

PALMILHA INTELIGENTE PARA DETECÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO DE PESO E PREVENÇÃO DE LESÕES EM ATIVIDADES DE CORRIDA

Lucas Santos Carlos¹, Matheus Leandro Ferreira²

Resumo: A corrida é uma das atividades físicas mais praticadas no mundo, reconhecida por seus benefícios à saúde e ao desempenho. Contudo, o aumento de praticantes tem sido acompanhado por maior incidência de lesões musculoesqueléticas, muitas relacionadas à técnica inadequada e aos padrões de pisada. Neste contexto, tecnologias vestíveis e sistemas de monitoramento biomecânico destacam-se como ferramentas acessíveis de prevenção. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma palmilha eletrônica com seis sensores FSR-402 conectados a um ESP32 WROOM DevKit V1, projetada para monitorar a pressão plantar e identificar padrões de pisada durante a corrida. Os dados são transmitidos via Bluetooth Low Energy (BLE) para um aplicativo móvel, que exibe as variações de pressão e classifica a pisada como pronada, neutra ou supinada. Os testes realizados com simulações de passadas validaram a comunicação BLE, a coerência dos dados e o funcionamento do aplicativo. A visualização em tempo real do mapa plantar e a correta identificação dos tipos de pisada comprovaram a viabilidade técnica do sistema e seu potencial para aplicação futura com sensores reais, consolidando-o como uma solução acessível e funcional para monitoramento biomecânico.

Palavras-chave: pressão plantar, biomecânica, internet das coisas, tecnologias vestíveis.

¹Curso de Ciência da Computação, Universidade do Extremo Sul Catarinense (Unesc), lucassantosott@gmail.com

²Orientador. Curso de Ciência da Computação, Universidade do Extremo Sul Catarinense (Unesc), mlf@unesc.net

ABSTRACT: Running is one of the most practiced physical activities worldwide, recognized for its health and performance benefits. However, the growing number of practitioners has been accompanied by a higher incidence of musculoskeletal injuries, many of which are related to improper technique and foot strike patterns. In this context, wearable technologies and biomechanical monitoring systems stand out as accessible tools for injury prevention. This work presents the development of an electronic insole equipped with six FSR-402 sensors connected to an ESP32 WROOM Dev-Kit V1, designed to monitor plantar pressure and identify foot strike patterns during running. Data are transmitted via Bluetooth Low Energy (BLE) to a mobile application that displays pressure variations and classifies the foot strike as pronated, neutral, or supinated. Tests performed using simulated strides validated BLE communication, data consistency, and application functionality. The real-time visualization of the plantar map and the accurate identification of foot strike types confirmed the technical feasibility of the system and its potential for future application with real sensors, consolidating it as an accessible and functional solution for biomechanical monitoring.

Keywords: plantar pressure, biomechanics, internet of things, wearable technologies.

1 INTRODUÇÃO

A corrida tornou-se parte do cotidiano de milhões de pessoas em todo mundo, seja pela busca de saúde, pela redução do estresse ou pelo alcance de metas pessoais. Essa prática tem se consolidado como uma das mais populares e acessíveis modalidades esportivas da atualidade (Santos; Nascimento, 2022). Além de favorecer o condicionamento cardiovascular, a corrida auxilia na prevenção de doenças como hipertensão e diabetes tipo II, promovendo autoestima, bem-estar emocional e integração social entre os praticantes (Lucca, 2014; Mileo; Souza; Junior, 2020).

Apesar dos amplos benefícios, a corrida está associada a uma alta incidência de lesões musculoesqueléticas, principalmente entre corredores amadores. Pesquisas indicam que entre 40% e 80% desses praticantes relatam ao menos uma lesão ao longo do ano, destacando-se problemas no joelho, tornozelo, pé e quadril (Araujo et al., 2015; Santos; Nascimento, 2022). Tais lesões costumam estar relacionadas ao excesso de carga, à técnica inadequada e padrões de pisada disfuncionais, como a hiperpronação e queda pélvica durante a passada (Turra; Cezne; Vidal, 2022; Fernandes; Pedrinelli; Hernandez, 2011).

Tradicionalmente, a análise da pisada é realizada em laboratórios especializados, utilizando equipamentos de alto custo, o que limita seu acesso à maioria dos atletas e treinadores. No entanto, existe uma demanda crescente por soluções portáteis e acessíveis que permitam o monitoramento contínuo da distribuição de peso durante os treinos. Essa necessidade se intensifica quando se consideram variações dinâmicas (como ritmo, terrenos e postura) que influenciam significativamente o padrão de corrida (MacMahon; Chaudhari; Andriacchi, 2000). Dessa forma, desenvolver sistemas capazes de monitorar de forma prática e precisa a pisada do atleta representa uma oportunidade valiosa para prevenção de lesões.

Nesse cenário, as palmilhas inteligentes com sensores de pressão plantar surgem como uma alternativa promissora. Elas permitem captar informações em tempo real sobre a distribuição do peso em diferentes áreas do pé, oferecendo uma análise detalhada da biomecânica da corrida. Contudo, o desafio vai além de hardware: envolve também a coleta, o processamento e a interpretação dos dados de forma eficiente (Chen, 2024). A correta leitura e análise dessas informações é essencial para identificar padrões de pisada que possam indicar riscos de lesão, o que torna essa criação de um sistema completo, unindo hardware e software, uma etapa crucial no processo.

Além disso, a validação de protótipos em ambientes reais é indispensável para garantir a precisão e a confiabilidade das medições. É necessário reproduzir condições similares às de corrida, levando em conta variações no ritmo e mudanças de direção. Somente a partir desses testes é possível verificar se as palmilhas inteligentes conseguem captar de forma consistente as nuances da distribuição de peso e se os padrões obtidos têm relevância prática para prevenção de lesões (Scott et al., 2022).

Com base nesses fundamentos, o presente trabalho propõe o desenvolvimento de um sistema de monitoramento de pisada baseado em palmilhas sensoriais, projetado para identificar padrões inadequados de distribuição de peso auxiliar na prevenção de lesões esportivas. A pesquisa combina tecnologias embarcadas e computacionais, integrando sensores de pressão plantar, microcontrolador e um módulo de software para coleta e análise dos dados.

2 TRABALHOS CORRELATOS

Para compreender o estado atual da tecnologia aplicada à análise de pisada e à prevenção de lesões em corredores, foram examinados

estudos que exploram soluções baseadas em sensores plantares, Internet das Coisas (IoT) e aprendizado de máquina. Os trabalhos analisados demonstram abordagens distintas para monitoramento da pressão plantar, processamento de dados e predição de padrões biomecânicos, oferecendo base teórica e comparativa para o desenvolvimento da presente pesquisa.

