

Análise da Marcha com Sensores Inerciais: Revisão Integrativa Sobre Parâmetros Espaço-temporais.

Gait Analysis with Inertial Sensors: an Integrative Review on Spatiotemporal Parameters.

Análise da Marcha com Sensores e Tecnologias Portáteis

Alethéa Gomes Nardini Barros¹, Fábio Rodrigo dos Santos² (RA: G0841D-0),
Letícia Roberta da Silva Santos² (RA: T97538-7)

Nome: Fábio Rodrigo dos Santos

Endereço para correspondência: Rua Coronel Euclides Machado, 185

Telefone: 11 98013-0474

Correio eletrônico: f.rodigosantos@gmail.com

1-Doutora em Fisioterapia pela Universidade Cidade de São Paulo; Docente do Curso de Fisioterapia da Universidade Paulista (UNIP);

2- Graduando(a) do Curso de Fisioterapia da Universidade Paulista (UNIP).

Os autores declaram não haver conflito de interesse.

Universidade Paulista

Curso de Fisioterapia – Campus Marquês

PROTOCOLO DE AVALIAÇÃO DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DO CURSO

NOME	RA	REGIME*	CAMPUS
Fábio Rodrigo dos Santos	G0841D-0	Regular	Marquês
Letícia Roberta da Silva Santos	T97538-7	Regular	Marquês

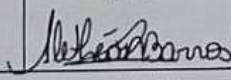
*Regular ou Tutelado

Orientador: Alethéa Gomes Nardini Barros

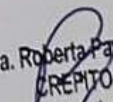
Título do trabalho: Análise da Marcha com Sensores Inerciais: Revisão Integrativa Sobre Parâmetros Espaço-temporais.

Tipo de trabalho: (X) REVISÃO () PESQUISA DE CAMPO

Tipo de apresentação: (X) BANNER () TEMA LIVRE

TCC	Nota Orientador	Média Apresentação	Nota PTCI	Nota Final
	10,0 	10,0	10,0	10,0

Alethéa Gomes Nardini
CREPITO 8.296027
CPF 348.703.848-06


Dra. Roberta Pasqualucci Ronchi
CREPITO-31/96057-F
Universidade Paulista - Unip

Coordenação do Curso de Fisioterapia

RESUMO

A análise instrumentada da marcha tem evoluído com o uso de tecnologias portáteis, como unidades de medição inercial (IMUs), sensores vestíveis e smartphones, ampliando as possibilidades de avaliação funcional além dos sistemas laboratoriais tradicionais. Este estudo teve como objetivo sintetizar as evidências disponíveis sobre o uso dessas tecnologias na avaliação da marcha em adultos saudáveis, com foco nos parâmetros espaço-temporais da marcha e em sua potencial aplicabilidade clínica. Trata-se de uma revisão integrativa da literatura. A busca foi realizada nas bases Scopus e PubMed, identificando inicialmente 422 estudos, dos quais 28 compuseram a amostra final após aplicação dos critérios de elegibilidade. Os resultados indicaram predomínio do uso de sensores inerciais, especialmente IMUs posicionadas em membros inferiores e tronco. Os parâmetros mais frequentemente analisados foram velocidade da marcha, cadência, comprimento do passo e tempo de apoio. Observou-se maior consistência nos parâmetros temporais, enquanto os parâmetros espaciais apresentaram maior variabilidade entre os estudos, além de heterogeneidade metodológica relacionada aos dispositivos, posicionamento dos sensores e algoritmos utilizados. Conclui-se que sensores inerciais e tecnologias portáteis representam ferramentas promissoras para a análise da marcha, sobretudo na mensuração de parâmetros temporais. Entretanto, a variabilidade nos parâmetros espaciais e a ausência de padronização metodológica indicam a necessidade de cautela na interpretação dos resultados e de avanços futuros para consolidação dessas tecnologias na prática clínica.

Descritores: Marcha; dispositivos vestíveis; análise da marcha; reprodutibilidade dos resultados, acelerometria.

ABSTRACT

Instrumented gait analysis has advanced substantially with the emergence of portable technologies such as inertial measurement units (IMUs), wearable sensors, and smartphones, expanding functional assessment beyond traditional laboratory-based systems. This study aimed to critically synthesize the available evidence on the use of these technologies for gait assessment in healthy adults, with emphasis on spatiotemporal gait parameters and their potential clinical applicability. An integrative literature review was conducted using the PubMed and Scopus databases. A total of 422 studies were initially identified, of which 28 met the eligibility criteria and were included in the final analysis. The findings demonstrated a predominance of IMU-based systems, most commonly positioned on the lower limbs and trunk. Gait speed, cadence, step length, and stance time were the most frequently reported parameters. Temporal parameters showed more consistent agreement across studies, whereas spatial parameters, particularly step length, exhibited greater variability. Additionally, substantial methodological heterogeneity was observed regarding sensor placement, number of devices, sampling frequency, and signal processing algorithms. In conclusion, inertial sensors and portable technologies represent promising tools for gait analysis, particularly for temporal parameters. However, variability in spatial measurements and the lack of methodological standardization highlight the need for cautious interpretation and further research to support their broader clinical implementation.

