

Variabilidade interindividual em corredores de rua: Uma análise secundária como base para a modelagem de gêmeos digitais no esporte

Interindividual variability in road runners: A secondary analysis as a basis for digital twin modeling in sport

Variabilidad interindividual en corredores de calle: Un análisis secundario como base para la modelización de gemelos digitales en el deporte

Recebido: 10/02/2026 | Revisado: 04/03/2026 | Aceitado: 05/03/2026 | Publicado: 06/03/2026

Jefferson Batista da Silva

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-8486-7232>

Universidade Estadual da Paraíba, Brasil

E-mail: Jeffersonbatistaft@gmail.com

Edmar Candeia Gurjão

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9694-3668>

Universidade Federal de Campina Grande, Brasil

E-mail: ecg@dee.ufcg.edu.br

Resumo

A corrida de rua é uma modalidade esportiva amplamente praticada, caracterizada por elevada diversidade de perfis entre seus participantes. O desempenho nessa modalidade resulta da interação de fatores biomecânicos, fisiológicos e demográficos, que variam significativamente entre indivíduos, o que limita a aplicabilidade de modelos generalistas baseados em médias populacionais. O presente estudo teve como objetivo analisar a variabilidade interindividual em corredores de uma prova de rua, utilizando dados secundários como base para discutir a necessidade de gêmeos digitais individualizados no contexto esportivo. Trata-se de um estudo observacional, quantitativo e retrospectivo, realizado por meio da análise de dados públicos, agregados e anonimizados de 7.096 corredores participantes da prova Redepharma Run 2025, realizada no município de Campina Grande, Paraíba. As variáveis analisadas incluíram sexo, faixa etária e escolha da distância da prova. Os resultados evidenciaram ampla heterogeneidade demográfica e de participação entre os corredores, com sobreposição significativa entre grupos tradicionalmente utilizados para classificação, como sexo e idade, indicando que indivíduos com características distintas tendem a apresentar padrões semelhantes de participação. Esses achados demonstraram que abordagens baseadas em perfis médios são insuficientes para representar adequadamente a complexidade do comportamento humano na corrida de rua. Conclui-se que a elevada variabilidade interindividual observada impõe desafios relevantes à modelagem genérica do desempenho esportivo e reforça a necessidade de abordagens personalizadas, como o uso de gêmeos digitais individualizados, para melhor compreensão, monitoramento e aplicação dessa tecnologia no esporte.

Palavras-chave: Corredor de rua; Gêmeo digital; Biomecânica; Análise de desempenho.

Abstract

Road running is a widely practiced sport characterized by a high diversity of participant profiles. Performance in this modality results from the interaction of biomechanical, physiological, and demographic factors that vary substantially among individuals, which limits the applicability of generalist models based on population averages. This study aimed to analyze interindividual variability among runners from a road race using secondary data as a basis to discuss the need for individualized digital twins in the sports context. This observational, quantitative, and retrospective study was conducted through the analysis of public, aggregated, and anonymized data from 7,096 runners who participated in the Redepharma Run 2025, held in the city of Campina Grande, Paraíba, Brazil. The analyzed variables included sex, age group, and race distance selection. The results demonstrated marked demographic and participatory heterogeneity among runners, with significant overlap between groups traditionally used for classification, such as sex and age, indicating that individuals with distinct characteristics may present similar participation patterns. These findings demonstrated that approaches based on average profiles are insufficient to adequately represent the complexity of human behavior in road running. It is concluded that the high interindividual variability observed poses relevant challenges to generic performance modeling and reinforces the need for personalized approaches, such as individualized digital twins, to improve understanding, monitoring, and application of this technology in sport.

Keywords: Elite runner; Digital twin; Biomechanics; Performance analysis; Marathon.