A seguir, são apresentados três estudos relevantes que abordam diretamente o uso de palmilhas inteligentes e tecnologias embarcadas voltadas à saúde e ao desempenho esportivo.

O estudo de (Subramaniam et al., 2022) apresenta uma revisão sistemática sobre sistemas baseados em palmilhas sensorizadas aplicados à área da saúde. O artigo destaca as principais arquiteturas embarcadas, tipos de sensores empregados, autonomia energética e recursos de conectividade, com foco nas potencialidades e limitações dessas soluções.

Segundo os autores, as palmilhas inteligentes utilizam tecnologias como sensores piezoresistivos, capacitivos e piezoelétricos para medir pressão plantar, permitindo a análise do equilíbrio e da distribuição de peso durante atividades físicas. O trabalho ressalta que a coleta contínua de dados pode auxiliar na detecção precoce de disfunções musculoesqueléticas, além de contribuir para o desenvolvimento de dispositivos vestíveis mais precisos e ergonômicos.

Uma das lacunas observadas pelos autores é a ausência de validações em ambientes dinâmicos, como corridas e mudanças bruscas de direção (contexto em que o presente projeto se insere). Assim, o sistema proposto por este trabalho busca suprir essa limitação, ao validar o protótipo em situação de movimento real, ainda que em ambiente controlado.

De modo geral, a revisão conduzida por (Subramaniam et al., 2022) demonstra que as palmilhas sensorizadas são promissoras para aplicações médicas e esportivas, mas carecem de integração entre hardware, software e algoritmos de análise biomecânica em tempo real (integração essa que o sistema desenvolvido neste trabalho busca atingir).

No estudo desenvolvido por (Hooren; Rengs; Meijer, 2024), os autores propõem o uso de palmilhas instrumentadas em conjunto com algoritmos de aprendizado de máquina para prever cargas musculoesqueléticas em regiões do corpo frequentemente afetados por lesões em corredores, com joelhos e tornozelos.

Embora o foco do trabalho de (Hooren; Rengs; Meijer, 2024) esteja na predição de cargas internas, e não diretamente na identificação de padrões de pisada, há grande similaridade metodológica com o presente

projeto, pois ambos exploram a coleta contínua de dados plantares como base para a análise de comportamento biomecânico.

Enquanto o estudo dos autores visa calcular esforços internos complexos, o sistema desenvolvido nesta pesquisa busca detectar distribuições anômalas de pressão que possam indicar padrões inadequados de pisada, atuando assim de forma preventiva para evitar lesões.

O trabalho de (Chan et al., 2025) introduz uma abordagem inovadora baseada em redes neurais generativas condicionais (cGANs) para reconstruir mapas de pressão plantar com alta fidelidade, mesmo utilizando um número reduzido de sensores físicos. Essa técnica permite compensar limitações de hardware por meio de inferência computacional, reduzindo custos e complexidade de montagem dos dispositivos.

De acordo com os autores, a aplicação de modelos generativos possibilita reconstruir dados de pressão em áreas não monitoradas diretamente pelos sensores, mantendo precisão dos resultados. Essa metodologia abre espaço para o desenvolvimento de palmilhas inteligentes mais leves, acessíveis e energeticamente eficientes.

O presente trabalho compartilha desse princípio de otimização de dados, ainda que sem o direto de aprendizado profundo. Ao utilizar seis sensores distribuídos nas regiões estratégicas da planta do pé, o sistema busca capturar informações essenciais de pisada sem comprometer a representatividade do mapa de pressão. Assim, o modelo de (Chan et al., 2025) serve como inspiração para o equilíbrio entre custo, precisão e aplicabilidade prática.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

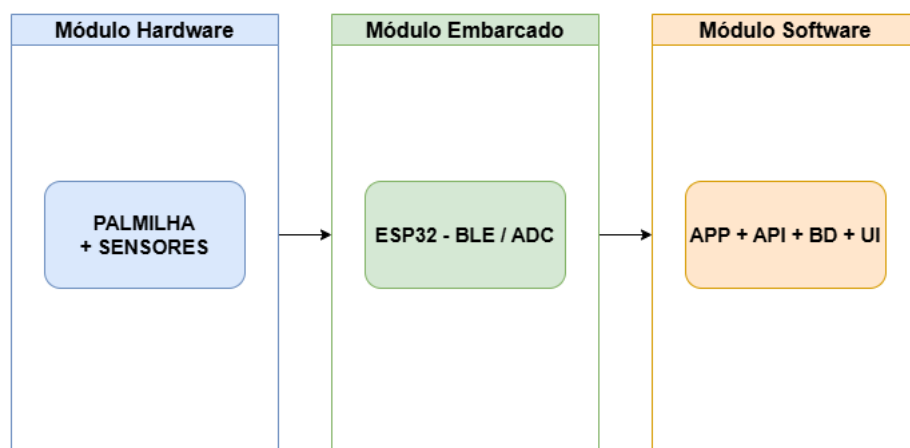
O desenvolvimento deste projeto teve como objetivo criar um protótipo funcional de uma palmilha inteligente sensorizada, capaz de capturar, registrar e analisar a distribuição de pressão plantar durante atividades físicas, com ênfase em corridas. O sistema integra conceitos de Internet das Coisas (IoT), sistemas embarcados e análise de dados biomecânicos, unindo hardware e software em uma arquitetura modular.

A implementação foi dividida em três principais componentes:

- Módulo de hardware (palmilhas e sensores);
- Módulo embarcado (coleta e transmissão de dados);
- Módulo de software (armazenamento e visualização de amostras).

Essa estrutura garante a independência entre camadas e facilita futuras expansões, como a integração com algoritmos de aprendizado de máquina ou utilização de sensores adicionais. A Figura 1 ilustra a interação entre esses módulos.

Figura 1 - Arquitetura Geral do Sistema.



Fonte: Do autor.

