGLUND; CAVAGNA; TAYLOR, 1982; HEGLUND; CAVAGNA, 1985).

Ainda que muitos primatas utilizem a locomoção bípede, apenas a espécie humana adotou esse tipo de marcha como forma exclusiva de locomoção. A partir de uma visão evolutiva o homem que, no passado, realizava movimentações que duravam longos períodos em migrações territoriais, e movimentos de curta duração e alta intensidade, como em fuga de predadores ou arremesso de objetos em caçadas, hoje ainda utiliza esses perfis de movimentos, porém não mais por questões de sobrevivência, mas sim em gestos desportivos e gestos de seu cotidiano, demandando energia oriunda de origens metabólicas e mecânicas (DICKINSON et al., 2000; HEGLUND; CAVAGNA; TAYLOR, 1982).

A locomoção humana é caracterizada por dois principais padrões de marcha sendo eles a caminhada e a corrida. Isso torna possível mover-se a uma velocidade baixa por longos períodos de tempo ou em altas velocidades como durante um *sprint* (SAIBENE; MINETTI, 2003).

Modelos físico-matemáticos foram desenvolvidos para representar o comportamento do COM durante a caminhada e corrida contribuindo para o entendimento de como cada tipo de marcha emprega e conserva energia mecânica buscando uma minimização do C. Esses modelos explicam como acontece, em cada padrão de marcha a interação das três energias fundamentais associadas ao COM, são elas: energia potencial gravitacional (PE), energia cinética (EK) e energia potencial elástica (EL) (CAVAGNA; HEGLUND; TAYLOR, 1977; CAVAGNA; SAIBENE; MARGARIA, 1964).

A caminhada humana, sob uma ótica de um modelo fisiomecânico, se assemelha a um ovo rolando ou a um pêndulo invertido. Esses modelos conceituais descrevem o comportamento das mudanças das energias PE e EK do COM. Essas

energias mudam em oposição de fase (enquanto uma atinge valor mínimo a outra atinge valor máximo) durante o contato com o solo na fase de apoio unipodal, o que permite trocas entre as duas energias (CAVAGNA; HEGLUND; TAYLOR, 1977; CAVAGNA; SAIBENE; MARGARIA, 1963; CAVAGNA; THYS; ZAMBONI, 1976).

A corrida é classicamente descrita pelo modelo físico-matemático denominado “massa-mola” em que o COM oscila para cima e para baixo, de modo que as energias mecânicas, PE e EK oscilam em fase projetando o corpo à frente (HAUGEN; MCGHIE; ETTEMA, 2019; BLICKHAN, 1989). Quando a velocidade da caminhada torna-se muito dispendiosa do ponto de vista metabólico, a corrida é naturalmente adotada devido à necessidade do corpo de minimizar o gasto energético para vencer uma distância. Nesse caso, então, a corrida passa a ser a opção mais econômica (CAVAGNA; KANEKO, 1977).

Enquanto o modelo mecânico minimizador de energia da caminhada baseia-se nas trocas entre as EK e PE (pêndulo invertido), o sistema massa-mola no ser humano reduz o consumo de energia metabólica na corrida a partir do comportamento do COM simbolizado por um sistema complacente apoiado sobre uma única mola (BLICKHAN, 1989). O deslocamento do COM assemelha-se a um rebote elástico, o que evidencia a presença da EL, armazenada e liberada pelas estruturas não contrateis (tendões), somada as EK e PE, contribuindo para a minimização do dispêndio de energia metabólica (SAIBENE; MINETTI, 2003).

Destaca-se que, a EL tem um importante papel auxiliando para que o C praticamente não se altere mesmo com um aumento na velocidade de corrida (ALEXANDER, 1984; CAVAGNA; LEGRAMANDI; PEYRÉ-TARTARUGA, 2008). A partir dessa relação energética, é possível mensurar a energia mecânica (EM) e o trabalho mecânico (durante um ciclo de passada (CAVAGNA; KANEKO, 1977).

Historicamente, a partir do séc. XX, o método para calcular o trabalho mecânico e a potência mecânica na locomoção surgiu com base no teorema de König. O trabalho mecânico realizado para se locomover foi dividido em trabalho externo (W_{Ext}) e trabalho interno (W_{Int}) (CAVAGNA; SAIBENE; MARGARIA, 1963; CAVAGNA; HEGLUND; TAYLOR, 1977).

O trabalho realizado para elevar e acelerar o COM em relação ao ambiente é denominado trabalho externo (W_{Ext}). Ele é composto pela soma do trabalho vertical (W_V) com o trabalho horizontal (W_{Fw}), que por sua vez são calculados respectivamente pelas variações das energias cinética vertical (EK_V) e potencial

gravitacional (PE); e energias cinética horizontal (E_{KF}) e cinética médio lateral (E_{KL}) (CAVAGNA; SAIBENE; MARGARIA, 1964; KANEKO, 1990).