Resumen

La carrera de calle es una modalidad deportiva ampliamente practicada, caracterizada por una elevada diversidad de perfiles entre sus participantes. El rendimiento en esta modalidad resulta de la interacción de factores biomecánicos, fisiológicos y demográficos, los cuales varían significativamente entre individuos, lo que limita la aplicabilidad de modelos generalistas basados en promedios poblacionales. El presente estudio tuvo como objetivo analizar la variabilidad interindividual en corredores de una prueba de calle, utilizando datos secundarios como base para discutir la necesidad de gemelos digitales individualizados en el contexto deportivo. Se trata de un estudio observacional, cuantitativo y retrospectivo, realizado mediante el análisis de datos públicos, agregados y anonimizados de 7.096 corredores participantes de la prueba Redepharma Run 2025, realizada en el municipio de Campina Grande, Paraíba, Brasil. Las variables analizadas incluyeron sexo, grupo etario y elección de la distancia de la prueba. Los resultados evidenciaron una amplia heterogeneidad demográfica y de participación entre los corredores, con una superposición significativa entre grupos tradicionalmente utilizados para la clasificación, como sexo y edad, lo que indica que individuos con características distintas tienden a presentar patrones similares de participación. Estos hallazgos demostraron que los enfoques basados en perfiles promedio son insuficientes para representar adecuadamente la complejidad del comportamiento humano en la carrera de calle. Se concluye que la elevada variabilidad interindividual observada impone desafíos relevantes a la modelización genérica del rendimiento deportivo y refuerza la necesidad de enfoques personalizados, como el uso de gemelos digitales individualizados, para una mejor comprensión, monitoreo y aplicación de esta tecnología en el deporte.

Palabras clave: Corredor de calle; Gemelo digital; Biomecánica; Análisis del rendimiento.

1. Introdução

A corrida de rua é uma das modalidades esportivas mais praticadas no mundo, caracterizando-se por sua ampla acessibilidade, baixo custo operacional e potencial de promoção da saúde em diferentes faixas etárias e níveis de condicionamento físico (Santos et al., 2022). Nas últimas décadas, observa-se um crescimento expressivo no número de eventos e participantes, acompanhado por uma diversificação significativa dos perfis de corredores, que incluem desde praticantes recreacionais até atletas altamente treinados (Xu; Wang & Wen, 2025). Esse cenário reforça a complexidade inerente à corrida enquanto sistema biológico, no qual múltiplos fatores interagem de forma dinâmica para determinar o desempenho, a adaptação ao treinamento e o risco de lesões (Braschler et al., 2025).

O desempenho na corrida de rua resulta da interação entre componentes biomecânicos, fisiológicos, neuromusculares e psicológicos, os quais variam substancialmente entre indivíduos (Correia et al., 2024). Diferenças relacionadas à idade, ao sexo, à composição corporal, ao histórico esportivo e às estratégias de prova influenciam diretamente a forma como cada corredor responde às demandas impostas pelo esforço físico (Stenerson et al., 2023). Assim, mesmo quando submetidos a estímulos aparentemente semelhantes, corredores podem apresentar respostas completamente distintas, evidenciando a limitação de abordagens baseadas em médias populacionais para a compreensão do comportamento humano no esporte (Santos et al., 2022).

Tradicionalmente, estudos científicos na área da corrida têm se apoiado em modelos generalistas para análise de desempenho e prescrição de treinamento, frequentemente utilizando amostras reduzidas e condições controladas de laboratório (Llanos-Lagos et al., 2024). Embora essas abordagens tenham contribuído significativamente para o avanço do conhecimento, elas apresentam limitações importantes quando extrapoladas para contextos reais de competição, nos quais a variabilidade interindividual é acentuada e os sistemas biológicos operam de forma não linear (Braschler et al., 2025). Nesse sentido, a crescente disponibilidade de dados provenientes de eventos esportivos, dispositivos vestíveis e plataformas digitais tem ampliado as possibilidades de investigação em larga escala, permitindo análises mais próximas da realidade ecológica dos corredores (Paixão & Agostini, 2025).

Nesse contexto, o conceito de gêmeo digital tem emergido como uma abordagem promissora para a modelagem de sistemas biológicos complexos no esporte. Um gêmeo digital pode ser definido como uma representação virtual dinâmica de um indivíduo, construída a partir da integração contínua de múltiplas camadas de dados, capaz de simular comportamentos, prever respostas a estímulos e apoiar a tomada de decisão. No âmbito da corrida, essa abordagem tem sido explorada como

uma ferramenta potencial para otimização do desempenho, monitoramento de carga, prevenção de lesões e personalização do treinamento (Mantuano et al., 2025).

Entretanto, a construção de um gêmeo digital aplicável à corrida de rua apresenta desafios metodológicos substanciais. A criação de uma representação virtual fidedigna exige a coleta, integração e processamento de uma grande quantidade de dados heterogêneos, incluindo variáveis demográficas, biomecânicas, fisiológicas e contextuais (Chomienne et al., 2024). Além disso, tais modelos devem ser capazes de se adaptar às mudanças ao longo do tempo, refletindo o caráter dinâmico do organismo humano. Essa complexidade torna inviável a aplicação de modelos simplificados ou genéricos, especialmente quando se considera a elevada diversidade observada entre corredores (Rodero et al., 2023).