Descriptors: Gait; wearable electronic devices; gait analysis; reproducibility of results, accelerometry.

INTRODUÇÃO

A marcha humana é amplamente reconhecida como um importante marcador funcional do desempenho motor, sendo utilizada para avaliação da mobilidade, equilíbrio, independência funcional e risco de quedas. A análise quantitativa da marcha evoluiu de métodos observacionais para abordagens instrumentadas, permitindo a mensuração objetiva de parâmetros espaço-temporais relevantes tanto para a prática clínica quanto para a pesquisa¹⁻⁴.

Tradicionalmente, sistemas laboratoriais considerados padrões-ouro, como sistemas optoeletrônicos e plataformas instrumentadas, apresentam elevada precisão na análise da marcha^{1,2,5}. Entretanto, seu alto custo, necessidade de infraestrutura especializada e limitada aplicabilidade em ambientes externos restringem seu uso em contextos clínicos e funcionais do cotidiano^{3,4,6,7}.

Nesse cenário, observa-se crescente interesse no uso de tecnologias portáteis e acessíveis, como unidades de medição inercial (IMUs), sensores vestíveis e smartphones com sensores integrados para avaliação da marcha em diferentes contextos⁸⁻¹¹. Esses dispositivos permitem a coleta de dados em ambientes laboratoriais e em condições mais ecológicas, ampliando as possibilidades de monitoramento funcional¹²⁻¹⁴. Além disso, abordagens recentes utilizando sensores vestíveis, algoritmos computacionais e sistemas instrumentados têm ampliado a validação desses parâmetros em diferentes condições de avaliação, reduzindo a dependência de ambientes altamente controlados^{13,14}.

Entre os desfechos analisados, os parâmetros espaço-temporais da marcha — como velocidade, cadência, comprimento do passo e tempo de apoio, destacam-se por sua relevância clínica e por serem amplamente utilizados como indicadores de desempenho motor.^{3,6} No entanto, a estimativa desses parâmetros por meio de sensores portáteis depende de modelos matemáticos e algoritmos específicos, o que pode influenciar a precisão das medidas^{11,14}.

Além disso, estudos recentes têm evidenciado heterogeneidade significativa entre dispositivos, incluindo diferenças no posicionamento dos sensores, número de unidades utilizadas, frequência de amostragem e métodos de processamento dos sinais.^{5,8} Essa variabilidade metodológica pode impactar a comparabilidade dos resultados e a generalização dos achados.^{12,15}

Diante desse contexto, torna-se relevante sintetizar criticamente as evidências disponíveis sobre o uso de sensores inerciais e tecnologias portáteis na análise da marcha, com foco na mensuração de parâmetros espaço-temporais e em sua comparação com métodos de referência.

Assim, o presente estudo teve como objetivo analisar criticamente as evidências disponíveis sobre o uso dessas tecnologias na avaliação da marcha em adultos saudáveis, com ênfase na validade, confiabilidade e aplicabilidade clínica dos parâmetros espaço-temporais.

MÉTODO

Trata-se de uma revisão integrativa da literatura, com abordagem qualitativa e descritiva, conduzida com o objetivo de sintetizar evidências sobre o uso de sensores inerciais e tecnologias portáteis na análise da marcha, com foco na mensuração de parâmetros espaço-temporais em adultos saudáveis.

A revisão seguiu as etapas propostas para revisões integrativas, incluindo definição da pergunta de pesquisa, estabelecimento dos critérios de elegibilidade, busca na literatura, seleção dos estudos, extração dos dados e síntese dos resultados.

A formulação da pergunta de pesquisa foi estruturada por meio da estratégia SPIDER (*Sample, Phenomenon of Interest, Design, Evaluation e Research type*), considerada adequada para revisões envolvendo estudos observacionais e metodológicos. A estratégia foi definida da seguinte forma:

- S (*Sample*): adultos saudáveis e corredores sem comprometimentos clínicos;
- PI (*Phenomenon of Interest*): avaliação instrumentada da marcha;
- D (*Design*): estudos observacionais, de validação e confiabilidade;
- E (*Evaluation*): parâmetros espaço-temporais da marcha;
- R (*Research type*): estudos quantitativos.

Dessa forma, a presente revisão buscou responder à seguinte pergunta norteadora:

“Quais são as evidências disponíveis sobre o uso de sensores inerciais e tecnologias portáteis na mensuração de parâmetros espaço-temporais da marcha em adultos saudáveis?”

A busca bibliográfica foi realizada nas bases de dados PubMed e Scopus. A estratégia de busca foi adaptada conforme as especificidades de indexação de cada base de dados, utilizando combinações entre descritores relacionados à marcha, sensores inerciais e parâmetros espaço-temporais.

Foram utilizados os seguintes termos e operadores booleanos:
(*gait OR walking*) AND (*inertial measurement unit* OR IMU OR wearable sensor* OR acceleromet* OR smartphone OR mobile application**) AND (*spatiotemporal parameter* OR gait speed OR step length OR cadence*) AND (*validity OR reliability OR accuracy OR reproducibility*).