O W_{Int} é o trabalho associado à aceleração de segmentos corporais (braços, pernas e tronco) em relação ao COM. Este por sua vez é composto pelos trabalhos rotacional e Linear, calculados individualmente para cada segmento a partir das variações das energias cinéticas internas (CAVAGNA; HEGLUND; TAYLOR, 1977; CAVAGNA; SAIBENE; MARGARIA, 1964).

A partir da soma dos incrementos positivos dessas variações energéticas se encontram os valores dos W_{Ext} e W_{Int} que por fim compõem o trabalho mecânico total (W_{Tot}) (CAVAGNA; KANEKO, 1977; WILLEMS; CAVAGNA; HEGLUND, 1995). A quantidade de W_{Tot} , e de cada um dos seus componentes realizada em um período específico de tempo, ou seja a taxa de realização do trabalho, denomina-se potência mecânica (P_{Tot}) (WILKIE, 1960).

A literatura mostra que a energética da corrida é fortemente sensível a variações da velocidade, que por sua vez depende de determinantes espaço temporais, tais como o SL, SF e o Df (CAVAGNA et al., 1991; DA ROSA et al., 2019).

O SL é a distância ântero-posterior percorrida pelo corpo a partir do primeiro contato do pé com o solo até o ponto onde o mesmo pé toca o solo novamente, normalmente medida em metros (m). A SF é o número de vezes que o evento passada ocorre por unidade de tempo, sendo convencionalmente utilizado o Hertz (Hz) como unidade de medida. Entre essas variáveis espaço temporais existe uma relação ótima para cada velocidade de corrida. Observa-se que o SL e a SF auto-selecionados pelo sujeito normalmente são as que proporcionam o menor custo energético para dada velocidade (CAVAGNA et al., 1997; KANEKO, 1990; VERNILLO et al., 2014). O Df também tem um relevante papel na cinemática da corrida, pois ele representa o percentual relativo à passada em que existe o contato simples do pé com o solo. Maior Df indicam maior tempo de contato, menor eficiência e maior custo energético (VERNILLO et al., 2016).

Estudos que analisaram a fisiomecânica da corrida observaram que o aumento da velocidade provoca o aumento do W_{Tot} . Em relação aos seus componentes, o aumento da velocidade de corrida ocasiona a diminuição do W_{Ext} e aumento do W_{Int} (CAVAGNA; KANEKO, 1977; CAVAGNA; LEGRAMANDI; PEYRÉ-TARTARUGA, 2008).

Os autores destacam que o aumento da velocidade de corrida, a partir de baixas velocidades, até aproximadamente $7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, acontece pelo aumento do SL, pois o custo energético para aumentar o SL é menor comparado com o custo de aumentar a SF inicialmente. Porém, em velocidades acima de $7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, o incremento é mais determinado pelo aumento da SF, que por sua vez provoca o aumento do W_{Int} causado pela maior movimentação dos segmentos braços e pernas em relação ao COM (CAVAGNA et al., 1991; MARGARIA et al., 1963; WILLIEMS; CAVAGNA; HEGLUND, 1995).

Além disso, observa-se que em velocidades mais baixas de corrida o W_{Ext} é maior, comparado com altas velocidades, pois nessas condições ocorre maior oscilação vertical do COM, que passa a diminuir conforme a velocidade aumenta, pois o maior trabalho realizado passa a ser o de deslocar o COM para frente e conseqüentemente leva a diminuição do W_{Ext} conforme a velocidade aumenta (CAVAGNA; KANEKO, 1977; WILLIEMS; CAVAGNA; HEGLUND, 1995).

O aumento na velocidade de corrida também traz repercussões sobre os eventos contato e despegue ao longo de um ciclo de passada, provocando alterações na relação tempo de contato do pé com o solo, na fase de apoio, e tempo aéreo na fase de balanço (CAVAGNA, 2006). Durante a corrida em velocidades de até aproximadamente $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ existe uma simetria nos tempos de contato e aéreo. Em velocidades acima disso passa a existir uma assimetria nesta relação com o tempo aéreo, que se torna maior que o de contato (CAVAGNA; FRANZETTI; HEGLUND, 1988).

Nessas condições, o maior tempo aéreo aponta a possibilidade de uma potencialização do armazenamento da energia elástica EL nos tendões durante as contrações excêntricas enquanto o COM desacelera na fase de apoio e posterior liberação ao reacelerar na fase concêntrica. Essa assistência provida da EL permite que a musculatura forneça menor adicional energético, atuando quase que isometricamente a cada passada, colaborando para a diminuição do C (ALEXANDER, 1991, 1984; CAVAGNA; THYS; ZAMBONI, 1976).

