RBCM | REVISTA BRASILEIRA DE CIÊNCIA E MOVIMENTO
Brazilian Journal of Science and Movement

ARTIGO DE REVISÃO

O paradoxo do amortecimento de calçados de corrida: uma revisão narrativa sobre tecnologias e impacto biomecânico

The paradox of running shoe cushioning: a narrative review of technologies and biomechanical impact

Wagner Rosa de Oliveira[1,2,*] **e Jeferson Fagundes Loss**[1]

[1]Departamento de Educação Física, Fisioterapia e Dança, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, RS, Brasil; [2]Departamento de Biomecânica, Grupo Dass S.A., Ivoti, RS, Brasil.

***Autor correspondente:** wagnerroef@gmail.com

https://doi.org/10.31501/rbcm.v34i1.15568

Resumo: A presente revisão apresenta o estado atual das tecnologias de calçados de corrida, destacando a evolução dos materiais e suas propriedades ao longo do tempo. A análise biomecânica tem a loading rate como uma medida importante de amortecimento corporal, embora haja divergências sobre a relação entre a rigidez dos calçados e essa taxa. Alguns estudos sugerem que calçados mais rígidos podem diminuir a loading rate, enquanto outros indicam o oposto. No entanto, não está claro se essa relação é verdadeira e se está diretamente ligada ao risco de lesões. O corpo adapta-se com a experiência de corrida, mas essas alterações são desconsideradas na maioria dos estudos. Além disso, diversas modificações nos calçados de corrida foram feitas ao longo do tempo para tentar diminuir as cargas durante a corrida, incluindo mudanças no design, materiais e amortecimento. No entanto, os resultados dessas modificações são variados e muitas vezes inconclusivos. Por fim, destaca-se a complexidade das interações entre os calçados de corrida, o corpo humano e as lesões relacionadas à prática esportiva, enfatizando a necessidade de pesquisas mais rigorosas e colaborativas entre universidades e empresas para entender melhor essas relações.
Palavras-chave: Calçados; Biomecânica; Lesões na corrida.

Abstract: This review presents the current state of running shoe technologies, highlighting the evolution of materials and their properties over time. Biomechanical analysis considers the loading rate as an important measure of body cushioning, although there are divergences regarding the relationship between shoe stiffness and this rate. Some studies suggest that stiffer shoes can decrease the loading rate, while others indicate the opposite. However, it is unclear whether this relationship is true and whether it is directly linked to injury risk. The body adapts with running experience, but these adaptations are disregarded in most studies. Additionally, various modifications have been made to running shoes over time to try to reduce loads during running, including changes in design, materials, and cushioning. However, the results of these modifications are varied and often inconclusive. Finally, the complexity of the interactions between running shoes, the human body, and related sports injuries is highlighted, emphasizing the need for more rigorous and collaborative research between universities and companies to better understand these relationships.
Keywords: Footwear; Biomechanics; Running injury.

Este trabalho está licenciado sob uma Licença Creative Commons Atribuição-NãoComercial 4.0 Internacional.

Introdução

A corrida é uma das atividades físicas mais praticadas no mundo hoje; estima-se que mais de 50% da população que realiza algum tipo de exercício pratica corrida para fins de rendimento ou simplesmente manutenção da qualidade de vida[1]. Em contrapartida a essa grande popularização, o número de lesões é exponencialmente grande, sendo que cerca de 56% dos praticantes são acometidos por lesões[2]. Alguns fatores são determinantes para isso, como quilometragem excessiva, mau gerenciamento das cargas de treinamento, forças de impacto excessivas, ou ainda o uso de calçados[3]. O calçado esportivo, por sua vez, é um equipamento utilizado com o objetivo de proteger ou ainda melhorar o rendimento do atleta na execução dos movimentos esportivos[4]. Atualmente, para cada modalidade esportiva existe um tipo de calçado, com características diferentes que lhe são atribuídas com a especificidade de cada esporte[5].

Na corrida, os calçados possuem como principal característica física ser leves e utilizar materiais altamente tecnológicos na entressola, os quais possuem diferentes propriedades físicas, dentre as

quais a mais valorizada e comentada entre corredores é a dureza do solado; esta, por sua vez, tem sido associada do ponto de vista prático com a capacidade de amortecimento do calçado[6]. No entanto, do ponto de vista físico, a dureza é a propriedade mecânica que descreve a resistência de um material a deformações plásticas permanentes causadas por forças externas. Em outras palavras, é a capacidade de um material resistir à penetração, tendo como resultado uma sensação mais suave ou mais rígida e levando a uma percepção confortável ou desconfortável na utilização do calçado[7]. Nesse sentido, hoje vemos no mercado uma grande variedade de produtos com os mais diferentes tipos de tecnologias aplicadas à entressola dos calçados utilizando materiais como Etileno Acetato de Vinila (EVA), Poliuretano (PU), Pebax, entre outros, sendo todos com a premissa de oferecer ao corredor uma boa sensação de conforto, com grande maciez e com consequente maior capacidade de amortecimento[8].

Do ponto de vista biomecânico, ao longo dos anos, dentre as diferentes medidas impostas para determinar o que seria o amortecimento gerado por esses calçados, Nigg et al.[9] definiram a loading rate ou a taxa de aplicação de força, como a principal variável representativa do amortecimento do corpo, isto é, o resultado da divisão do primeiro pico da força vertical, pelo tempo que levou a ocorrência desse pico. Nesse sentido, quase a totalidade dos estudos que usam plataforma de força para avaliar a corrida consideram essa medida como uma das mais importantes para definir as propriedades de amortecimento das cargas, bem como uma possível variável preditora do risco de lesão aumentado na corrida[10]. Clarke et al.[11] foram um dos primeiros a trazer a relação da utilização de entressolas mais rígidas com entressolas mais macias, e constataram diferenças sutis na época para Loading Rate.