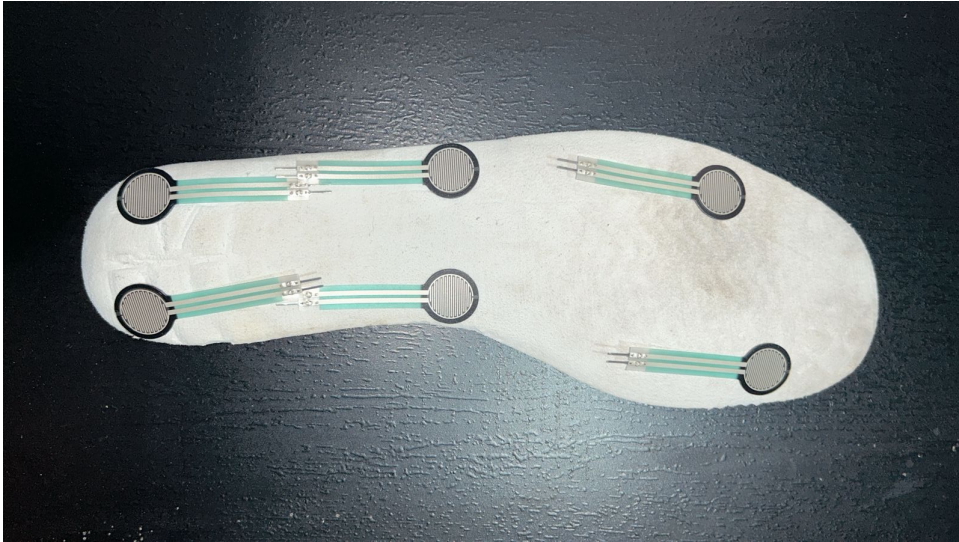
3.1 MÓDULO DE HARDWARE

O módulo de hardware é responsável pela captura dos sinais de pressão plantar por meio de sensores distribuídos em pontos estratégicos da palmilha. O protótipo utiliza seis sensores resistivos FSR-402, posicionados nas regiões biomecanicamente relevantes do pé (calcanhar, mediopé e antepé) com três sensores em cada lado (medial e lateral).

Esses sensores variam sua resistência conforme a força aplicada, permitindo converter a pressão em valores analógicos entre 0 e 4095, de acordo com a resolução de 12 bits do conversor analógico-digital do microcontrolador. Para o condicionamento do sinal, foram empregados resistores de 10 k Ω como divisores de tensão e capacitores de 100 nF como filtros para reduzir ruído e interferências.

Foi utilizada apenas uma palmilha de tênis comum como base do protótipo. Os sensores foram colados na parte inferior da palmilha e conectados por jumpers a uma protoboard, que concentra o circuito e as ligações com o microcontrolador ESP32. A Figura 2 apresenta a palmilha sensorizada utilizada nos testes, mostrando a disposição dos seis sensores FSR-402 nas regiões do calcanhar, mediopé e antepé.

Figura 2 - Distribuição dos Sensores na Palmilha



Fonte: Do autor.

3.2 MÓDULO EMBARCADO

O módulo embarcado realiza a leitura sequencial dos seis sensores, processa os sinais analógicos e os transmite via Bluetooth Low Energy (BLE) ao aplicativo móvel. O microcontrolador ESP32 foi escolhido por integrar conversores *ADC* de 12 bits, conectividade *Bluetooth* e *Wi-Fi*, além de ampla compatibilidade com bibliotecas de desenvolvimento para *Internet das Coisas (IoT)*.

Durante a execução, o firmware realiza leituras analógicas dos sensores, aplica uma suavização leve para reduzir ruídos e normaliza os resultados em uma escala percentual de 0 a 100. As leituras são organizadas em um formato JSON compacto e transmitidas via Bluetooth Low Energy (BLE) no perfil GATT, utilizando o método Notify, a uma taxa média de aproximadamente 6,5 quadros por segundo ($\approx 6,5$ Hz por sensor, considerando uma varredura completa a cada 150 ms).

O código foi desenvolvido em *C/C++*, utilizando a *IDE Arduino* e bibliotecas específicas do ESP32 para *ADC* e *BLE*. Essa arquitetura garante baixa latência na comunicação e resposta em tempo real para a visualização das pressões plantares.

3.3 MÓDULO DE SOFTWARE

O módulo de software foi desenvolvido para registrar, armazenar e analisar as informações coletadas pelas palmilhas inteligentes. A aplicação foi construída em uma arquitetura cliente-servidor, usando PostgreSQL como sistema gerenciador de banco de dados (SGBD).

Os dados são recebidos pela API REST, que executa o registro das amostras e o controle das sessões de coleta. O backend foi desenvolvido em Java com Spring Boot, enquanto a interface de visualização foi construída em React Native, permitindo a exibição gráfica da distribuição de pressão plantar em tempo real.

A aplicação também permite associar cada conjunto de leituras a uma sessão de monitoramento, armazenando informações complementares, como horários, duração e observações. Isso possibilita a análise histórica e comparativa entre diferentes sessões do mesmo usuário.

O banco de dados foi projetado para garantir integridade referencial e escalabilidade. A modelagem adota a normalização até a terceira forma normal (3FN), evitando redundância e assegurando consistência nas relações entre as tabelas.