Fukunaga; Matsuo; Ichikawa (1981), ao realizarem a análise da corrida em *sprints* de 60 m, descrevem como variações na velocidade de corrida afetam o trabalho e a potência mecânica para acelerar o corpo para frente. Em velocidades a partir de zero a $9.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, os autores observaram que a potência média aumentou com o aumento da velocidade durante o *sprint*, atingindo valores entre 2500 a 3000

W em 9,5 s. Em velocidades baixas, os componentes contráteis dos músculos parecem ser os principais responsáveis pela produção de potência, enquanto que em altas velocidades, em torno de 7 a 9,5 m·s⁻¹, grande parcela da potência parece ser fornecida pela energia mecânica armazenada nos elementos elásticos (tendões) durante o alongamento em contrações excêntricas (trabalho negativo) e liberada auxiliando as contrações concêntricas (CAVAGNA; KANEKO, 1977; KALAMEN, 1968).

Considerando a forte interação entre esses parâmetros biomecânicos, é pertinente investigar como fatores externos, incluindo a variação na inclinação da superfície de corrida, podem influenciar essa relação e de que forma reagem os mecanismos minimizadores de gasto energético.

A energética da corrida em inclinação

A corrida, como uma forma de locomoção é objeto de estudo de muitos pesquisadores das áreas da biomecânica e fisiologia do exercício, que visam aumentar seu conhecimento e compreensão de suas variáveis caracterizadoras (CAVAGNA; SAIBENE; MARGARIA, 1964; SAIBENE; MINETTI, 2003).

Nos últimos anos, houve uma expansão das pesquisas sobre fatores biomecânicos e metabólicos determinantes do desempenho na corrida (FIRMINGER et al., 2018; GIOVANELLI et al., 2016; HOOGKAMER; TABOGA; KRAM, 2014). A literatura destaca que fatores ambientais e geográficos merecem atenção de estudos, pois variáveis intimamente ligadas ao desempenho da corrida podem sofrer modificações comprometendo o desempenho quando realizada sob determinadas condições (GIANDOLINI et al., 2016; IVERSEN; MCMAHON, 1992; VERNILLO et al., 2014).

Fatores geográficos estão relacionados à geomorfologia, como diferentes composições ou densidades de piso e às variações de terreno, incluindo a inclinação da superfície de corrida. Nessas condições existem diferenças nas variáveis mecânicas entre a corrida no plano e a corrida em aclave, nas quais são feitas necessárias alterações para que o corredor se adapte às circunstâncias, principalmente buscando um menor C (GIANDOLINI et al., 2016; VERNILLO et al., 2015).

O C da corrida em terreno plano foi extensivamente investigado e caracterizado como independente da velocidade (MARGARIA et al., 1963). Em inclinações positivas, o C aumenta, comparado com a corrida no plano, principalmente em função dos ajustes na mecânica da corrida impostos pela inclinação (MINETTI et al., 1994; VERNILLO et al., 2016).

Minetti et al. (1994) analisaram o C e o trabalho mecânico da corrida em diferentes gradientes e velocidades. Eles observaram que o C aumentou de acordo com o aumento da inclinação entre os gradientes 0% a 15%. Corroborando com Minetti et al. (1993), os autores apontam como maior determinante desse aumento no C, o aumento do trabalho mecânico. Foi constatado que para manter uma velocidade constante na subida, corredores diminuíram seus SL e aumentaram suas SF. Modificações que influenciam diretamente os componentes do W_{Tot} , o W_{Ext} (relacionado a variações de energia do centro do COM em relação ao ambiente) e o W_{Int} (relacionado as variações de energia dos segmentos em relação ao COM).

Uma SF excessiva com SL encurtado pode aumentar o C por meio de um aumento do W_{Int} (FENN; MORRISON, 1930). Além disso, uma SF excessivamente baixa combinada com SL alongado pode resultar em maiores forças de reação do solo e um conseqüente aumento do C (PADULO et al., 2012, 2013).

Padulo et al. (2013) ao comparar a corrida com 7% de inclinação com a corrida no plano, em velocidades constantes em torno de 70% do consumo máximo de oxigênio, observaram que a SF na inclinação é cerca de 5% maior, e que o SL é menor também em torno de 5%. As estratégias de corrida em subida foram associadas ao aumento de SF e no tempo de contato do pé com o solo (TC), e diminuições concomitantes em SL e tempo aéreo (TA). A SF aumentada provocou maior W_{Int} em função da maior movimentação dos segmentos em relação ao COM. A SF está diretamente relacionada ao tempo de passada (TP) e mudanças na contribuição relativa do TP, ou seja, diminuições no TA e aumentos no TC, ocorrem em resposta ao aumento de SF. Essas relações espaço temporais são determinantes para as contribuições minimizadoras de gasto energético do sistema *massa mola*, pois o funcionamento ótimo do armazenamento e posterior liberação da EL, advinda dos elementos não contráteis das unidades musculo-tendão, depende do equilíbrio entre os componentes do W_{Ext} : os trabalhos externos positivo (W_{Ext}^+) e negativo (W_{Ext}^-) (CAVAGNA; KANEKO, 1977; CAVAGNA; SAIBENE; MARGARIA, 1963, 1964; CAVAGNA; THYS; ZAMBONI, 1976).