O mesmo foi apresentado por Lafortune e Hennig[12], que mostraram que calçados com entressolas mais rígidas promoviam aumento das forças transmitidas a todo aparelho locomotor. No entanto, por outro lado, outros estudos demonstraram ao longo do tempo diminuições da loading rate com calçados mais rígidos em vez dos mais macios[13]. Contudo, uma das hipóteses apresentadas é que essas alterações são provocadas por conta de mudanças na cinemática do movimento, que por sua vez gera mudanças no padrão de movimento e coordenação dos membros inferiores, levando a alterações na força transmitida ao aparelho locomotor[14]. Junto dessas divergências entre os estudos quanto à diminuição das forças transmitidas aos membros inferiores, está a sua relação com a ocorrência de lesões; ao longo dos anos, foi mostrada uma ausência de associação entre forças de impacto e lesões na corrida[15]. Kulmala et al.[16] mostraram que calçados com menor dureza da entressola não foram os que tiveram menores valores de força de reação do solo e, por conseguinte, não diminuíram a ocorrência de lesões. Da mesma forma, Malisoux et al.[17] mostraram, em um estudo longitudinal acompanhando corredores ao longo de 2 anos, que não houve relação entre o número de lesões e a capacidade de amortecimento dos calçados.

Com base nessas afirmações, vemos um paradoxo: primeiramente, não há um consenso sobre calçados mais macios serem aqueles que promovem reduções nas forças aplicadas ao aparelho locomotor, assim como não parece existir alguma associação entre as forças aplicadas e uso de calçados com melhores taxas de absorção e consequentemente com um menor risco da ocorrência de lesões. O presente estudo tem como principais objetivos explanar de uma maneira clara e sintetizada sobre: Revisar criticamente a literatura sobre as propriedades biomecânicas de calçados de corrida, destacando características como dureza, rigidez e resiliência.

Discutir a relação entre amortecimento e lesões por impacto, com foco em variáveis biomecânicas, como loading rate e força de reação do solo. Analisar os efeitos adaptativos do aparelho locomotor, considerando alterações musculoesqueléticas e respostas neuromotoras em função das propriedades dos calçados. Avaliar as implicações de mudanças no design e materiais dos calçados, explorando suas repercussões na biomecânica da corrida e no risco de lesões. Propor diretrizes para futuros estudos e avanços tecnológicos, buscando uma melhor integração entre ciência, prática esportiva e desenvolvimento industrial.

Metodologia

Este estudo utiliza a abordagem de revisão narrativa, que se caracteriza pela análise crítica e síntese qualitativa de estudos relevantes em um campo específico, sem o uso de métodos estatísticos ou metanálise. Essa abordagem foi escolhida por permitir uma discussão mais ampla e detalhada sobre o tema do impacto biomecânico do amortecimento de calçados de corrida. A pergunta central desta revisão narrativa foi: "Como as propriedades biomecânicas de calçados de corrida

(dureza, resiliência e rigidez) influenciam o impacto no aparelho locomotor e o risco de lesões em corredores?

A pesquisa foi realizada nas seguintes bases de dados: PubMed/MEDLINE, Scopus, Web of Science e Google Scholar como forma complementar à busca. Foram utilizadas as seguintes palavras-chave tendo como base a plataforma PUBMED: ("Running Shoes" OR "Footwear") AND ("Cushioning" OR "Shock Absorption") AND ("Loading Rate" OR "Impact Forces") AND ("Biomechanics"). Os seguintes critérios de inclusão foram considerados: Estudos originais publicados entre 2000 e 2024, artigos escritos em inglês, português ou espanhol, pesquisas que investigaram propriedades biomecânicas de calçados de corrida, relação entre amortecimento e lesões por impacto, adaptabilidade do aparelho locomotor às forças aplicadas durante a corrida, estudos envolvendo participantes adultos (>18 anos) praticantes de corrida. Adicionalmente, devido à natureza da revisão narrativa e à necessidade de contextualização histórica e teórica, estudos clássicos anteriores ao ano de 2000 e artigos de revisão fundamentais para a biomecânica da corrida foram incluídos manualmente.

Todos os artigos identificados nas bases de dados foram exportados para o software Zotero, onde duplicatas foram removidas. Cada título e resumo foram avaliados para verificar a relevância do artigo de acordo com o tema. Os artigos considerados elegíveis foram lidos na íntegra, tendo como critérios de avaliação a clareza na descrição das propriedades do calçado, uso de métricas biomecânicas e relação com o objetivo da presente revisão. Foram extraídos de todos os artigos lidos na íntegra os dados de: título, autor, ano, descrição dos participantes, idade, nível de experiência em corrida, propriedades dos calçados e principais resultados biomecânicos e clínicos.