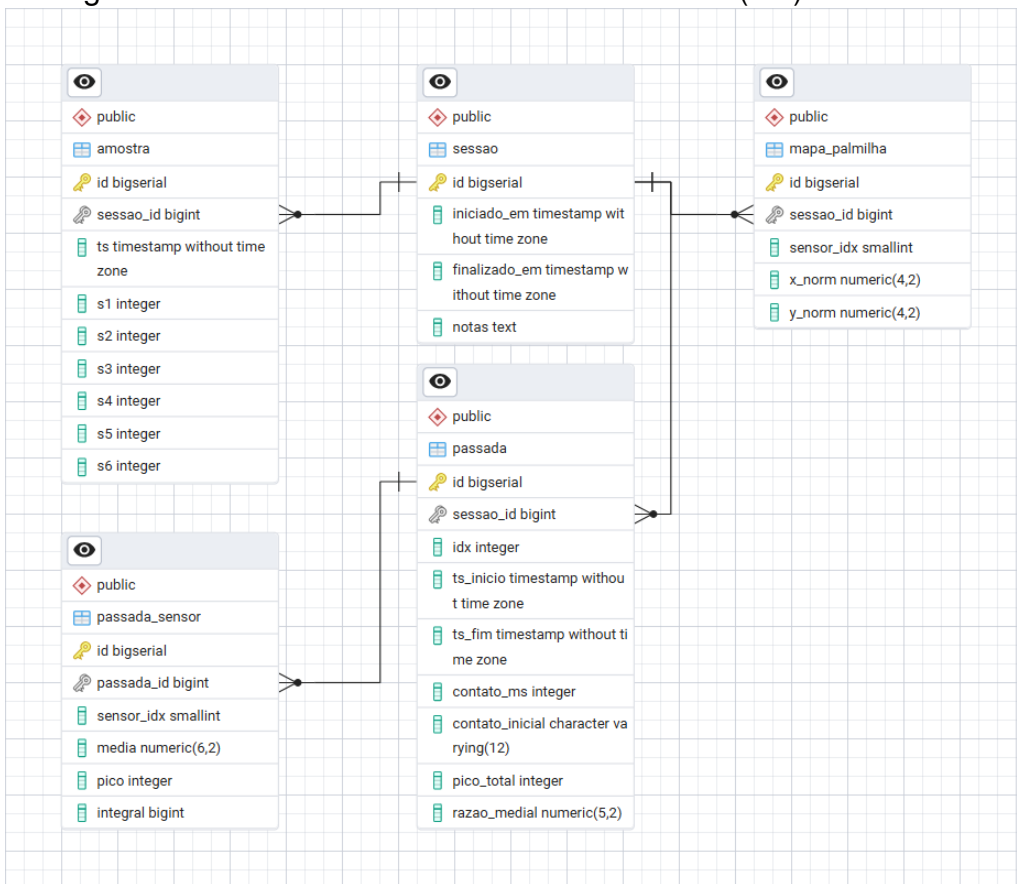
3.4 MODELAGEM DE DADOS

A modelagem foi elaborada para contemplar o ciclo completo de aquisição e análise das informações. O esquema relacional foi implementado no PostgreSQL conforme o modelo abaixo:

- `sessao`: armazena dados de cada sessão de coleta (início, término e observações);
- `amostra`: registra as leituras brutas dos sensores em cada instante de tempo;
- `mapa_palmilha`: associa cada sensor às coordenadas normalizadas (x, y), permitindo a reconstrução espacial do mapa plantar;
- `passada`: consolida informações extraídas das amostras, como duração e intensidade da pressão;
- `passada_sensor`: contém estatísticas individuais por sensor, incluindo média, pico e integral da pressão aplicada.

O modelo de Entidade-Relacionamento (ER) desenvolvido para o sistema é apresentado na Figura 3. Ele representa as principais entidades envolvidas no processo de registro e análise das leituras, bem como seus relacionamentos e dependências. A estrutura foi projetada para garantir integridade referencial e facilitar consultas estatísticas sobre as sessões, passadas e sensores, além de permitir a reconstrução do mapa plantar a partir das coordenadas armazenadas.

Figura 3 - Modelo de Entidade-Relacionamento (ER) do sistema.



Fonte: Do autor.

Esse modelo foi estendido com as entidades mapa_palmilha, passada e passada_sensor, assegurando a integridade dos relacionamentos e a rastreabilidade entre os dados coletados e as análises processadas. Além disso, foram implementadas restrições de integridade, índices de desempenho e chaves estrangeiras com cascade delete, garantindo eficiência e manutenção automatizada dos registros.

3.5 ARQUITETURA DO SISTEMA

A arquitetura geral do sistema foi concebida para integrar de forma sincronizada os módulos físico (palmilha e circuito embarcado) e lógico (aplicativos e banco de dados). Essa estrutura garante a coleta contínua dos sinais de pressão plantar, seu armazenamento e posterior visualização em tempo real.

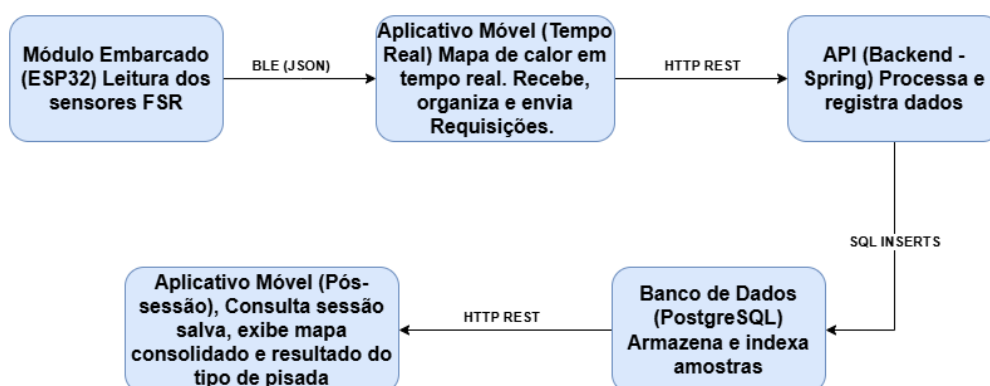
O fluxo operacional ocorre da seguinte maneira:

1. O módulo embarcado (ESP32) realiza a leitura sequencial dos seis sensores de pressão e transmite os dados via Bluetooth Low Energy (BLE) ao aplicativo móvel;

2. O aplicativo móvel interpreta os pacotes recebidos, organiza-os em formato JSON e os envia ao servidor backend por meio de requisições HTTP REST;
3. A API processa as leituras e as insere na tabela amostra, vinculando-as à sessão ativa registrada no banco de dados;
4. O banco de dados PostgreSQL armazena e indexa as amostras, permitindo consultas em tempo real e cálculos de métricas agregadas;
5. A aplicação web consome os dados consolidados e exibe a distribuição de pressão plantar de forma dinâmica, permitindo a análise visual do padrão de pisada.

Esse fluxo é representado na Figura 4, que mostra a comunicação entre os módulos e a sequência de processamento dos dados.

Figura 4 - Fluxograma de Funcionamento do Sistema.



Fonte: Do autor.

3.6 INTERFACE DO APLICATIVO MÓVEL

O aplicativo móvel foi desenvolvido como o principal ponto de interação entre o usuário e o sistema de monitoramento, permitindo criar e gerenciar sessões, acompanhar em tempo real as leituras dos sensores e analisar o tipo de pisada e o mapa de pressão plantar.

A interface foi projetada para ser simples, responsiva e intuitiva, favorecendo tanto o uso durante coletas ativas quanto a visualização de sessões armazenadas.

O sistema é composto por uma tela de listagem de sessões e uma tela principal, que contém três abas (tab panels) correspondentes às etapas de monitoramento e análise dos dados.

3.6.1 Tela de Listagem de Sessões

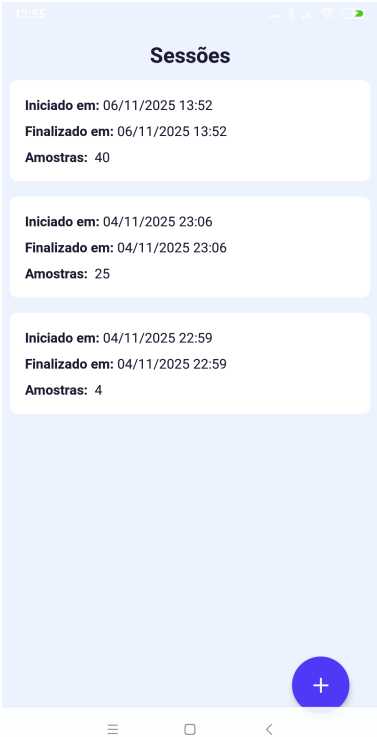
A tela inicial do aplicativo exibe a listagem das sessões registradas, com informações de data, hora e quantidade de amostras coletadas.