Ao correr em terreno plano, os movimentos para cima e para baixo do COM são iguais, fazendo com que W_{Ext}^+ e W_{Ext}^- realizados em relação ao ambiente, também sejam semelhantes a cada passada possibilitando que a EL seja armazenada e aproveitada (CAVAGNA; KANEKO, 1977; BLICKHAN, 1989). Na corrida em terrenos com inclinação positiva, o deslocamento para baixo do COM é quase nulo, conseqüentemente o W_{Ext}^+ passa a ser predominante com um residual W_{Ext}^- , sinalizando que ainda existe uma pequena atuação do sistema massa mola. Observa-se também, que na corrida em aclive existe a diminuição do SL, aumento da SF e diminuição da oscilação vertical do COM (MINETTI et al., 2002; VERNILLO et al., 2016).

Na corrida em ascensão com gradientes acima de 15%, o COM passa a realizar uma trajetória praticamente monotônica e o trabalho mecânico externo realizado torna-se quase todo positivo (MARGARIA et al., 1963; MINETTI et al., 2002; ROBERTS; BELLIVEAU, 2005). A prevalência do W_{Ext}^+ se justifica pelo fato de que nas inclinações positivas, a energia para elevar e acelerar o COM é predominantemente advinda de contrações concêntricas. A necessidade de aumentar a PE do COM a cada passada compele a musculatura a produzir um adicional energético para manter a velocidade constante e sobrepôr as condições impostas pelo terreno. Nesse cenário observa-se que o sistema massa mola ainda existe em inclinações menos íngremes e progressivamente desaparece conforme a inclinação aumenta (DEWOLF; PEÑAILILLO; WILLEMS, 2016; ROBERTS; BELLIVEAU, 2005).

Pavei et al. (2019), ao avaliarem a energética da corrida em *sprint* em terreno plano, verificaram que na fase de aceleração o comportamento da relação W_{Ext}^+ / W_{Ext}^- é semelhante ao da corrida em inclinação, pois há um predomínio dos movimentos do COM para cima crescendo monotonicamente e os movimentos para baixo são quase nulos, com a diferença de que o componente horizontal do trabalho externo, o W_{Fw} , predomina sobre o componente vertical, W_v , o que na corrida em aclive acontece de maneira inversa (DEWOLF; PEÑAILILLO; WILLEMS, 2016).

Estudos que visam integrar a fisiologia e a biomecânica muitas vezes utilizam a demanda energética total para calcular a eficiência mecânica (Eff). A Eff é a razão entre a energia mecânica gerada (trabalho mecânico) e a energia metabólica dispendida, portanto representa a capacidade do corpo de transformar um tipo de energia no outro (HEGLUND; CAVAGNA, 1985; PEYRÉ-TARTARUGA;

COERTJENS, 2018). A Eff tem alguns comportamentos e limites bem definidos. Sabe-se que em contrações totalmente concêntricas, a Eff máxima é de 25% visto que o resto do trabalho metabólico é convertido em outros tipos de energia, com destaque para a energia térmica. Em contrações excêntricas é possível chegar a Eff com valores de 100% uma vez que, mesmo com a produção de energia térmica, o reaproveitamento da energia absorvida do meio externo faz com que seja possível atingir valores altos de trabalho mecânico sem grande gasto metabólico (CAVAGNA; KANEKO, 1977; FERRETTI, 2015; WILKIE, 1960). Portanto, a Eff está ligada diretamente ao armazenamento de energia elástica pelas unidades músculo-tendão, e a presença de Eff superiores a 25% durante a corrida demonstra que há a presença de trabalho elástico (CAVAGNA; SAIBENE; MARGARIA, 1964; WILLEMS; CAVAGNA; HEGLUND, 1995).

Minetti et al. (2002), ao analisar a energética da corrida em diversos gradientes, salientam que o dispêndio energético é diretamente proporcional à inclinação em gradientes acima de 15%, apontando para uma Eff em torno de 25%. Esses achados concordam plenamente com a hipótese de Margaria et al. (1963; 1968), de acordo com a qual, a Eff da locomoção em aclive com gradientes extremos é semelhante a do trabalho muscular concêntrico. Nesse cenário os autores ressaltam que o mecanismo minimizador de gasto energético é fortemente influenciado sendo negligenciável a contribuição da EL.

A prática da corrida em inclinação vem crescendo nos últimos anos, tanto em corridas de aventura, nas quais se observa importantes variações de terreno, quanto em treinamentos que buscam o aprimoramento de capacidades físicas como força e velocidade (LOTURCO et al., 2015; PADULO et al., 2013; VERNILLO et al., 2014). Aprofundar os conhecimentos sobre as adaptações causadas pela inclinação na mecânica e energética da corrida vem a ser de substancial importância para atletas e treinadores no sentido de atingir um maior desempenho, bem como para a contínua busca de aprofundamento do estado da arte nas ciências da locomoção terrestre.