A evolução das tecnologias de amortecimento no calçado de corrida

O desenvolvimento de tecnologias de amortecimento em calçados de corrida tem sido marcado por avanços significativos nas últimas décadas, acompanhando a crescente popularidade da corrida como prática esportiva e recreativa. Desde os primeiros calçados tecnológicos lançados no final da década de 1970, com entressolas de espuma de Etileno Acetato de Vinila (EVA), até os modelos contemporâneos de alto desempenho, a indústria busca constantemente um equilíbrio entre conforto, performance e prevenção de lesões. Os primeiros calçados de corrida projetados com tecnologias específicas de amortecimento tinham como objetivo principal absorver as forças de impacto geradas no contato inicial do pé com o solo. A introdução do EVA representou um marco nessa evolução devido à sua leveza, flexibilidade e capacidade de dissipar energia[18]. Estudos iniciais, como os de Bates e Hamill[19], sugeriram que o aumento na espessura e na suavidade das entressolas estava associado à redução das forças verticais máximas.

No entanto, à medida que os corredores adotaram calçados mais macios, surgiram questionamentos sobre a eficácia dessas tecnologias na prevenção de lesões. Pesquisas realizadas por Lafortune e Hennig[12] indicaram que calçados com entressolas mais rígidas podem, em alguns casos, proporcionar maior estabilidade e reduzir a deformação excessiva dos tecidos, diminuindo as forças de reação do solo transmitidas ao corpo. Essa descoberta desafiou a visão simplista de que "mais macio é melhor" e abriu espaço para investigações mais detalhadas. Com o avanço das tecnologias de materiais, novas combinações foram introduzidas para melhorar o desempenho biomecânico dos calçados. Além do EVA, materiais como poliuretano (PU) e Pebax foram incorporados devido às suas propriedades únicas:

PU: Alta durabilidade e capacidade de retorno de energia, porém mais pesado em comparação ao EVA[7].

Pebax: Material leve e resiliente, amplamente utilizado em calçados de corrida de alta performance por combinar baixa densidade com alta elasticidade[8].

Esses materiais não apenas alteraram a percepção de conforto, mas também tiveram impactos significativos em variáveis biomecânicas, como a loading rate e o padrão de aterrissagem. Estudos recentes destacam que o Pebax, por exemplo, oferece uma combinação ideal para corredores que buscam melhorar a eficiência energética sem comprometer a proteção contra impacto[4]. Embora a indústria de calçados de corrida tenha se beneficiado dos avanços tecnológicos, ainda há uma ausência de regulação clara sobre as propriedades físicas ideais para diferentes perfis de corredores. A falta de padronização dificulta a comparação entre estudos e o desenvolvimento de diretrizes consistentes. Segundo Theisen et al[3], há evidências de que pequenas variações na dureza ou na espessura da entressola podem alterar

significativamente as forças aplicadas ao aparelho locomotor, mas essas mudanças não são uniformemente relatadas ou controladas em estudos experimentais. Por exemplo, enquanto alguns fabricantes promovem calçados com maior amortecimento como solução para reduzir lesões, pesquisas como as de Kulmala et al[16], mostram que a eficácia do amortecimento depende de fatores como técnica de corrida e frequência de treinamento. Além disso, variáveis como a altura do drop (diferença de altura entre a parte anterior e posterior do calçado) e o design da entressola desempenham papéis cruciais, muitas vezes subestimados em estudos focados apenas na dureza do material.

A introdução de tecnologias de amortecimento não apenas impacta variáveis biomecânicas, mas também influencia diretamente a percepção subjetiva do corredor em relação ao conforto e desempenho. Estudos como os de Hoogkamer et al[20] mostram que calçados com maior retorno de energia nas entressolas podem melhorar o desempenho em provas de longa distância. No entanto, essa melhoria não é universal e pode variar de acordo com fatores como o peso corporal e o tipo de aterrissagem do corredor (forefoot, midfoot ou rearfoot strike). Além disso, os consumidores frequentemente percebem calçados mais macios como mais confortáveis, independentemente de seu impacto biomecânico real[13]. Isso ressalta a importância de alinhar a percepção do usuário às evidências científicas, promovendo escolhas mais informadas.

Apesar dos avanços significativos, ainda existem lacunas importantes na literatura sobre tecnologias de amortecimento. Por exemplo, a interação entre diferentes propriedades dos materiais, como dureza, densidade e elasticidade, é pouco compreendida. Além disso, a falta de estudos longitudinais que acompanhem corredores por períodos mais longos limita nossa capacidade de avaliar o impacto real das tecnologias na prevenção de lesões. Pesquisadores como Malisoux et al[21], sugerem que a colaboração entre universidades e a indústria pode acelerar o desenvolvimento de produtos mais eficazes e baseados em evidências. Estudos futuros devem focar na padronização dos métodos de avaliação, incluindo protocolos de teste biomecânico que considerem variáveis individuais, como peso, técnica de corrida e histórico de lesões.

O que é o amortecimento? A importância do amortecimento nas lesões por impacto

O conceito de amortecimento em calçados de corrida refere-se à capacidade do calçado de reduzir e dissipar as forças geradas no momento do impacto do pé com o solo. Do ponto de vista biomecânico, o amortecimento atua como um modulador das forças de reação do solo, minimizando a transmissão de energia para o aparelho locomotor e, teoricamente, reduzindo o risco de lesões por sobrecarga[22].

O amortecimento é frequentemente associado à variável loading rate, definida como a taxa de crescimento da força vertical durante os primeiros 50 milissegundos do contato inicial do pé com o solo. Essa medida é amplamente reconhecida como um indicador-chave da eficiência do sistema de amortecimento, sendo utilizada para avaliar a capacidade do calçado de reduzir os picos de impacto. Estudos como os de Clarke et al.[11] sugerem que calçados com maior capacidade de amortecimento resultam em loading rates menores, o que pode proporcionar maior conforto ao corredor e reduzir a probabilidade de lesões relacionadas ao impacto repetitivo.