Nela, o usuário pode selecionar uma sessão existente para reproduzir os dados armazenados ou criar uma nova sessão por meio do botão de adicionar.

Essa interface centraliza o gerenciamento de coletas e facilita o acompanhamento do histórico de medições.

A Figura 5 apresenta a tela de listagem das sessões, destacando a listagem e o botão que permite adicionar uma nova sessão de monitoramento.

Figura 5 - Tela de listagem das sessões do aplicativo.



Fonte: Do autor.

3.6.2 Tela Controle de Sessão

Ao iniciar ou selecionar uma sessão, o usuário é direcionado à tela principal, composta por três abas (Sessão, Pisada e Mapa de Pressão) que organizam o fluxo de coleta e visualização das informações.

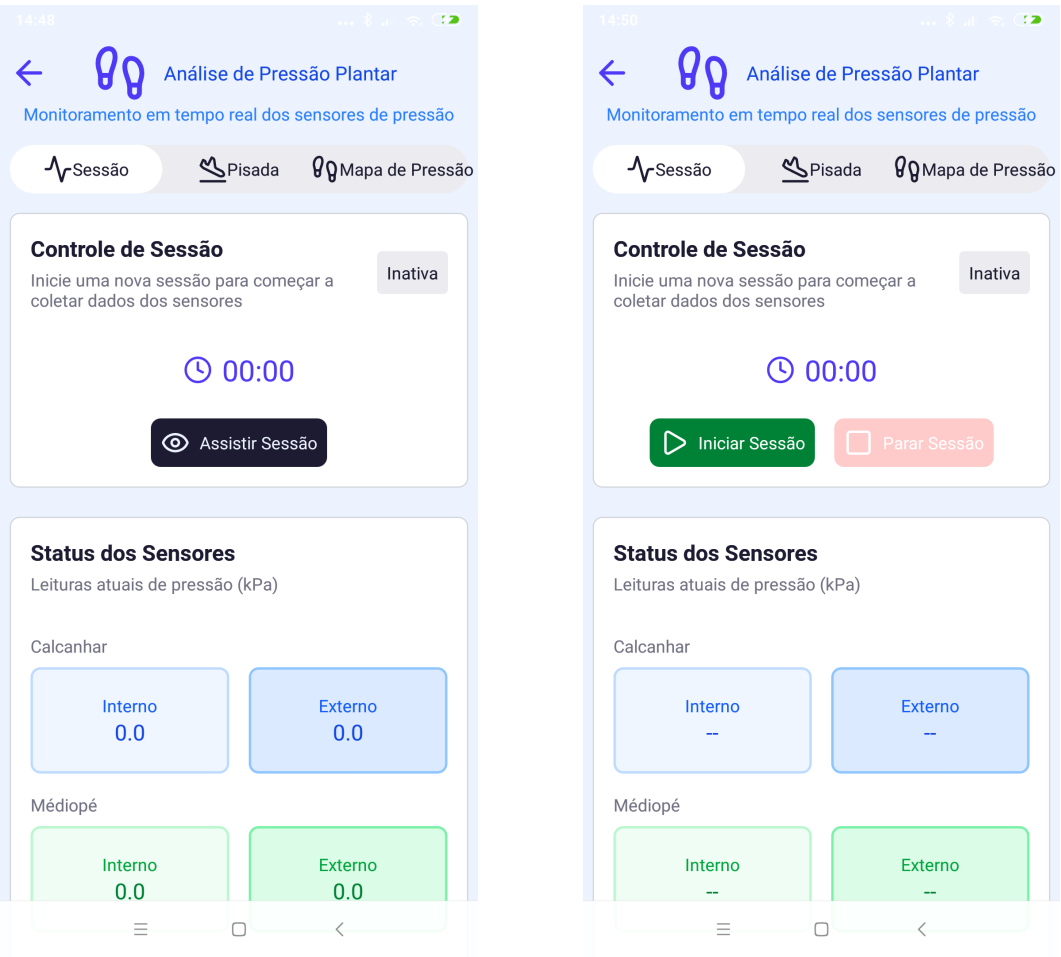
Aba “Sessão”: permite iniciar e pausar a coleta, exibindo em tempo real os valores numéricos correspondentes às leituras dos seis sensores.

Durante a execução, os valores são atualizados continuamente conforme o aplicativo recebe amostras via Bluetooth Low Energy (BLE).

Quando o usuário abre uma sessão anterior, essa aba reproduz as leituras registradas, permitindo comparar coletas e avaliar o comportamento da pressão plantar.

A Figura 6 mostra as telas relacionadas à aba de sessão: em (A), a visualização de uma sessão concluída, na qual os dados gravados são reproduzidos; e em (B), o modo para iniciar uma nova sessão.