Foram incluídos estudos publicados entre 2010 e 2025, nos idiomas inglês ou português, que investigaram a análise da marcha em adultos saudáveis utilizando sensores inerciais ou tecnologias portáteis, para mensuração de parâmetros espaço-temporais, como velocidade da marcha, cadência, comprimento do passo, tempo de apoio e balanço.

Foram excluídos estudos duplicados, revisões de literatura, estudos que utilizaram exclusivamente métodos de classificação de marcha ou aprendizado de máquina sem o objetivo de extrair ou validar parâmetros espaço-temporais, artigos que não analisaram parâmetros espaço-temporais e aqueles que não empregaram sensores inerciais ou dispositivos equivalentes.

A seleção dos estudos foi realizada em duas etapas. Inicialmente por meio da leitura dos títulos e resumos dos estudos identificados. Posteriormente, os artigos potencialmente elegíveis foram avaliados por meio da leitura na íntegra. Os estudos incluídos foram organizados em planilha estruturada para extração e síntese dos dados.

As informações extraídas incluíram características da amostra, tipo de tecnologia utilizada, posicionamento dos sensores, parâmetros analisados, métodos de referência empregados e principais resultados relacionados à validade, confiabilidade e aplicabilidade dos dispositivos para análise da marcha.

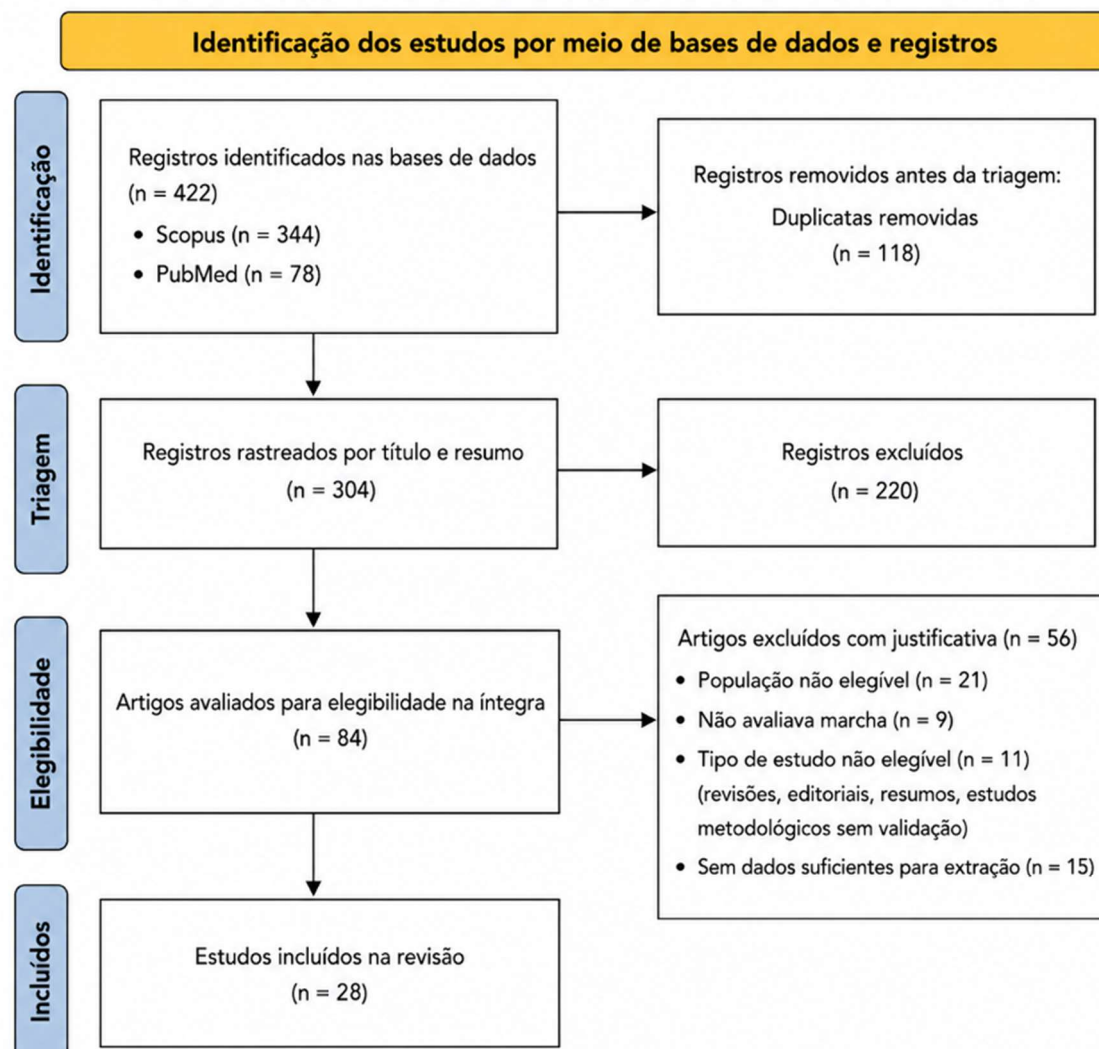
A análise dos dados foi realizada de forma descritiva e comparativa, considerando as características metodológicas dos estudos e os principais achados relacionados à mensuração dos parâmetros espaço-temporais da marcha.