As forças de impacto durante a corrida podem ser descritas por dois picos distintos na curva da força de reação do solo: o pico passivo e o pico ativo. O pico passivo, observado nos primeiros 50 ms após o contato inicial, está diretamente relacionado às propriedades de amortecimento do calçado e às características biomecânicas do corredor. Já o pico ativo, que ocorre durante a fase de propulsão, reflete a interação dinâmica entre a força gerada pelo corredor e o retorno de energia do calçado[23].

A Figura 1 ilustra essa dinâmica, destacando os principais pontos da curva de força de reação do solo em corredores de retropé. No ponto (A), observa-se o pico passivo, correspondente ao impacto inicial do calcanhar com o solo. O ponto (B) identifica o pico ativo, relacionado à fase de propulsão, enquanto o ponto (C) representa a loading rate, que é calculada com base na inclinação da curva nos primeiros 50 ms. Essa representação gráfica evidencia a importância do amortecimento na redução da magnitude e da taxa de aplicação das forças de impacto, fatores intimamente ligados ao conforto e à prevenção de lesões.

Embora o amortecimento seja frequentemente promovido como um fator protetor, sua relação com a redução do risco de lesões é complexa e multifatorial. Estudos como os de Malisoux et al.[21] mostram que, em corredores recreativos, calçados com maior amortecimento nem sempre reduzem a incidência de lesões. Essa aparente contradição po–

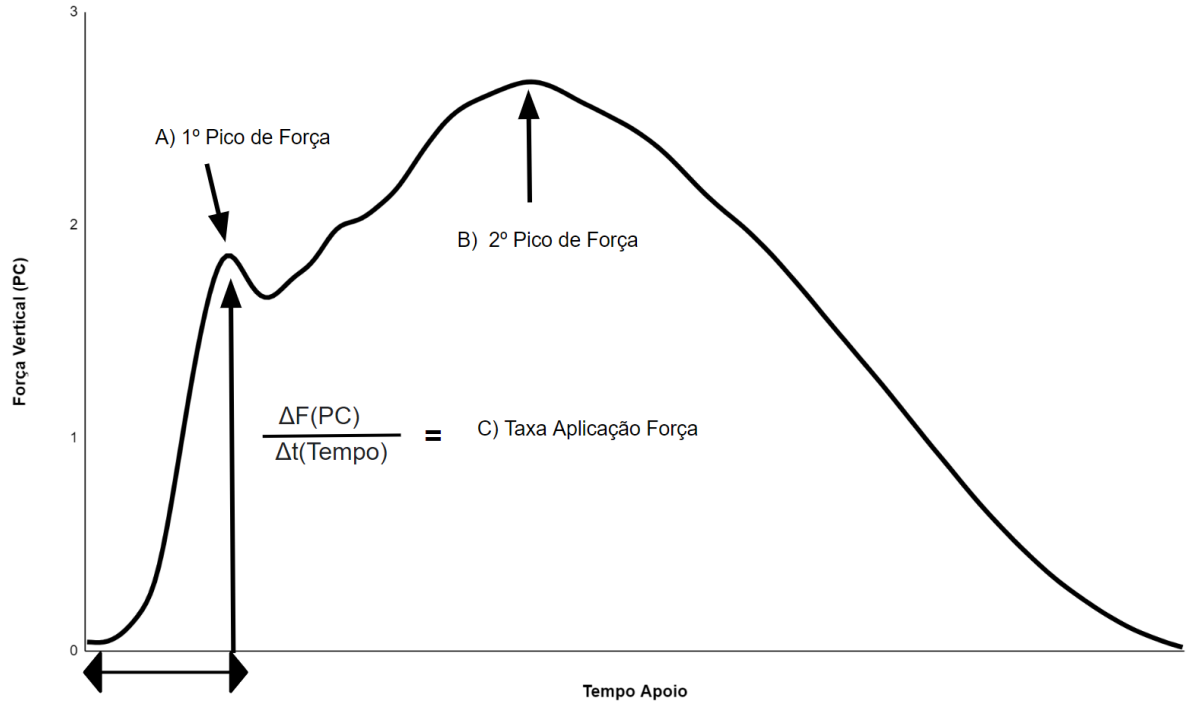


Figura 1 *– Força de reação do solo vertical ilustrativa de um corredor de retropé. No ponto (A) vemos o primeiro pico de força, sendo este, portanto, o pico passivo do primeiro contato do calcanhar com o solo. Em (B) há o segundo pico de força, respondendo pela fase ativa do movimento, sendo o pico maior responsável pela propulsão na corrida. E no ponto (C) vemos a taxa de aplicação de força calculada nos primeiros 50 ms da força de reação do solo, sendo representativa da taxa de crescimento do primeiro pico de força. PC(Peso Corporal) – F(Força) – t(Tempo).*

de ser explicada por fatores individuais, como técnica de corrida, peso corporal e adaptação neuromuscular, que modulam a maneira como as forças de impacto são distribuídas e absorvidas pelo corpo. Além disso, o tipo de amortecimento pode influenciar variáveis como o padrão de aterrissagem. Por exemplo, calçados excessivamente macios podem levar a uma maior deformação da entressola, alterando a postura do corredor e, potencialmente, aumentando a carga em outras estruturas, como os músculos da panturrilha e os tendões do tornozelo[10]. Embora o amortecimento desempenhe um papel essencial na modulação das forças de impacto, ele é apenas um dos elementos que influenciam a interação entre o calçado, o aparelho locomotor e o risco de lesões. A biomecânica da corrida é altamente dinâmica, envolvendo não apenas a capacidade do calçado de amortecer as forças aplicadas, mas também a forma como essas forças são redistribuídas pelo corpo.