Apesar do crescente interesse na aplicação de gêmeos digitais no esporte, grande parte das investigações ainda se concentra em estudos conceituais ou em modelos experimentais com amostras restritas, o que limita a compreensão da real variabilidade existente em populações amplas de corredores (Paixão & Agostini, 2025). A análise de grandes bases de dados provenientes de eventos esportivos representa, portanto, uma oportunidade relevante para investigar a heterogeneidade interindividual em contextos reais, fornecendo subsídios para a discussão sobre os requisitos mínimos e os limites metodológicos da construção de gêmeos digitais no esporte (Chomienne et al., 2024).

Dessa forma, torna-se pertinente investigar a variabilidade presente em populações de corredores a partir de dados secundários de eventos de corrida de rua, como estratégia para fundamentar a necessidade de abordagens personalizadas na modelagem de gêmeos digitais. Ao analisar características demográficas e escolhas de prova em uma amostra numerosa de participantes, é possível evidenciar que corredores aparentemente semelhantes podem apresentar perfis distintos, reforçando a ideia de que representações médias são insuficientes para capturar a complexidade do sistema humano. Assim, a presente pesquisa se justifica pela necessidade de contribuir para o avanço conceitual e metodológico da aplicação de gêmeos digitais na corrida de rua, demonstrando que a elevada variabilidade interindividual observada em contextos reais impõe desafios significativos à construção de modelos genéricos e reforça a importância de abordagens individualizadas (Rodero et al., 2024; Chomienne et al., 2024, 2025).

Considerou-se a hipótese de que a população de corredores apresenta alta variabilidade de características e escolhas de prova, tornando inadequada a modelagem de um “gêmeo digital médio”, e reforçando a necessidade de modelos personalizados.

O presente estudo teve como objetivo analisar a variabilidade interindividual em corredores de uma prova de rua, utilizando dados secundários como base para discutir a necessidade de gêmeos digitais individualizados no contexto esportivo.

2. Metodologia

Tipo da Pesquisa

Trata-se de um estudo observacional, quantitativo, de caráter retrospectivo, realizado por meio de análise secundária de dados advindos de uma prova oficial de corrida de rua, num estudo de natureza quantitativa (Pereira et al., 2018; Risemberg et al., 2026) e com uso de estatística descritiva simples com gráfico de setores, gráfico de colunas, gráfico de linhas, Classe de dados (por sexo, faixa etária etc), valores de frequência absoluta em quantidade e, frequência relativa porcentual (Shitsuka et al, 2014).

Fonte de dados

Os dados analisados foram obtidos a partir da base de dados oficial da prova Redepharma Run 2025, realizada na cidade de Campina Grande, Paraíba, no dia 19 de outubro de 2025. A base de dados contempla informações agregadas referentes a 7.096 atletas inscritos e participantes, disponibilizadas de forma pública e anonimizada pelos organizadores do

evento. As informações disponíveis para análise dessa pesquisa incluem: Sexo dos participantes, faixa etária, distância da prova disputada (3 km, 5 km, 10 km e 21 km), origem geográfica e estatísticas descritivas gerais da amostra.

Por se tratar de dados secundários, públicos e agregados, não foi possível o acesso a informações individualizadas como tempo exato de prova, ritmo médio ou variáveis biomecânicas e fisiológicas.

População e Amostra

A população para construção desse estudo foi composta por todos os atletas participantes da prova Redepharma Run 2025, totalizando 7.096 corredores, sendo 3.866 do sexo feminino e 3.230 do sexo masculino.

Não foi realizada amostragem, uma vez que a análise contemplou o universo total de participantes disponíveis no banco de dados, caracterizando-se como uma amostra censitária.

Crítérios de Inclusão e Exclusão

Foram incluídos na pesquisa todos os corredores que participaram da corrida Redepharma Run. Por se tratar de uma amostra censitária onde o objetivo é analisar todos os participantes da prova sem distinção e observar as características dos mesmos não tivemos critérios de exclusão para a amostra populacional do estudo.

Variáveis do estudo

As variáveis analisadas foram organizadas em três categorias principais:

Variáveis sociodemográficas

Para as variáveis demográficas foram utilizadas as seguintes categorias: sexo (masculino e feminino), faixa etária (estas foram classificadas em categorias pela organização do evento) e origem geográfica dos participantes da prova.