Não foi realizada análise formal de risco de viés, considerando o caráter integrativo e descritivo desta revisão.

RESULTADOS

Após a aplicação dos critérios de elegibilidade, foram selecionados os estudos que compuseram a amostra final desta revisão integrativa. Inicialmente, foram identificados 422 estudos potencialmente relevantes, sendo 344 provenientes da base Scopus e 78 da PubMed. Após remoção de duplicatas e a triagem por títulos e resumos, seguida da leitura na íntegra dos artigos elegíveis, 28 estudos foram incluídos na análise final. (Figura 1).

A Figura 1 apresenta o fluxograma do processo de seleção dos estudos incluídos na revisão, conforme as etapas de identificação, triagem, elegibilidade e inclusão dos artigos.



Fonte: Adaptado de Page MJ, McKenzie JE, Bossuyt PM, Boutron I, Hoffmann TC, Mulrow CD, et al. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. BMJ. 2021;372:n71.

Figura 1. Fluxograma PRISMA da seleção dos estudos incluídos na revisão.

As características dos estudos incluídos nesta revisão integrativa estão apresentadas no Quadro 1. Observou-se predominância do uso de unidades de medição inercial (IMUs) e dispositivos vestíveis aplicadas principalmente em adultos saudáveis, com sensores posicionados preferencialmente em membros inferiores, pés, tornozelos e região lombar. Smartphones e palmilhas instrumentadas também foram frequentemente utilizados para análise da marcha em contextos laboratoriais e funcionais.

Os parâmetros espaço-temporais mais frequentemente analisados foram velocidade da marcha, cadência, comprimento do passo, tempo de apoio e tempo de balanço. A maioria dos estudos realizou comparação entre os dispositivos portáteis e métodos considerados padrão-ouro, incluindo sistemas optoeletrônicos, Motion Capture, passarelas instrumentadas e plataformas baropodométricas.

De forma geral, os estudos demonstraram resultados mais consistentes para parâmetros temporais da marcha, especialmente velocidade, cadência e tempo de passada, com boa concordância em relação aos métodos de referência. Em contraste, parâmetros espaciais, particularmente comprimento do passo e comprimento da passada, apresentaram maior variabilidade entre os estudos, frequentemente relacionada às diferenças nos algoritmos de processamento, posicionamento dos sensores e condições de aquisição dos dados.

Além disso, observou-se heterogeneidade metodológica importante entre os estudos incluídos, envolvendo diferenças no número de sensores utilizados, frequência de amostragem, local de posicionamento dos dispositivos e protocolos de coleta. Estudos mais recentes também evidenciaram crescente utilização de sistemas híbridos, aprendizado de máquina e monitoramento em ambientes de vida real para estimativa dos parâmetros da marcha.

Quadro 1: Características dos estudos incluídos na revisão integrativa. Todos os estudos incluíram adultos saudáveis, exceto quando especificado.

Autor/ Ano	Tecnologia	Local do sensor	Parâmetros analisados	Método de referência	Principais achados
Donath et al., 2016	IMU wearable (RehaGait®)	Pés	Velocidade, cadência, comprimento e tempo da passada	Esteira instrumentada Zebris	Alta confiabilidade para parâmetros espaço-temporais da marcha.
González et al., 2016	IMU + Kinect	Tornozelo	Tempo do passo, passada, cadência, velocidade	GAITRite®	Boa precisão na estimativa de parâmetros temporais da marcha.
Fusca et al., 2018	IMU/acelerômetro 3D wearable	Lombar (centro de massa)	Frequência da passada, velocidade	Comparação indireta com medidas controladas	Boa estimativa da velocidade e frequência da passada com sensor único.

Proessl et al., 2018	Smartphone + IMU Shimmer3	Lombar	Cadência, tempo da passada, simetria	IMU de pesquisa Shimmer3	Boa concordância entre smartphone e sensor inercial para parâmetros temporais.
De Ridder et al., 2019	Acelerômetro triaxial G- Walk	Lombar (L5)	Velocidade, cadência, comprimento do passo	GAITRite®	Resultados consistentes para velocidade, cadência e comprimento do passo.
Zhang et al., 2020	IMU + Machine Learning	Pés	Comprimento da passada, velocidade	Sistema cinemático/esteira instrumentada	Melhora da estimativa espacial da marcha com aprendizado de máquina.
Howell et al., 2020	Smartphone com sensores inerciais	Lombar	Velocidade, cadência, tempo do passo	Avaliação clínica/laboratorial	Smartphone apresentou boa aplicabilidade clínica para análise da marcha.