Relação das forças aplicadas ao aparelho locomotor e lesões na corrida

No passado, Radin[24] demonstrou que a osteoartrite degenerativa era causada por exposição a altas forças de modo repetitivo, como o que vemos na corrida de longa distância. Porquinhos-da-índia e coelhos vivos foram expostos a cargas repetitivas de impacto nos membros inferiores, o que, por sua vez, gerou microfraturas trabeculares na tíbia, seguidas de degeneração da cartilagem da articulação do joelho[25]. Mais tarde, em estudos com seres humanos, foi demonstrado que corredores que possuem maiores taxas de impacto se lesionam mais[14]. Lafortune e Lake[26] mostraram que altas taxas de aplicação de força teriam uma forte relação com a ocorrência de lesões por fratura por estresse, inflamações nas fáscias ou ainda tendinites. Também Subotnick[27] evidenciou que altas taxas de impacto aumentaram as lesões em cartilagens articulares, devido a altas forças internas que estes sujeitos geravam, levando ao surgimento de osteoartrite crônica.

Em divergência a estes estudos, mais recentemente, a maioria dos trabalhos não tem confirmado essa tendência de aumento de lesões provocadas pelas altas taxas de impacto. Alguns outros resultados epidemiológicos mostram que os corredores não apresentam maior incidência de osteoartrite do que os não corredores[28]. Correr em superfícies duras não resultou em aumento de lesões de corrida[29]. E os indivíduos com uma alta taxa de carga na força de reação vertical do solo tiveram significativamente menos lesões relacionadas à

corrida do que os indivíduos com baixa taxa de carga[30]. Algumas explicações para a ocorrência desse fenômeno incluem as reações fisiológicas em resposta às forças aplicadas durante estímulos de carga, a resposta neuromotora do aparelho locomotor às diferentes cargas impostas ao corpo e a mecânica de tecidos relacionada ao mecanismo adaptativo dos tecidos viscoelásticos.

Efeito adaptativo osteogênico

Pesquisas têm demonstrado que a carga mecânica gerada pela corrida de fundo leva à ativação das células ósseas especializadas (osteoblastos), que estão envolvidas na formação de novo tecido ósseo[31]. Estímulos mecânicos regulares, como aqueles provenientes da corrida de longa distância, desencadeiam um processo de remodelação óssea, no qual o osso é continuamente remodelado para se tornar mais forte e resistente[31]. Estudos longitudinais têm indicado uma tendência de corredores apresentarem uma densidade mineral óssea elevada em comparação com indivíduos sedentários[32]. A corrida também demonstrou impactar positivamente outros aspectos da saúde óssea, como a geometria óssea e a microarquitetura[32].

Esses resultados sugerem que a carga de impacto tem, em geral, um efeito positivo no desenvolvimento e manutenção do osso. No entanto, devemos enfatizar que a corrida exerce repetidas cargas ao corpo que podem, em longo prazo, ser prejudiciais e, portanto, a adaptação ao treinamento deve ser um fator crucial para uma melhor adaptação a esse tipo de atividade. Com base nos resultados dessas pesquisas, não se pode concluir que as forças de impacto sejam um fator importante no desenvolvimento de lesões crônicas ou agudas relacionadas à corrida.

Tempo de resposta neuromotora

Durante a corrida, a cada passo realizado, ocorre um atraso na ativação muscular que está relacionado à necessidade de processamento e transmissão de informações sensoriais e motoras, permitindo que o sistema nervoso central (SNC) ajuste adequadamente a resposta motora à carga imposta[9]. Esse processo é que acaba explicando em parte o primeiro pico observado na curva de força de reação do solo. Durante o contato do calcanhar com o solo, as informações sensoriais são transmitidas ao SNC por meio dos nervos periféricos. Informações como força aplicada, posição e o movimento das articulações envolvidas são processadas pela medula espinhal até as áreas corticais superiores do cérebro[33]. Durante esse processamento, ocorre um atraso inerente à transmissão neural, que é o tempo necessário para a condução dos impulsos elétricos ao longo das sinapses entre os neurônios. Além disso, o SNC precisa avaliar e integrar as informações sensoriais recebidas para gerar um padrão de ativação muscular adequado, recrutando as unidades motoras apropriadas e ajustando a intensidade da contração[9].

Esse processo, conhecido como "feedback sensório-motor", envolve a interação entre os neurônios motores superiores e inferiores, bem como as vias aferentes que transmitem informações das terminações nervosas periféricas de volta ao SNC[9]. Destaca-se ainda, dentro desse mecanismo, a inibição recíproca, que regula a relação entre os músculos agonistas e antagonistas. Durante o primeiro contato do calcanhar com o solo, é necessária uma ação conjunta de músculos que desacelerem o movimento e controlem com contração sinérgica o amortecimento das forças impostas ao aparelho locomotor[34].

Resposta mecânica de tecidos viscoelásticos

Os músculos, tendões, ligamentos e outros tecidos conectivos que compõem o aparelho locomotor exibem um comportamento viscoelástico devido à sua estrutura e composição intrínsecas. Quando submetidos a uma carga, esses tecidos exibem uma resposta que combina características de elasticidade e viscosidade[35]. Em termos simples, eles podem armazenar energia elástica temporariamente e dissipar energia na forma de calor ao longo do tempo. Essa resposta viscoelástica é influenciada por fatores como a taxa de carregamento, a duração da carga e a temperatura dos tecidos[9].