4. Conclusion

Our objectives were to carry out a detailed description of the determinants of mechanical work and mechanical power in running on extreme slope, by comparing endurance and sprinters athletes; delineate the two runner profiles as to the determinants of work and mechanical power, calculating the contributions of their different parts, and finally estimate the cost of running in these slope conditions.

We observed that in the 25% slope running, the increase in W_{Tot} with speed is mainly determined by the W_{Int} done by the lower limbs and the vertical component of W_{Ext} . The W_{LW} increased due to adjustments in SL and SF that increased with speed. The W_V composed practically all W_{Ext} , since COM moved almost exclusively upwards in relation to the environment (Figure 8).

The greater ability to develop P_{Tot} of the SPT group, mainly at maximum speeds, is evidenced by the fact that they perform higher SL in SF similar to those of the END group. Without the contribution of the elastic energy of the spring mass system, hindered by the effect of the slope, the mechanical power developed is produced essentially by the muscular component of the lower limbs, which explains the greater P_{Tot} and maximum speed reached by the SPT group. The C increased concomitantly with the increase in speed, following the values of W_{Ext} and W_{Int} , which also increased due to the increase in speed.

To our knowledge, this is the first study that examines the biomechanics of running on an extreme slope that includes a wide range of speed up to the maximum. It is noteworthy that the description made by determinants of the mechanical work and power during the uphill running shows the possibility of developing methods of power evaluation, considering that under conditions like those of our study it is possible to identify differences in performance in this variable. New studies are suggested aiming at the systematization of a test protocol comparing results with gold standard methods, in the search for a possible validation.

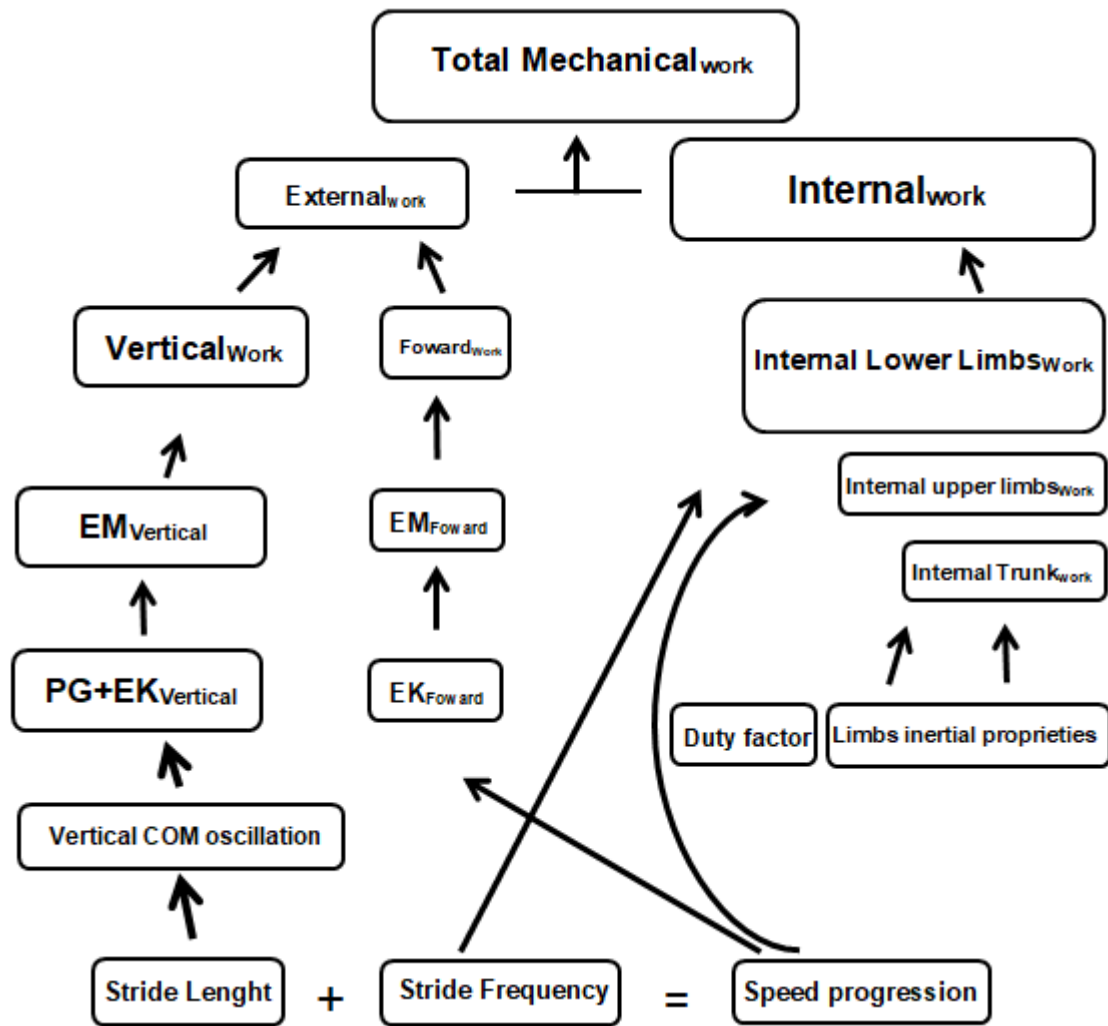


Figure 8 – Conceptual model of running extreme slope mechanics energies.