Hori et al., 2020	IMU TSND121	Pé	Comprimento do passo, velocidade, apoio e balanço	Motion Capture	Alta correlação para parâmetros espaço-temporais da marcha.
Fujiwara et al., 2020	Acelerômetro triaxial wearable	Lombar	Tempo do passo, variabilidade, regularidade	Teste-reteste	Boa confiabilidade teste-reteste para parâmetros temporais da marcha.
Yeo & Park, 2020	Sistema G-Walk IMU	Lombar	Parâmetros espaço-temporais e cinemáticos	Vicon	Boa validade clínica para parâmetros espaço-temporais e cinemáticos.
Dot et al., 2020	IMU Xsens + DTW	Dorso dos pés	Tempo de apoio, balanço, variabilidade	GAITRite®	Alta precisão na detecção de eventos da marcha.
Zrenner et al., 2020	IMU wearable	Pés	Cadência, tempo de contato e balanço	Sistemas laboratoriais	Precisão dependente do posicionamento do sensor.

Correale et al., 2021	IMU G-Walk	Lombar	Velocidade, cadência, comprimento do passo	Plataforma baropodométrica	Boa concordância entre IMU e plataforma baropodométrica.
Anwary et al., 2021	IMUs Shimmer3	Pés	Parâmetros temporais, espaciais e variabilidade	Vicon	Alta concordância entre IMUs e sistema Vicon.
Pepa et al., 2017	Smartphone	Tronco	Contato inicial, contagem de passos	Estereofotogrametria	Smartphones apresentaram boa precisão para parâmetros da marcha.
Zamberger et al., 2025	IMU BTS G-Walk	Tronco	Cadência, velocidade, apoio e balanço	Vicon	Alta confiabilidade para parâmetros espaço-temporais da marcha.
Boutaayamou et al., 2025	IMU wearable	Pés	Velocidade, cadência, tempo de ciclo	Sem padrão-ouro	Boa confiabilidade em diferentes condições de marcha.

Baek et al., 2024	Smartphone	Lombar	Cadência, apoio, balanço, simetria	GAITRite®	Boa validade para análise da marcha com smartphone.
Michaud et al., 2024	IMU Syde®	Tornozelo	Comprimento da passada, velocidade	OptiTrack	Alta validade analítica para parâmetros da marcha.
Webber et al., 2024	IMU STATSports Apex	Tronco	Parâmetros de corrida e marcha	OptoJump Next	Boa validade para análise da marcha e corrida.
Bailey et al., 2023	Smartwatch + ML	Pulso	Parâmetros de passada e variabilidade	Vicon	Precisão moderada para estimativa de parâmetros da marcha.
Mason et al., 2023	DANU Sports	Tronco/pelve/pés	Parâmetros temporais da marcha e corrida	Sistema optoeletrônico 3D	Boa validade para análise temporal da marcha e corrida.
Riglet et al., 2023	IMU DSPro	Pés	Velocidade, cadência, variabilidade	GAITRite	Boa confiabilidade para análise da marcha com palmilhas instrumentadas.
Uno et al., 2023	ORPHE Analytics	Pés	Parâmetros da marcha e corrida	OptiTrack	Alta validade para parâmetros espaço-temporais da marcha.

Ganguly et al., 2023	Insole3	Pés	Cadência, velocidade e comprimento da passada	Motion Capture (MOCAP)	Boa precisão para parâmetros temporais e espaciais.
Wu et al., 2021	Sistema in-shoe inteligente	Pés	Centro de pressão, cadência	Sistemas laboratoriais	Permitiu monitoramento em tempo real da marcha.
Shahar & Agmon, 2021	Smartphone (OneStep + APDM)	Lombar	Cadência, regularidade, simetria	APDM Mobility Lab	Boa concordância entre smartphone e sistema de referência.
Duong et al., 2022	Palmilhas instrumentadas + ML	Pés	Comprimento da passada, velocidade	Sistemas móveis de referência	Boa precisão em ambientes de vida real.

A síntese dos principais achados relacionados aos parâmetros espaço-temporais da marcha encontra-se apresentada no Quadro 2. Os parâmetros temporais apresentaram maior consistência entre os estudos, enquanto parâmetros espaciais e medidas de variabilidade demonstraram maior heterogeneidade metodológica e menor uniformidade entre os resultados reportados.

Quadro 2: Síntese dos resultados dos estudos incluídos quanto aos parâmetros espaço-temporais da marcha.

Parâmetro	Nº de estudos	Padrão de resultado	Observações
Velocidade	24	Maior concordância	Boa concordância com métodos de referência; melhor desempenho em ambiente laboratorial.
Cadência	20	Maior concordância	Menor variabilidade entre os parâmetros temporais analisados.
Comprimento do passo	20	Maior variabilidade	Maior sensibilidade aos algoritmos e ao posicionamento do sensor.
Tempo de apoio	14	Maior concordância	Precisão dependente do posicionamento do sensor e das condições de coleta.
Variabilidade	8	Evidência limitada	Maior heterogeneidade metodológica entre os estudos avaliados.