Figura 6 - Tela de controle da sessão

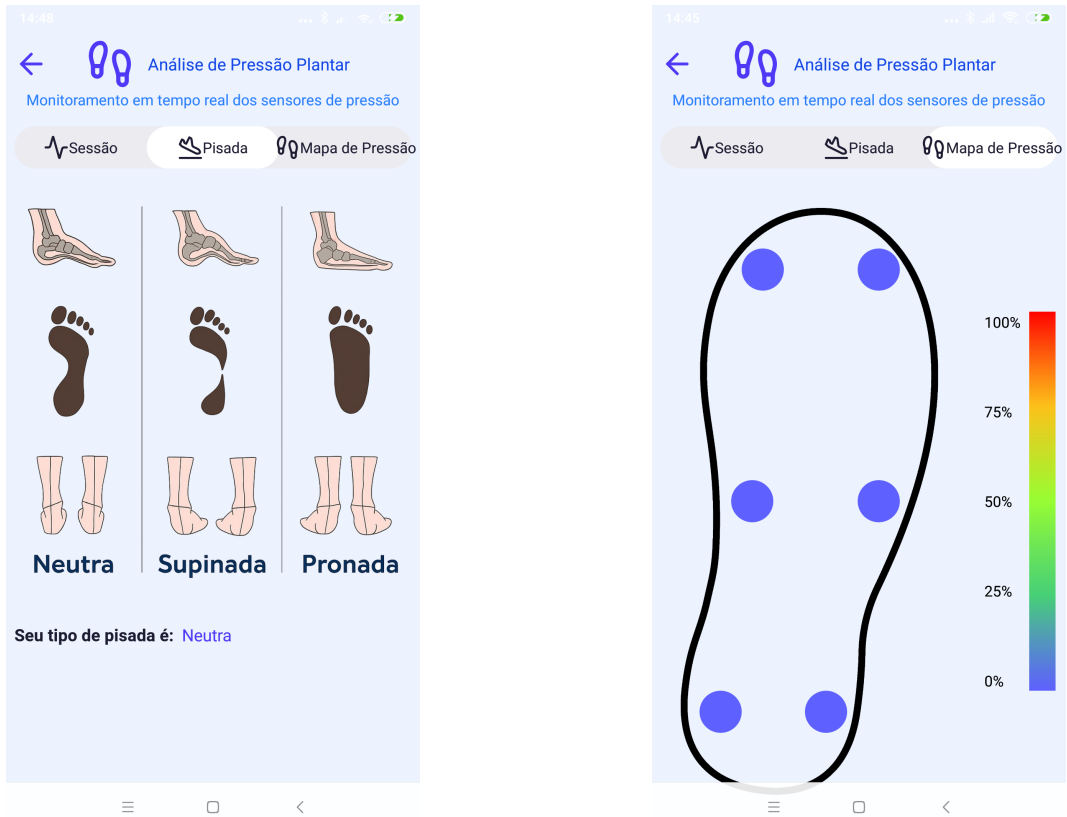


(a) Visualização de sessão anterior.
Fonte: Do autor.

(b) Nova sessão.

As duas abas seguintes apresentam as informações analíticas da coleta, permitindo compreender o comportamento da pisada e a distribuição espacial das pressões registradas. A Figura 7 mostra as telas correspondentes às abas Pisada e Mapa de Pressão, utilizadas para a análise dos resultados da sessão.

Figura 7 - Telas de análise



(a) Tipo de pisada.

(b) Mapa de pressão.

Fonte: Do autor.

Aba “Pisada”: apresenta uma imagem ilustrativa dos três tipos de pisada (neutra, supinada e pronada) e, abaixo, um rótulo indicando o tipo predominante identificado durante a sessão. O resultado é calculado automaticamente a partir da média das pressões entre os sensores internos e externos.

Aba “Mapa de Pressão”: exibe o mapa plantar em tempo real, gerado com base nas coordenadas dos sensores e na intensidade de pressão capturada. As cores variam em uma escala de gradiente, representando as regiões de maior e menor carga, e são atualizadas continuamente durante a coleta. Essa visualização também está disponível no modo de reprodução, mostrando a distribuição de pressão registrada em sessões anteriores.

3.6.3 Aspectos Técnicos da Interface

O aplicativo foi desenvolvido em React Native, integrando comunicação Bluetooth Low Energy (BLE) para recepção dos dados provenientes do ESP32 e requisições HTTP REST para envio consolidado das

amostras ao backend.

As informações exibidas em cada aba são processadas localmente e transmitidas apenas ao final da sessão, garantindo eficiência na comunicação e integridade no armazenamento. O design segue princípios de usabilidade e clareza visual, priorizando a leitura rápida das informações e a interpretação intuitiva dos resultados biomecânicos.

3.7 CONSIDERAÇÕES DO DESENVOLVIMENTO

Durante o processo de implementação, priorizou-se o uso de componentes de baixo custo e tecnologias amplamente disponíveis, garantindo a reprodutibilidade acadêmica do projeto. A modularidade da arquitetura permite que futuros aprimoramentos (como a inclusão de sensores inerciais (IMU) ou o uso de aprendizado de máquina para classificação de pisadas) sejam integrados sem reestruturação completa do sistema.

A metodologia aplicada neste trabalho reflete o caráter exploratório e experimental da pesquisa, tendo como meta a validação do conceito e o levantamento de requisitos técnicos para futuras versões do protótipo. Dessa forma, o sistema construído serve como base para estudos posteriores sobre padrões biomecânicos de pisada e prevenção de lesões em corredores amadores e profissionais.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos com o sistema desenvolvido, abrangendo o comportamento do módulo embarcado, a comunicação Bluetooth Low Energy (BLE) e a interface do aplicativo móvel.

Os testes realizados tiveram como objetivo validar o fluxo de leitura e envio de dados, utilizando um script de simulação de passadas executado diretamente no aplicativo, reproduzindo as variações de pressão plantar em tempo real.

O foco desta etapa foi comprovar a coerência dos dados processados, a estabilidade da transmissão e o funcionamento das telas de monitoramento e análise implementadas.

4.1 COLETA E TRANSMISSÃO DAS AMOSTRAS

O firmware embarcado foi configurado com intervalo de amostragem de 150 ms por varredura, o que corresponde a uma taxa média de 6,5 quadros por segundo (frames/s).

Cada quadro contém uma leitura completa dos seis sensores

FSR402, resultando em aproximadamente 39 leituras escalares por segundo ($6 \times \text{frames/s}$).

Essa taxa mostrou-se suficiente para acompanhar, de forma contínua e estável, a variação das pressões plantares simuladas no aplicativo.

Cada sensor executa uma média de oito leituras consecutivas ($N = 8$) e aplica um filtro exponencial móvel (EMA) com $\alpha = 0,18$, a fim de eliminar ruídos de fundo e flutuações instantâneas.

Após o processamento, os valores são normalizados na escala de 0 a 100 % e enviados ao aplicativo em formato JSON compacto, contendo o tempo (t) e o vetor de pressões (pct).

A transmissão ocorre por meio de notificações BLE, mantendo sincronismo entre o envio do ESP32 e a atualização das telas no aplicativo móvel.

A Tabela 1 apresenta os parâmetros de configuração utilizados no processo de coleta e transmissão de dados.

Tabela 1 - Parâmetros de Configuração da Coleta

Parâmetro	Descrição	Valor Utilizado
SAMPLE_MS	Intervalo entre quadros de leitura	150 ms
N_MEDIA	Número de amostras por sensor na média	8
ALPHA	Coeficiente do filtro exponencial móvel (EMA)	0,18
DEADBAND	Zona morta para ruído pós-offset	6
Sensores	Tipo FSR-402 (resistivo de força)	6 unidades
Canal ADC	GPIOs 32–39 (ADC1)	Exclusivo BLE
Formato de envio	JSON compacto (t , pct)	—

Fonte: Do autor.

Durante os testes, o sistema apresentou comunicação contínua, sem perda de pacotes BLE e sem atrasos perceptíveis na atualização dos indicadores visuais.