5. References

- ALEXANDER, R. M. Energy-saving mechanisms in walking and running. **The Journal of Experimental Biology**, v. 160, p. 55–69, 1991.
- ALEXANDER, R. M. Elastic energy stores in running vertebrates. **Integrative and Comparative Biology**, v. 94, n. December 1982, p. 85–94, 1984.
- BLICKHAN, R. The spring-mass model for running and hopping. **Journal of Biomechanics**, v. 22, p. 1217–1227, 1989.
- BORG, G. Psychophysical scaling with applications in physical work and the perception of exertion. **Scandinavian Journal of Work, Environment and Health**, v. 16, n. 1, p. 55–58, 1990.
- CAVAGNA, G. A.; KANEKO, M. Mechanical work and efficiency in level walking and running. **Journal of Physiology**, v. 268, p. 467–481, 1977.
- CAVAGNA, G. A. et al. The two power limits conditioning step frequency in human running. **Journal of Physiology**, v. 437, n. 1, p. 95–108, 1991.
- CAVAGNA, G. A. et al. The resonant step frequency in human running. **European Journal of Physiology**, v. 434, n. 6, p. 678–684, 1997.
- CAVAGNA, G. A. The landing-take-off asymmetry in human running. **Journal of Experimental Biology**, v. 209, n. 20, p. 4051–4060, 2006.
- CAVAGNA, G. A.; HEGLUND, N. C.; TAYLOR, C. R. Mechanical work in terrestrial locomotion: two basic mechanisms for minimizing energy expenditure. **American Journal of Physiology**, v. 233, n. 5, p. R243-61, 1977.
- CAVAGNA, G. A.; LEGRAMANDI, M. A.; PEYRÉ-TARTARUGA, L. A. Old men running: mechanical work and elastic bounce. **Proceedings of the Royal Society**, v. 275, n. 1633, p. 411–418, 2008.
- CAVAGNA, G. A.; SAIBENE, F. P.; MARGARIA, R. External work in walking. **Journal of Applied Physiology**, v. 18, p. 1–9, 1963.
- CAVAGNA, G. A.; SAIBENE, F. P.; MARGARIA, R. Mechanical work in running. **Journal of Applied Physiology**, v. 19, n. 2, p. 249–256, 1964.
- CAVAGNA, G.; FRANZETTI, P.; HEGLUND, N. C. The determinants of the step frequency in running, trotting and hopping in man and other vertebrates. **Journal of Physiology**, v. 399, p. 81–92, 1988.
- CAVAGNA, G.; THYS, H.; ZAMBONI, A. The sources of external work in level walking and running. **Journal of Applied Physiology**, v. 262, p. 639–657, 1976.
- CAVAGNA, G.; KOMAREK, L.; MAZZOLENI, S. The mechanics of sprint running. **Journal of Experimental Biology**, p. 709–721, 1971.
- CAVANAGH, P.; KRAM, R. Stride length in distance running: velocity, body dimensions, and added mass effects.pdf. **Medicine and Science in Sports and Exercise**, v. 21, n. 4, p. 467–479, 1989.
- CRIELAARD, J. M.; PIRNAY, F. Anaerobic and aerobic power of top athletes. **European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology**, v. 47, n. 3, p. 295–300, 1981.