Durante a corrida de fundo, as altas cargas são aplicadas repetidamente ao corpo, especialmente nas articulações dos membros inferiores. Quando o pé entra em contato com o solo, ocorre uma rápida transferência de carga através dos tecidos, resultando em deformações temporárias[11]. Esse impacto inicial causa uma rápida compressão dos tecidos, seguida por uma fase de recuperação elástica à medida que os tecidos recuperam sua forma original. No entanto, devido à natureza viscoelástica dos tecidos, parte da energia é dissipada na forma de calor, resultando em uma resposta de recuperação gradual ao longo do tempo[23]. Os músculos, em particular, desempenham um papel crucial no amortecimento das cargas durante a corrida de fundo. Sua característica

viscoelástica permite que eles absorvam parte da energia cinética gerada durante a passada, reduzindo o impacto direto sobre as articulações[22]. Durante a fase de carregamento, as fibras musculares são esticadas e deformadas, armazenando energia elástica. À medida que a carga diminui e os músculos se encurtam novamente, essa energia é liberada, auxiliando na propulsão e no impulso seguinte[36]. Esse processo é especialmente evidente nas ações de contração excêntrica, em que os músculos se alongam enquanto geram força.

A característica viscoelástica dos músculos também está relacionada à sua taxa de recrutamento e à adaptação neuromuscular durante a corrida de fundo[9]. À medida que a fadiga se acumula, a capacidade dos músculos de armazenar e liberar energia elástica pode ser reduzida, levando a mudanças no padrão de recrutamento muscular e na eficiência biomecânica[37]. Além disso, a resposta viscoelástica dos músculos influencia a absorção de choque durante as diferentes fases da passada, desempenhando um papel vital na proteção das articulações contra lesões[23]. Em resumo, a análise técnica do comportamento viscoelástico dos materiais biológicos durante a corrida de fundo revela uma interação entre cargas aplicadas e respostas mecânicas.

A característica viscoelástica dos tecidos, incluindo músculos e outros componentes do aparelho locomotor, permite absorção de energia, armazenamento elástico temporário e dissipação de calor. Essa resposta complexa desempenha um papel crucial na biomecânica da corrida de fundo, influenciando a eficiência da passada, a proteção das articulações e, dados esses achados, é possível inferir que parece existir uma janela de carga na qual os tecidos biológicos reagem positivamente às cargas de impacto aplicadas[9]. Com base no conhecimento atual, especula-se que a carga de impacto para ossos, cartilagens e estruturas de tecidos moles está dentro da janela aceitável para corrida moderada e intensa. Especula-se ainda que a carga de impacto para o osso pode às vezes cair fora da janela aceitável para corrida intensa com períodos de recuperação muito curtos. No entanto, o conhecimento baseado nessas especulações ainda é limitado.

Alterações do calçado de corrida e sua repercussão no aparelho locomotor

Como já discutido e demonstrado, para avaliar as cargas aplicadas ao corpo humano durante a corrida, analisa-se a Força de Reação do Solo (FRS), que é o fenômeno físico gerado no impacto e geralmente mensurado por plataformas de força. Dentre as variáveis extraídas da curva de FRS, a taxa de carregamento (loading rate) é considerada uma das principais métricas. No entanto, outras variáveis se destacam e estão presentes em quase todas as análises, como o primeiro pico de força, o segundo pico de força, o impulso, os picos de desaceleração e aceleração, e a frequência mediana. Essas variáveis são frequentemente avaliadas em conjunto com dados oriundos de outros equipamentos biomecânicos, como acelerômetros e palmilhas de distribuição de pressão plantar.

Ao longo do tempo, modificações no calçado foram realizadas para investigar os efeitos agudos de mudanças em design e material sobre as variáveis citadas, seja para aumentá-las ou diminuí-las. O Quadro 1 apresenta algumas dessas alterações, evidenciando resultados ora convergentes, ora divergentes do esperado. Especula-se que a alteração no crosspad do calçado pode afetar diretamente o primeiro pico de força. Entende-se também que, além da maciez, a resiliência ou elasticidade do material tende a exercer efeito dependente da combinação de design, espessura da entressola e ajuste do cabedal.

Ou seja, as repercussões das cargas aplicadas ao corpo humano durante a corrida, além de todo o mecanismo adaptativo do corpo já mencionado, possuem forte relação com as combinações de características físicas e de design do calçado. As divergências frequentemente encontradas nos resultados decorrem, em grande parte, da falta de controle no delineamento dos estudos, que costumam comparar produtos totalmente distintos para verificar a influência de uma única propriedade física. Para trabalhos futuros, sugere-se que as universidades busquem parcerias com empresas para garantir maior controle metodológico, isolando de maneira direta a característica física avaliada. Assim, esses resultados poderão proporcionar um direcionamento mais preciso para as equipes de desenvolvimento na tentativa de entender como o design e as escolhas de materiais impactam as cargas aplicadas durante a corrida. Adicionalmente, isso possibilitaria a criação de diretrizes informativas para os consumidores que adquirem o produto.