DISCUSSÃO

A presente revisão integrativa sintetizou evidências sobre o uso de sensores inerciais e tecnologias portáteis na análise instrumentada da marcha em adultos saudáveis, demonstrando crescimento expressivo da utilização de unidades de medição inercial (IMUs), dispositivos vestíveis e smartphones para mensuração de parâmetros espaço-temporais da marcha.^{1,4,15} De forma geral, os achados desta revisão sugerem que essas tecnologias apresentam desempenho mais robusto para estimativa de parâmetros temporais da marcha quando comparados aos parâmetros espaciais, especialmente para velocidade, cadência e tempo de passada.^{2,6,14,17}

A predominância de resultados mais consistentes para parâmetros temporais pode ser explicada pelas próprias características biomecânicas e matemáticas envolvidas na aquisição dos sinais inerciais. Eventos temporais da marcha, como contato inicial e retirada do pé, estão associados a mudanças abruptas nos padrões de aceleração e velocidade angular, facilitando sua detecção pelos sensores.^{1,2,9} Em contraste, parâmetros espaciais, como comprimento do passo e comprimento da passada, dependem da estimativa contínua do deslocamento linear corporal a partir da integração dos sinais de aceleração.^{6,8} Esse processo torna-se mais suscetível ao acúmulo de erros, drift e dependência de algoritmos de correção, especialmente em coletas prolongadas ou realizadas fora de ambientes laboratoriais controlados.^{6,12,14}

Além disso, a estimativa dos parâmetros espaciais depende diretamente de modelos biomecânicos específicos e de pressupostos matemáticos relacionados à orientação corporal, velocidade de progressão e reconstrução do deslocamento do centro de massa. Pequenas variações na calibração dos sensores, posicionamento corporal ou filtragem dos sinais podem produzir diferenças relevantes na estimativa final dessas variáveis.^{5,6,14} Esse comportamento ajuda a explicar a maior variabilidade observada entre os estudos incluídos nesta revisão para comprimento do passo e comprimento da passada.^{12,17,28}

Outro aspecto biomecânico relevante identificado foi a influência do posicionamento dos sensores sobre a precisão dos parâmetros analisados. Sensores posicionados em segmentos distais, especialmente pés e tornozelos, tenderam a apresentar melhor desempenho para identificação dos eventos da

marcha devido à maior aceleração angular e linear observada nesses segmentos durante o ciclo da marcha.^{1,2,6} Essas regiões apresentam alterações cinemáticas mais abruptas nos momentos de contato inicial e retirada do pé, favorecendo a detecção temporal dos eventos. Por outro lado, sensores posicionados no tronco e região lombar demonstraram maior aplicabilidade para monitoramento global da marcha e estimativa do deslocamento corporal, embora possam apresentar menor sensibilidade para identificação precisa de eventos específicos do ciclo.^{3,5,7,17}

Os estudos incluídos também evidenciaram crescente interesse na utilização de smartphones e dispositivos vestíveis de baixo custo para análise funcional da marcha em ambientes clínicos e de vida real.^{2,4,7,18} Esse avanço possui relevância importante para a fisioterapia e reabilitação, uma vez que amplia a possibilidade de monitoramento longitudinal e avaliação funcional fora de laboratórios especializados. Entretanto, apesar do potencial clínico observado, a utilização dessas tecnologias ainda depende de maior padronização metodológica, especialmente em relação ao posicionamento dos dispositivos, frequência de aquisição, filtragem dos sinais e algoritmos utilizados para extração dos parâmetros.^{14,21,28}

A heterogeneidade metodológica observada entre os estudos representa um dos principais desafios identificados nesta revisão. Foram encontradas diferenças relevantes relacionadas ao número de sensores utilizados, local de posicionamento, frequência de amostragem, protocolos de coleta e métodos de processamento dos sinais.^{5,10,14} Essa variabilidade metodológica dificulta comparações diretas entre dispositivos e limita a generalização dos resultados. Do ponto de vista biomecânico, diferenças na frequência de aquisição podem alterar a capacidade de detecção de eventos rápidos da marcha, enquanto variações nos algoritmos de filtragem e integração podem impactar diretamente a estimativa dos parâmetros espaciais.^{6,8,21}

Alguns estudos recentes também utilizaram algoritmos de aprendizado de máquina e sistemas híbridos associados a sensores inerciais para otimizar a estimativa dos parâmetros espaço-temporais.^{6,28} Embora esses métodos tenham demonstrado potencial para redução de erros e maior robustez na análise da marcha, ainda existe limitação relacionada à padronização dos modelos utilizados e à necessidade de validação em diferentes populações e

contextos funcionais. Dessa forma, o avanço tecnológico dessas ferramentas ainda deve ser interpretado com cautela.

Do ponto de vista clínico, os achados desta revisão sugerem que sensores inerciais e tecnologias portáteis podem representar alternativas potencialmente aplicáveis para análise quantitativa da marcha em ambientes ambulatoriais, domiciliares e esportivos.^{15,17,22} Essas tecnologias apresentam vantagens relacionadas ao menor custo, portabilidade e possibilidade de monitoramento contínuo, reduzindo parcialmente a dependência de sistemas laboratoriais complexos. Entretanto, a aplicabilidade clínica dessas ferramentas ainda depende da definição de protocolos padronizados e da consolidação de evidências relacionadas à validade e confiabilidade em diferentes condições de uso.^{14,20}

Esta revisão apresenta algumas limitações. A maioria dos estudos incluídos foi realizada em adultos saudáveis e em ambientes controlados, limitando a extrapolação dos resultados para populações clínicas e condições ecológicas mais complexas.^{27,28} Além disso, a ausência de padronização metodológica entre os estudos dificultou comparações homogêneas entre os dispositivos avaliados e impediu a realização de sínteses quantitativas mais robustas. A inclusão apenas de estudos publicados em inglês e português também pode ter limitado a identificação de evidências relevantes disponíveis em outros idiomas.