- DA ROSA, R. G. et al. Landing-takeoff asymmetries applied to running mechanics: A new perspective for performance. **Frontiers in Physiology**, v. 10, n. MAR, 2019.
- DEVITA, P.; HELSETH, J.; HORTOBAGYI, T. Muscles do more positive than negative work in human locomotion. **Journal of Experimental Biology**, v. 210, n. 19, p. 3361–3373, 2007.
- DEWOLF, A. H.; PEÑAILILLO, L. E.; WILLEMS, P. A. The rebound of the body during uphill and downhill running at different speeds. **Journal of Experimental Biology**, v. 219, p. 2276–2288, 2016.
- DI PRAMPERO, P. E. Sprint running: a new energetic approach. **Journal of Experimental Biology**, v. 208, n. 14, p. 2809–2816, 2005.
- DICKINSON, M. H. et al. How animals move: an integrative view. **Science**, v. 288, n. 5463, p. 100–106, 2000.
- FENN, W.; MORRISON, C. Frictional and kinetic factors in the work of sprint running. **American Physiological Society**, v. 2, p. 583–611, 1930.
- FERRETTI, G. **Energetics of Muscular Exercise**. e-book, Springer Switzerland 2015.
- FINK, W. J.; COSTILL, D. L.; POLLOCK, M. L. Submaximal and maximal working capacity of elite distance runners. Part II. Muscle fiber composition and enzyme activities. **New York Academy of Sciences**, v. 301, n. 1, p. 323–327, 1977.
- FIRMINGER, C. R. et al. Joint kinematics and ground reaction forces in overground versus treadmill graded running. **Gait and Posture**, v. 63, n. April, p. 109–113, 2018.
- FUKUNAGA, A.; MATSUO, A.; ICHIKAWA, M. Mechanical energy output and joint movements in sprint running. **Ergonomics**, v. 24, n. 10, p. 765–772, 1981.
- GIANDOLINI, M. et al. Fatigue associated with prolonged graded running. **European Journal of Applied Physiology**, v. 116, n. 10, p. 1859–1873, 2016.
- GIOVANELLI, N. et al. Energetics of vertical kilometer foot races; Is steeper cheaper? **Journal of Applied Physiology**, v. 120, n. 3, p. 370–375, 2016.
- HARBER, M.; TRAPPE, S. Single muscle fiber contractile properties of young competitive distance runners. **Journal of Applied Physiology**, v. 105, n. 2, p. 629–636, 2008.
- HAUGEN, T.; MCGHIE, D.; ETTEMA, G. Sprint running: from fundamental mechanics to practice a review. **European Journal of Applied Physiology**, v. 119, n. 6, p. 1273–1287, 2019.
- HEGLUND, N. C.; CAVAGNA, G. A.; TAYLOR, C. R. Energetics and mechanics of terrestrial locomotion. III. Energy changes of the centre of mass as a function of speed and body size in birds and mammals. **Journal of Experimental Biology**, v. 97, n. 1, p. 41–56, 1982.
- HEGLUND, N. C.; CAVAGNA, G. A. Efficiency of vertebrate locomotory muscles. **Journal of Experimental Biology**, v. 115, p. 283–292, 1985.
- HOOBKAMER, W.; TABOGA, P.; KRAM, R. Applying the cost of generating force hypothesis to uphill running. **PeerJ**, v. 482, n. 1, p. 1–17, 2014.
- IVERSEN, J. R.; MCMAHON, T. A. Running on an incline. **Journal of Biomechanical Engineering**, v. 114, n. 4, p. 435–441, 1992.

- KALAMEN, J. L. Measurement of maximum muscular power in man. **Education, Physical University**, 1968.
- KANEKO, M. Mechanics and energetics in running with special reference to efficiency. **Journal of Biomechanics**, v. 23, n. 1, p. 57–63, 1990.
- KENTTÄ, G.; HASSMÉN, P. Overtraining and recovery a conceptual model. **Sports Medicine**, v. 26, n. 1, p. 1–16, 1998.
- KYRÖLÄINEN, H.; AVELA, J.; KOMI, P. Changes in muscle activity with increasing running speed. **Journal of Sports Sciences**, v. 23, n. 10, p. 1101–1109, 2005.
- LOTURCO, I. et al. Differences in muscle mechanical properties between elite power and endurance athletes: a comparative study. **Journal of Strength and Conditioning Research**, v. 29, n. 6, p. 1723–1728, 2015.
- LUPTON, H.; HILL, A. V. An analysis of the effects of speed on the mechanical efficiency of human muscular movement. **Physiology**, v. 1, n. 1, p. 338–353, 1923.
- MARGARIA, R. et al. Energy cost of running. **American Physiological Society**, p. 367–370, 1963.
- MARGARIA, R. Capacity and power of the energy processes in muscle activity: their practical relevance in athletics. **Zeitschrift für Angewandte Physiologie Einschließlich Arbeitsphysiologie**, v. 25, n. 4, p. 352–360, 1968.
- MERO, A.; KOMI, P. V.; GREGOR, R. J. Biomechanics of sprint running: a review. **Sports Medicine**, v. 13, n. 6, p. 376–392, 1992.
- MINETTI, A. E. Optimum gradient of mountain paths. **Journal of Applied Physiology**, v. 79, n. 5, p. 1698–1703, 1995.
- MINETTI, A. E.; ARDIGÒ, L. P.; SAIBENE, F. Mechanical determinants of gradient walking energetics in man. **Journal of Physiology**, v. 471, n. 10, p. 725–735, 1993.
- MINETTI, A. E.; ARDIGÒ, L. P.; SAIBENE, F. Mechanical determinants of the minimum energy cost of gradient running in humans. **Journal of Experimental Biology**, v. 195, p. 211–225, 1994.
- MINETTI, A. E. et al. Energy cost of walking and running at extreme uphill and downhill slopes. **Journal of Applied Physiology**, v. 93, n. 3, p. 1039–1046, 2002.
- MORIN, J. B. et al. Mechanical determinants of 100-m sprint running performance. **European Journal of Applied Physiology**, v. 112, n. 11, p. 3921–3930, 2012.
- MORIN, J. B.; EDOUARD, P.; SAMOZINO, P. Technical ability of force application as a determinant factor of sprint performance. **Medicine and Science in Sports and Exercise**, v. 43, n. 9, p. 1680–1688, 2011.
- OKUDAIRA, M. et al. Three-dimensional CoM energetics, pelvis and lower limbs joint kinematics of uphill treadmill running at high speed. **Journal of Sports Sciences**, v. 38, n. 5, p. 518–527, 2020.
- PADULO, J. O. et al. Kinematics of running at different slopes and speeds. **Journal of Strength and Conditioning Research**, v. 26, n. 5, p. 1131–1339, 2012.
- PADULO, J. O. et al. Footstep analysis at different slopes and speeds in elite race walking. **Journal of Strength and Conditioning Research** v. 27, n. 1, p. 125–129, 2013.