Conclusão

O calçado de corrida passa por uma mudança drástica quanto ao seu conceito de produto que possa oferecer uma maior proteção ao atleta durante

Quadro 1 *– Exemplo de alguns estudos com resultados divergentes frente às alterações e diferenças entre os calçados.*

Modificação	Estudo, Autor e Ano	Resultado
Dureza/Rigidez da Entressola	Bates e Hamill[19]	- A dureza da sola não influenciou na magnitude do primeiro pico e da *loading rate.*
	Theisen et al.[3]	- Materiais mais macios diminuem a *loading rate* e o risco de lesão.
	Addison e Lieberman[10]	- Materiais mais rígidos diminuem os valores de loading rate assim como o risco de lesão.
Crosspad/Flare	Nigg[9]	- Um *crosspad/flare* acentuado quando utilizando sola rígida tem maiores efeitos do que quando se utiliza uma sola macia.
	Kulmala et al.[16]	- Calçados com menor drop alteram o padrão de aterrissagem para médio pé, diminuindo o primeiro pico de força.
Drop/Salto e Espessura de entressola	Kulmala et al.[16]	- Calçados muito altos com drop alto tendem a ter um maior valor de *loading rate*.
	Dinato et al.[13]	- Calçados mais baixos minimalistas diminuem as forças de impacto.

a corrida. A propriedade física de dureza/maciez não pode ser confundida com amortecimento, que por sua vez depende de diversos fatores de interação e mecanismos adaptativos do corpo com relação ao tipo de calçado utilizado. As propriedades biomecânicas ainda hoje estudadas e colocadas como fatores de risco do desenvolvimento de lesão por impacto precisam ser avaliadas.

Assim como o conceito da utilização de um calçado que promova maior amortecimento é aquele que deve ser utilizado com maior tranquilidade. É preciso, em um futuro próximo, que as grandes marcas e universidades tentem buscar entender de uma maneira mais ampla e melhor controlada os efeitos de maneira isolada e ampla sobre o corpo humano na utilização de diferentes produtos, assim como entender como as características físicas dos novos calçados podem de fato se combinar e alterar de maneira benéfica as medidas biomecânicas que possam vir a ser importantes para o entendimento do mecanismo protetivo de lesões por impacto.

Aprovação ética

Por se tratar de uma revisão narrativa da literatura, baseada na análise de estudos previamente publicados, sem recrutamento de participantes ou coleta de dados primários envolvendo seres humanos, o estudo não foi submetido ao Comitê de Ética em Pesquisa, não sendo aplicáveis o número do CAAE e o número do parecer de aprovação.

Financiamento

Este estudo não recebeu financiamento de agências de fomento ou de outras instituições para sua realização.

Conflito de interesses

Os autores declaram não haver conflitos de interesses relacionados à realização deste estudo ou à publicação deste manuscrito.

Contribuições dos autores

Wagner Rosa de Oliveira contribuiu com a conceituação, metodologia, redação do manuscrito original e análise dos dados. Jeferson Fagundes Loss contribuiu com a investigação, disponibilização de recursos, revisão e edição do manuscrito e supervisão. Ambos os autores revisaram e aprovaram a versão final do manuscrito e assumem responsabilidade pelo conteúdo do trabalho.

Declaração de responsabilidade

As opiniões expressas neste manuscrito são de responsabilidade exclusiva dos autores e não representam necessariamente a posição oficial das instituições às quais estão vinculados ou das agências de fomento.

Disponibilidade de dados

Os dados que fundamentam este estudo estão disponíveis no próprio artigo e nas referências bibliográficas citadas.

Declaração sobre o uso de inteligência artificial

Durante a preparação das declarações editoriais deste manuscrito, foi utilizada a ferramenta ChatGPT (modelo GPT-6), da OpenAI, para auxiliar na elaboração e organização textual. A ferramenta não

foi utilizada para gerar o conteúdo científico da revisão, realizar análises de dados ou interpretar resultados científicos. Os autores são responsáveis pela revisão, verificação e aprovação do conteúdo final do manuscrito.