A Tabela 2 sintetiza os resultados médios de desempenho obtidos a partir das execuções de teste. Observa-se que as taxas de leitura e de notificações BLE mantiveram-se estáveis, sem ocorrência de perdas de pacotes durante as transmissões.

Tabela 2 - Resultados Médios das Coletas Simuladas

Métrica Avaliada	Valor Observado	Unidade
Taxa média de quadros	6,5	Hz
Leituras escalares totais	39	leituras/s
Intervalo médio entre quadros	150	ms
Notificações BLE por segundo	6,5	notify/s
Perda de pacotes BLE	0	%
Taxa de atualização no app	Estável	—

Fonte: Do autor.

4.2 ESTRUTURA DOS DADOS TRANSMITIDOS

Os pacotes enviados pelo ESP32 seguem o formato definido a seguir, no qual são incluídos o timestamp em milissegundos (t) e o vetor de porcentagens de pressão (pct): {"t":12345,"pct":[12,8,0,0,5,19]}.

A simplicidade desse formato reduz o tempo de serialização e garante compatibilidade com o aplicativo móvel, que realiza a interpretação e atualização das leituras em tempo real.

O uso do BLE em conjunto com mensagens curtas e intervalos fixos de coleta proporcionou baixa latência e boa estabilidade, permitindo a visualização fluida do mapa de pressão plantar durante a simulação das passadas.

A comparação evidencia que o presente sistema busca equilibrar precisão e viabilidade prática. Enquanto os trabalhos de referência focam em abordagens complexas e de alto custo, esta pesquisa prioriza acessibilidade e reprodutibilidade, sem abrir mão da confiabilidade dos resultados. A coleta estável de dados e a visualização em tempo real comprovam que soluções simplificadas podem atingir níveis adequados de desempenho para monitoramento biomecânico em contexto esportivo.

4.3 REPRESENTAÇÃO VISUAL E INTERPRETAÇÃO DAS LEITURAS

O aplicativo móvel exibiu corretamente os dados recebidos, permitindo acompanhar, a cada sessão, o comportamento dos seis sensores e o mapa plantar reconstruído dinamicamente.

As áreas de maior pressão foram representadas por cores mais intensas, enquanto regiões de menor carga apareceram em tons suaves, permitindo identificar de forma clara a distribuição das forças.

Além disso, ao término de cada sessão, o sistema calculou o tipo de pisada predominante (neutra, pronada ou supinada), utilizando a média relativa entre os sensores internos e externos.

A simulação demonstrou coerência entre as variações aplicadas e os padrões apresentados na interface, validando o correto funcionamento da lógica de classificação e do fluxo de comunicação embarcado–aplicativo.

4.4 ANÁLISE COMPARATIVA COM TRABALHOS CORRELATOS

Com base nos resultados obtidos e nos estudos apresentados na fundamentação, foi elaborada uma análise comparativa entre o protótipo desenvolvido e os trabalhos correlatos de (Subramaniam et al., 2022), (Hooren; Rengs; Meijer, 2024) e (Chan et al., 2025). A Tabela 3 mostra um comparativo com os trabalhos correlatos:

Tabela 3 - Comparativo entre trabalhos relacionados

Critério	Subramaniam et al. (2022)	Hooren et al. (2024)	Chan et al. (2025)	Este Trabalho
Abordagem	Revisão de sistemas de palmilhas inteligentes	Predição de cargas com IA	Reconstrução de mapas via cGANs	Monitoramento e análise em tempo real
Tipo de sensores	Resistivos, capacitivos e piezoresistivos	Sensores instrumentados	Sensores de baixa densidade + inferência	Resistivos (6 pontos)
Contexto	Clínico e saúde preventiva	Corrida e reabilitação esportiva	Pesquisa e prototipagem experimental	Corrida e prevenção de lesões
Complexidade	Alta	Alta	Muito alta	Média
Limitações	Falta de validação dinâmica	Foco em cargas internas	Alto custo computacional	Testes simulados iniciais
Potencial	<i>Wearables</i> e fisioterapia	Treinamento esportivo	IA e reconstrução sintética	Solução prática e de baixo custo

Fonte: Adaptado de Subramaniam et al. (2022), Hooren et al. (2024) e Chan et al. (2025).

4.5 SÍNTESE DOS RESULTADOS

Os testes realizados confirmaram o funcionamento integrado de todos os módulos do sistema (desde o firmware embarcado até a interface móvel) validando a coerência da arquitetura proposta. Durante os experi-

mentos, foi possível verificar que o script interno do aplicativo gera passadas com comportamento biomecânico realista, simulando adequadamente as variações de pressão plantar e permitindo a análise dos resultados de forma fiel.

O conjunto de testes também permitiu avaliar o desempenho técnico da comunicação BLE e a confiabilidade do envio de dados. A taxa média de aquisição observada foi de 6,5 quadros por segundo (frames/s), equivalente a 6,5 Hz por sensor, totalizando cerca de 39 leituras escalares por segundo. Essa taxa se mostrou suficiente para acompanhar a dinâmica da pisada sem perda de resolução perceptível, considerando que o contato plantar ocorre em intervalos de aproximadamente 200 a 300 milissegundos. A estabilidade da conexão e a ausência de perdas de pacotes reforçam a eficiência do protocolo adotado, garantindo sincronismo entre os dados coletados e sua representação visual no aplicativo.

Os resultados gerais demonstraram que:

- O script interno do aplicativo gera passadas com coerência biomecânica e sincronismo com o ritmo de aquisição;
- O fluxo de sessão e envio consolidado ao final de cada teste garante integridade e consistência dos dados transmitidos;
- O backend e o banco de dados armazenam corretamente as amostras, preservando a estrutura temporal das leituras;
- O mapa de pressão e o tipo de pisada representados no aplicativo correspondem fielmente aos padrões esperados nas simulações;
- O sistema encontra-se apto para receber dados reais provenientes da palmilha física com ESP32, sem necessidade de reestruturação significativa.

Esses resultados confirmam a viabilidade técnica e funcional da solução, validando sua arquitetura modular e o potencial de evolução para aplicação prática com sensores reais. A frequência de leitura configurada (150 ms) mostrou-se adequada para o contexto esportivo e de análise de marcha, equilibrando estabilidade, baixo consumo e fluidez visual. Além disso, a comunicação BLE demonstrou robustez, e o formato de dados adotado (baseado em pacotes JSON compactos) proporcionou simplicidade e eficiência no tráfego entre o módulo embarcado e o aplicativo.