Dessa forma, estudos futuros devem investigar a aplicabilidade dessas tecnologias em diferentes populações clínicas, ambientes externos e protocolos padronizados, além de explorar novos algoritmos de processamento capazes de reduzir erros relacionados à estimativa dos parâmetros espaciais da marcha.^{6,21} Também são necessários estudos que avaliem a responsividade clínica dessas tecnologias e sua capacidade de monitoramento longitudinal em condições reais de uso.

CONCLUSÃO

A presente revisão integrativa da literatura evidenciou que sensores inerciais e tecnologias portáteis apresentam resultados consistentes para análise de parâmetros espaço-temporais da marcha em adultos saudáveis, especialmente para variáveis temporais, como velocidade da marcha, cadência e tempo de passada. Observou-se crescente utilização de dispositivos acessíveis e portáteis, ampliando a possibilidade de monitoramento funcional em contextos clínicos e ambientes externos.

Os estudos incluídos demonstraram que sistemas baseados em unidades de medição inercial (IMUs), dispositivos vestíveis e smartphones apresentam potencial para aplicação na análise quantitativa da marcha, frequentemente com boa concordância em relação aos métodos de referência laboratoriais. Entretanto, parâmetros espaciais, particularmente comprimento do passo e comprimento da passada, apresentaram maior variabilidade entre os estudos, possivelmente relacionada às diferenças metodológicas entre dispositivos, posicionamento dos sensores e algoritmos utilizados para processamento dos sinais.

Além disso, a heterogeneidade metodológica observada entre os estudos incluídos reforça a necessidade de maior padronização dos protocolos de aquisição e análise dos dados, visando melhorar a comparabilidade dos resultados e consolidar a utilização dessas tecnologias na prática clínica e científica.

Dessa forma, embora sensores inerciais e tecnologias portáteis representem ferramentas promissoras para análise instrumentada da marcha, especialmente pela maior acessibilidade e aplicabilidade funcional, ainda são necessários estudos futuros envolvendo diferentes populações, ambientes ecológicos e protocolos padronizados para fortalecer sua validade clínica e ampliar sua utilização em contextos reais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Donath L, Faude O, Lichtenstein E, Nüesch C, Mündermann A. Validity and reliability of a portable gait analysis system for measuring spatiotemporal gait characteristics. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*. 2016;13(1):6. doi: 10.1186/s12984-016-0115-z.
2. González I, López-Nava IH, Fontecha J, Muñoz-Meléndez A, Pérez-SanPablo AI, Quiñones-Urióstegui I. Comparison between passive vision-based system and a wearable inertial-based system for estimating temporal gait parameters related to the GAITRite electronic walkway. *Journal of Biomedical Informatics*. 2016;64:55-67. doi: 10.1016/j.jbi.2016.07.009.
3. Fusca M, Perego P, Andreoni G. Method for wearable kinematic gait analysis using a harmonic oscillator applied to the center of mass. *Journal of Sensors*. 2018;2018:4548396. doi: 10.1155/2018/4548396.
4. Proessl F, Swanson CW, Rudroff T, Fling BW, Tracy BL. Good agreement between smart device and inertial sensor-based gait parameters during a 6-min walk. *Gait & Posture*. 2018;64:258-263. doi: 10.1016/j.gaitpost.2018.05.030.
5. De Ridder R, Lebleu J, Willems T, De Blaiser C, Detrembleur C, Roosen P. Concurrent validity of a commercial wireless trunk triaxial accelerometer system for gait analysis. *Journal of Sport Rehabilitation*. 2019;28(6):659-664. doi: 10.1123/JSR.2018-0295.
6. Zhang H, Guo Y, Zanotto D. Accurate Ambulatory Gait Analysis in Walking and Running Using Machine Learning Models. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng*. 2020;28(2):410–419. doi:10.1109/TNSRE.2019.2958679.
7. Howell DR, Lugade V, Taksir M, Meehan WP. Determining the utility of a smartphone-based gait evaluation for possible use in concussion management. *The Physician and Sportsmedicine*. 2020;48(2):174-181. doi: 10.1080/00913847.2019.1632155.
8. Hori K, Mao Y, Ono Y, Ora H, Hirobe Y, Sawada H, et al. Inertial measurement unit-based estimation of foot trajectory for clinical gait analysis. *Frontiers in Physiology*. 2020;10:1530. doi: 10.3389/fphys.2019.01530.
9. Fujiwara S, Sato S, Sugawara A, Nishikawa Y, Koji T, Nishimura Y, et al. The coefficient of variation of step time can overestimate gait abnormality: test-retest reliability of gait-related parameters obtained with a tri-axial accelerometer in healthy subjects. *Sensors*. 2020;20(3):577. doi: 10.3390/s20030577.