Referências

1. RunRepeat. The State of Running [Internet]. 2021 [cited 2023 Mar 8]. Available from: https://runrepeat.com/state-of-running
2. van Gent RN, Siem D, van Middelkoop M, Van Os AG, Bierma-Zeinstra SMA, Koes BW. Incidence and determinants of lower extremity running injuries in long distance runners: a systematic review. Br J Sports Med. 2007;41(8):469–80.
3. Theisen D, Malisoux L, Genin J, Delattre N, Seil R, Urhausen A. Influence of midsole hardness of standard cushioned shoes on running-related injury risk. Br J Sports Med. 2014;48(5):371–6.
4. Bermon S, Garrandes F, Szabo A, Berkovics I, Adami PE. Evolution of distance running shoes: performance, injuries, and rules. J Sports Med Phys Fitness. 2021;61(8):1073–80.
5. McPoil TG. Athletic footwear: design, performance and selection issues. J Sci Med Sport. 2000;3(3):260–7.
6. Goonetilleke RS. The science of footwear. Boca Raton: CRC Press; 2012.
7. Hardin EC, Hamill J. The influence of midsole cushioning on mechanical and hematological responses during a prolonged downhill run. Res Q Exerc Sport. 2002;73(2):125–33.
8. Knopp M, Muñiz-Pardos B, Wackerhage H, Schönfelder M, Guppy F, Pitsiladis Y, et al. Variability in Running Economy of Kenyan World-Class and European Amateur Male Runners with Advanced Footwear Running Technology. Sports Med. 2023;53(6):1255–71.
9. Nigg BM. The role of impact forces and foot pronation: a new paradigm. Clin J Sport Med. 2001;11(1):2–9.
10. Addison BJ, Lieberman DE. Tradeoffs between impact loading rate, vertical impulse and effective mass for walkers and heel strike runners wearing footwear of varying stiffness. J Biomech. 2015;48(7):1318–24.
11. Clarke TE, Frederick EC, Cooper LB. Effects of shoe cushioning upon ground reaction forces in running. Int J Sports Med. 1983;4(4):247–51.
12. Lafortune MA, Hennig EM. Cushioning properties of footwear during walking: accelerometer and force platform measurements. Clin Biomech. 1992;7(3):181–4.
13. Dinato RC, Cruz R, Azevedo RA, Hasegawa JS, Silva RG, Ribeiro AP, et al. Footwear designed to enhance energy return improves running economy compared to a minimalist footwear. Braz J Med Biol Res. 2021;54(5):e10693.
14. Ferber R, Davis IM, Hamill J, Pollard CD, McKeown KA. Kinetic variables in subjects with previous lower extremity stress fractures. Med Sci Sports Exerc. 2002;34(5):S5.
15. Fields KB, Sykes JC, Walker KM, Jackson JC. Prevention of running injuries. Curr Sports Med Rep. 2010;9(3):176–82.
16. Kulmala JP, Kosonen J, Nurminen J, Avela J. Running shoes with softer midsoles do not reduce impact forces. J Sci Med Sport. 2018;21(10):1056-1061.
17. Malisoux L, Gette P, Delattre N, Urhausen A, Theisen D. Spatiotemporal and Ground-Reaction Force Characteristics as Risk Factors for Running-Related Injury. Am J Sports Med. 2022;50(4):1181-1188.
18. Hamill J, Bates BT. Biomechanics and footwear research 1970–2000. Footwear Sci. 2023;15(1):1–9.
19. Bates BT, Hamill J. Investigations of ground reaction forces in running. Med Sci Sports Exerc. 1989;21(4):42-47.
20. Hoogkamer W, Kipp S, Frank JH, Farina EM, Luo G, Kram R. A Comparison of the Energetic Cost of Running in Marathon Racing Shoes. Sports Med. 2018;48(4):1009–19.
21. Malisoux L, Delattre N, Meyer C, Gette P, Urhausen A, Theisen D. Effect of shoe cushioning on landing impact forces and spatiotemporal parameters during running. Eur J Sport Sci. 2021;21(7):985–93.
22. Nigg BM, Liu W. The effect of muscle stiffness and damping on simulated impact force peaks during running. J Biomech. 1999;32(8):849–56.
23. Shorten MR. The energetics of running and running shoes. J Biomech. 1993;26 Suppl 1:41–51.
24. Radin EL, Paul IL. Response of joints to impact loading. I. In vitro wear. Arthritis Rheum. 1971;14(3):356–62.
25. Radin EL, Parker HG, Pugh JW, Steinberg RS, Paul IL, Rose RM. Response of joints to impact loading—III: Relationship between trabecular microfractures and cartilage degeneration. J Biomech. 1973;6(1):51–7.
26. Lafortune MA, Lake MJ. Human pendulum approach to simulate and quantify locomotor impact loading. J Biomech. 1995;28(9):1111–4.
27. Subotnick SI. A biomechanical approach to running injuries. Ann N Y Acad Sci. 1977;301:888–99.
28. Miller RH. Joint loading in runners does not initiate knee osteoarthritis. Exerc Sport Sci Rev. 2017;45(2):87–95.
29. Lorimer AV, Hume PA. Stiffness as a risk factor for Achilles tendon injury in running athletes. Sports Med. 2016;46:1921–38.
30. Willwacher S. Running Shoes: Injury Protection and Performance Enhancement. In: Müller B, Wolf SI, Brueggemann GP, Deng Z, McIntosh A, Miller F, et al., editors. Handbook of Human Motion. Cham: Springer International Publishing; 2018. p. 1613–28.
31. Warden SJ, Davis IS, Fredericson M. Management and prevention of bone stress injuries in long-distance runners. J Orthop Sports Phys Ther. 2014;44(10):749–65.
32. Wilks DC, Winwood K, Gilliver SF, Kwiet A, Chatfield M, Michaelis I, et al. Bone mass and geometry of the tibia and the radius of master sprinters, middle and long distance runners. Bone. 2009;45(1):91–7.
33. Proske U, Gandevia SC. The proprioceptive senses: their roles in signaling body shape, body position and

movement, and muscle force. Physiol Rev. 2012;92(4):1651-1697.

34. Kakehata G, Goto Y, Iso S, Kanosue K. The timing of thigh muscle activity is a factor limiting performance in the deceleration phase of the 100-m dash. Med Sci Sports Exerc. 2022;54(6):1002–12.

35. Alexander RM. Elastic energy stores in running vertebrates. Am Zool. 1984;24(1):85–94.

36. Martin PE, Cavanagh PR. Segment interactions within the swing leg during unloaded and loaded running. J Biomech. 1990;23(6):529–36.

37. Giandolini M, Vernillo G, Samozino P, Horvais N, Edwards WB, Morin JB, et al. Fatigue associated with prolonged graded running. Eur J Appl Physiol. 2016;116(10):1859–73.

Recebido: 10/12/2025
Versão final reapresentada: 08/01/2026
Aprovado: 27/06/2026

Editor Chefe
Jonato Prestes
Universidade Católica de Brasília

Editor de Seção
Douglas Silva Alves
Universidade de São Paulo