- PADULO, J. O. et al. A paradigm of uphill running. **Plos One**, v. 8, n. 7, p. 1–8, 2013.
- PAVEI, G. et al. Comprehensive mechanical power analysis in sprint running acceleration. **Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports**, v. 29, n. 12, p. 1892–1900, 2019.
- PEYRÉ-TARTARUGA, L. A.; COERTJENS, M. Locomotion as a powerful model to study integrative physiology: efficiency, economy, and power relationship. **Frontiers in Physiology**, v. 9, n. December, p. 1–16, 2018.
- RABITA, G. et al. Sprint mechanics in world-class athletes: A new insight into the limits of human locomotion. **Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports**, v. 25, n. 5, p. 583–594, 2015.
- ROBERTS, T. J. et al. Energetics of bipedal running: metabolic cost of generating force. **Journal of Experimental Biology**, v. 201, n. 19, p. 2745–2751, 1998.
- ROBERTS, T. J. Contribution of elastic tissues to the mechanics and energetics of muscle function during movement. **Journal of Experimental Biology**, v. 219, n. 2, p. 266–275, 2016.
- ROBERTS, T. J.; BELLIVEAU, R. A. Sources of mechanical power for uphill running in humans. **Journal of Experimental Biology**, v. 208, n. 10, p. 1963–1970, 2005.
- SAIBENE, F.; MINETTI, A. E. Biomechanical and physiological aspects of legged locomotion in humans. **European Journal of Applied Physiology**, v. 88, n. 4–5, p. 297–316, 2003.
- SCHACHE, A. G. et al. Lower-limb muscular strategies for increasing running speed. **Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy**, v. 44, n. 10, p. 813–824, 2014.
- SNYDER, K. L.; KRAM, R.; GOTTSCHALL, J. S. The role of elastic energy storage and recovery in downhill and uphill running. **Journal of Experimental Biology**, v. 215, n. 13, p. 2283–2287, 2012.
- SWANSON, S. C.; CALDWELL, G. E. An integrated biomechanical analysis of high speed incline and level treadmill running. **Medicine and Science in Sports and Exercise**, v. 32, n. 6, p. 1146–1155, 2000.
- TOWNSHEND, A. D.; WORRINGHAM, C. J.; STEWART, I. B. Spontaneous pacing during over ground hill running. **Medicine and Science in Sports and Exercise**, v. 42, n. 1, p. 160–169, 2010.
- TRAPPE, S. et al. Skeletal muscle signature of a champion sprint runner. **Journal of Applied Physiology**, v. 118, n. 12, p. 1460–1466, 2015.
- VERNILLO, G. et al. Influence of the world's most challenging mountain ultramarathon on energy cost and running mechanics. **European Journal of Applied Physiology**, v. 114, n. 5, p. 929–939, 2014.
- VERNILLO, G. et al. Energy cost and kinematics of level, uphill and downhill running: fatigue-induced changes after a mountain ultramarathon. **Journal of Sports Sciences**, v. 33, n. 19, p. 1998–2005, 2015.
- VERNILLO, G. et al. Biomechanics and physiology of uphill and downhill running. **Sports Medicine**, v. 47, n. 4, p. 615–629, 2016.

WILKIE, D. R. Man as a source of mechanical power. **Ergonomics**, v. 3, n. 1, p. 1–8, 1960.

WILLEMS, P. A.; CAVAGNA, G. A.; HEGLUND, N. C. External, internal and total work in human locomotion. **The Journal of Experimental Biology**, v. 198, n. Pt 2, p. 379–93, 1995.

WINTER, D. A. A new definition of mechanical work done in human movement. **Journal of Applied Physiology Respiratory Environmental and Exercise Physiology**, v. 46, n. 1, p. 79–83, 1979.

ZAMPARO, P. et al. Mechanical work and efficiency of 5 + 5 m shuttle running. **European Journal of Applied Physiology**, v. 116, n. 10, p. 1911–1919, 2016.

ZATSIORSKY, V. **Kinetics of Human Motion**. Human Kinetic, 2002.