10. Yeo SS, Park GY. Accuracy verification of spatio-temporal and kinematic parameters for gait using inertial measurement unit system. *Sensors*. 2020;20(5):1343. doi: 10.3390/s20051343.
11. Dot T, Quijoux F, Oudre L, Vienne-Jumeau A, Moreau A, Vidal PP, et al. Non-linear template-based approach for the study of locomotion. *Sensors*. 2020;20(7):1939. doi: 10.3390/s20071939.
12. Zrenner M, Küderle A, Roth N, Jensen U, Dümmler B, Eskofier BM. Does the position of foot-mounted IMU sensors influence the accuracy of spatio-temporal parameters in endurance running? *Sensors*. 2020;20(19):5705. doi: 10.3390/s20195705.
13. Correale L, Pellino VC, Marin L, Febbi M, Vandoni M. Comparison of an inertial measurement unit system and baropodometric platform for measuring spatiotemporal parameters and walking speed in healthy adults. *Measurement in Physical Education and Exercise Science*. 2021;25(2):134-144. doi: 10.1123/MC.2020-0060.
14. Anwary AR, Yu H, Callaway A, Vassallo M. Validity and consistency of concurrent extraction of gait features using inertial measurement units and motion capture system. *IEEE Sensors Journal*. 2021;21(3):3279-3289. doi: 10.1109/JSEN.2020.3021501.
15. Pepa L, Verdini F, Spalazzi L. Gait parameter and event estimation using smartphones. *Gait & Posture*. 2017;58:325-330. doi: 10.1016/j.gaitpost.2017.06.011.
16. Zamberger S, Wurzing L, Horsak B, Dumphart B, Pahr D, Ernst U, et al. Assessment of reliability and concurrent validity of a single trunk-based IMU system to quantify spatiotemporal parameters in healthy individuals. *BioMedical Engineering OnLine*. 2025;24:10. doi: 10.1186/s13102-025-01410-0.
17. Boutaayamou M, Pelzer D, Schwartz C, Gillain S, Garraux G, Croisier JL, et al. Toward convenient and accurate IMU-based gait analysis. *Sensors*. 2025;25(4):1267. doi: 10.3390/s25041267.
18. Baek JE, Jung JH, Kim HK, Cho HY. Smartphone accelerometer for gait assessment: validity and reliability in healthy adults. *Applied Sciences*. 2024;14(23):11321. doi: 10.3390/app142311321.
19. Michaud M, Guérin A, Dejean de La Bâtie M, Bancel L, Oudre L, Tricot A. The analytical validity of stride detection and gait parameters reconstruction using the ankle-mounted inertial measurement unit Syde®. *Sensors*. 2024;24(8):2413. doi: 10.3390/s24082413.
20. Webber E, Leduc C, Emmonds S, Eglon M, Hanley B, Iqbal Z, et al. From lab to field: validity and reliability of inertial measurement unit-derived gait parameters during a standardised run. *Journal of Sports Sciences*. 2024. doi: 10.1080/02640414.2024.2408195.

21. Bailey CA, Mir-Orefice A, Uchida TK, Nantel J, Graham RB. Smartwatch-based prediction of single-stride and stride-to-stride gait outcomes using regression-based machine learning. *Annals of Biomedical Engineering*. 2023. doi: 10.1007/s10439-023-03290-2.
22. Mason R, Barry G, Robinson H, O'Callaghan B, Lennon O, Godfrey A, et al. Validation of DANU Sports inertial system for gait and running. *Physiological Measurement*. 2023. doi: 10.1088/1361-6579/ad04b4.
23. Riglet L, Nicol F, Leonard A, Eby N, Claquesin L, Orliac B, et al. The use of embedded IMU insoles to assess gait parameters: a validation and test-retest reliability study. *Sensors*. 2023;23(19):8155. doi: 10.3390/s23198155.
24. Uno Y, Ogasawara I, Konda S, Yoshida N, Otsuka N, Kikukawa Y, et al. Validity of spatio-temporal gait parameters in healthy young adults using a motion-sensor-based gait analysis system (ORPHE ANALYTICS) during walking and running. *Sensors*. 2023;23(1):331. doi: 10.3390/s23010331.
25. Ganguly A, Olmanson BA, Knowlton CB, Wimmer MA, Ferrigno C. Accuracy of the fully integrated Insole3's estimates of spatiotemporal parameters during walking. *Medical Engineering & Physics*. 2023;111:103925. doi: 10.1016/j.medengphy.2022.103925.
26. Wu J, Kuruvithadam K, Schaer A, Stoneham R, Chatzipirpiridis G, Easthope CA, et al. An intelligent in-shoe system for gait monitoring and analysis with optimized sampling and real-time visualization capabilities. *Sensors*. 2021;21(8):2869. doi: 10.3390/s21082869.
27. Shahar RT, Agmon M. Gait analysis using accelerometry data from a single smartphone: agreement and consistency between a smartphone application and gold-standard gait analysis system. *Sensors*. 2021;21(22):7497. doi: 10.3390/s21227497.
28. Duong TTH, Uher D, Montes J, Zanutto D. Ecological validation of machine learning models for spatiotemporal gait analysis in free-living environments using instrumented insoles. *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2022;7(4):10834-10841. doi: 10.1109/LRA.2022.3188895.