De modo geral, a etapa experimental cumpriu o objetivo de validar o funcionamento do sistema em ambiente controlado, servindo como base sólida para as próximas fases, que envolverão coletas reais com usuários e análises comparativas de padrões de pisada.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de um protótipo funcional de palmilha inteligente voltado à detecção do padrão de pisada e à análise da distribuição de pressão plantar, visando contribuir com a prevenção de lesões em corredores amadores. Para isso, foi proposta uma arquitetura composta por módulo embarcado com sensores de pressão FSR, aplicativo móvel para coleta e visualização dos dados e backend responsável pelo armazenamento e tratamento das amostras.

Mesmo com a etapa experimental sendo realizada por meio de simulações controladas de passadas, o sistema desenvolvido permitiu validar a integração entre os componentes de hardware e software, comprovando a eficiência da comunicação via Bluetooth Low Energy (BLE), a correta estruturação dos dados enviados ao backend e a funcionalidade das interfaces do aplicativo móvel, que exibem as leituras dos sensores, o mapa de pressão e o tipo de pisada predominante.

Os resultados obtidos confirmaram o atendimento dos objetivos propostos, uma vez que o sistema foi capaz de processar as amostras de pressão, identificar corretamente o tipo de pisada (pronada, neutra ou supinada) e apresentar visualizações coerentes do comportamento plantar. Além disso, a coleta por sessão e o envio consolidado ao final de cada execução mostraram-se adequados para aplicações embarcadas de baixo consumo e coleta contínua de dados biomecânicos.

Como contribuição técnica, este trabalho apresenta uma solução modular e acessível para monitoramento da pisada, combinando sensores de baixo custo, conectividade BLE e processamento móvel em tempo real.

A metodologia proposta demonstra que é possível validar todo o fluxo de software (desde a coleta até o armazenamento e visualização) sem a necessidade inicial de uma palmilha física totalmente instrumentada, o que reduz custos e acelera a fase de testes.

Do ponto de vista acadêmico, a pesquisa reforça o potencial de aplicação de sistemas vestíveis e IoT na área da saúde esportiva, oferecendo uma base para estudos sobre biomecânica, prevenção de lesões e análise de desempenho.

Entre as limitações observadas, destaca-se o uso de dados simulados, que, embora adequados para validar a arquitetura, não substituem medições reais sob condições fisiológicas variadas. Também se observou a necessidade de aprimorar algoritmos de filtragem e calibração para reduzir ruídos e aumentar a precisão nas leituras futuras.

Durante o desenvolvimento, o projeto proporcionou diversas lições práticas, incluindo a importância do sincronismo entre coleta e exibição em tempo real, o impacto da estabilidade da comunicação BLE e a necessidade de padronizar o formato de pacotes de dados para garantir integridade entre os módulos.

Como perspectivas de continuidade, pretende-se substituir os dados simulados por medições reais, utilizando sensores instalados na palmilha e coletando amostras durante a corrida de diferentes usuários.

Também se propõe o aperfeiçoamento dos algoritmos de classificação de pisada, incorporando técnicas de aprendizado de máquina capazes de identificar padrões complexos e associá-los a riscos de lesão.

Além disso, futuras versões do sistema poderão incluir armazenamento em nuvem, painéis analíticos com histórico de treinos e integração com dispositivos vestíveis externos, ampliando o alcance da solução para contextos clínicos e esportivos.

Por fim, este estudo não deve ser visto como um encerramento, mas como um ponto de partida para novas investigações.

A experiência adquirida e os resultados alcançados estabelecem uma base sólida para o avanço de soluções inteligentes voltadas à análise biomecânica e prevenção de lesões, demonstrando o potencial da computação aplicada à saúde e ao desempenho humano.

REFERÊNCIAS

ARAUJO, M. K. d. et al. **Lesões em praticantes amadores de corrida.** Revista Brasileira de Ortopedia, 2015, SciELO Brasil, v. 50, n. 05, p. 537–540.

CHAN, H.-L. et al. **Enhancing plantar pressure distribution reconstruction with conditional generative adversarial networks from multi-region foot pressure sensing.** Biomedical Signal Processing and Control, 2025, v. 100, p. 107187. ISSN 1746-8094. Acesso em: 9 out. 2024. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S174680942401245X>>.

CHEN, J. **Factor and correlation analysis for predicting marathon race performance using machine learning algorithms.** Journal of Electrical

Systems, 2024, Engineering and Scientific Research Groups, v. 20, n. 6s, p. 1948–1958.

FERNANDES, T. L.; PEDRINELLI, A.; HERNANDEZ, A. J. **Lesão muscular: fisiopatologia, diagnóstico, tratamento e apresentação clínica**. Revista Brasileira de Ortopedia, 2011, SciELO Brasil, v. 46, p. 247–255.

HOOREN, B. V.; RENGs, L. V.; MEIJER, K. **Predicting musculoskeletal loading at common running injury locations using machine learning and instrumented insoles**. Medicine & Science in Sports & Exercise, 2024, American College of Sports Medicine, v. 56, n. 10, p. 2059–2075. Acesso em: 21 set. 2024. Disponível em: <<https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000003493>>.

LUCCA, E. de. **A corrida de rua como fator de inserção social**. Revista de Educação, 2014, v. 8, n. 8, p. 6–18.

MACMAHON, J. M.; CHAUDHARI, A. M.; ANDRIACCHI, T. P. Biomechanical injury predictors for marathon runners: striding towards iliotibial band syndrome injury prevention. In: **ISBS-Conference Proceedings Archive**. [S.l.: s.n.], 2000.

MILEO, T. R.; SOUZA, R. D. B.; JUNIOR, R. S. **Corrida de rua: promoção de saúde e prevenção de doenças como diabetes e hipertensão**. Caderno Intersaberes, 2020, v. 9, n. 17.

SANTOS, A. A. dos; NASCIMENTO, F. W. do. **Biomecânica da corrida e lesões decorrentes aos erros dos movimentos: Uma revisão bibliográfica**. Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação, 2022, v. 8, n. 7, p. 1091–1101.

SCOTT, I. et al. **Achilles tendon thickness reduces immediately after a marathon**. Journal of Orthopaedic Surgery and Research, 2022, BioMed Central, v. 17, n. 1, p. 562.

SUBRAMANIAM, S. et al. **Insole-based systems for health monitoring: Current solutions and research challenges**. Sensors, 2022, MDPI, v. 22, n. 2, p. 438. Acesso em: 21 set. 2024. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/s22020438>>.

TURRA, G. D. P.; CEZNE, A. F.; VIDAL, R. G. **Anormalidades encontradas na biomecânica de corredores amadores**. Conjecturas, 2022, v. 22, n. 2, p. 1626–1635. ISSN 1657-5830.