Variáveis divisional da prova

A prova foi subdividida em distâncias onde os participantes por livre escolha fizeram suas respectivas inscrições. Na ocasião a prova foi dividida nas distâncias de 3, 5, 10 e 21 quilômetros.

Variáveis conceituais relacionadas ao gêmeo digital

Embora o banco de dados não contenha informações biomecânicas ou fisiológicas diretas, as variáveis demográficas e de escolha de prova foram utilizadas como indicadores indiretos de heterogeneidade interindividual, servindo de base para a discussão conceitual sobre as camadas mínimas necessárias para a construção de um gêmeo digital em corredores.

Enquadramento metodológico do gêmeo digital

Os dados analisados neste estudo foram utilizados como camada inicial de caracterização populacional, correspondendo às etapas preliminares de modelagem de um gêmeo digital humano, conforme descrito na literatura.

A elevada variabilidade observada nas características demográficas e na escolha das distâncias de prova foi interpretada como evidência indireta de que modelos genéricos ou baseados em médias populacionais seriam insuficientes para representar adequadamente corredores individuais, reforçando a necessidade de abordagens personalizadas na construção de gêmeos digitais aplicados ao esporte.

Aspectos Éticos

O presente estudo utilizou exclusivamente dados secundários, públicos, agregados e anonimizados, não havendo acesso a informações que permitissem a identificação individual dos participantes. Dessa forma, de acordo com as diretrizes da Resolução nº 510/2016 do Conselho Nacional de Saúde, pesquisas que utilizam dados públicos e sem identificação individual dispensam submissão ao Comitê de Ética em Pesquisa. Ainda assim, foram respeitados todos os princípios éticos relacionados à confidencialidade, à integridade científica e ao uso responsável das informações.

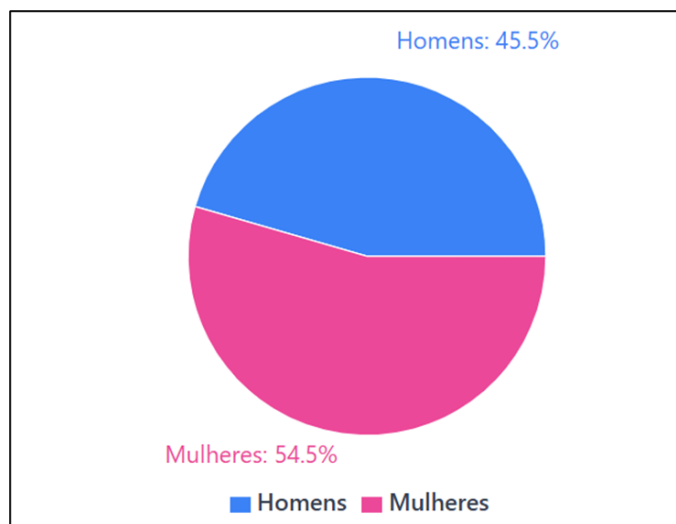
Ainda, fizemos a assinatura do termo junto a instituição responsável pelo evento buscando deixar esclarecido que os dados utilizados na pesquisa só seriam utilizados para fins acadêmicos.

3. Resultados e Discussão

Alinhado ao tema desta pesquisa, os resultados a seguir apresentam uma análise descritiva de dados secundários de corredores de rua, com o objetivo de analisar a variabilidade interindividual existente na prática da corrida. A discussão dos resultados encontrados busca relacionar essa variação aos desafios envolvidos na modelagem de gêmeos digitais no esporte, destacando a necessidade de abordagens analíticas mais individualizadas.

O Gráfico 1 apresenta a distribuição dos corredores que participaram da prova segundo o sexo. Observa-se um leve predomínio do sexo feminino entre os inscritos na competição, embora a participação do público masculino também represente uma parcela significativa da amostra.

Gráfico 1 - Proporção por sexo dos dados analisados.



Fonte: Elaborado pelos Autores (2026).

A predominância do sexo feminino observada no Gráfico 1 está de acordo com evidências recentes que apontam um crescimento da participação feminina em eventos de corrida de rua ao longo das últimas décadas (Lepers & Cattagni, 2018; Tiller et al., 2021). Estudos de base populacional demonstram que, especialmente em provas de curta e média distância, a presença feminina tem se aproximado ou mesmo superado a masculina, refletindo mudanças no perfil demográfico dos participantes (Hunter et al., 2024).

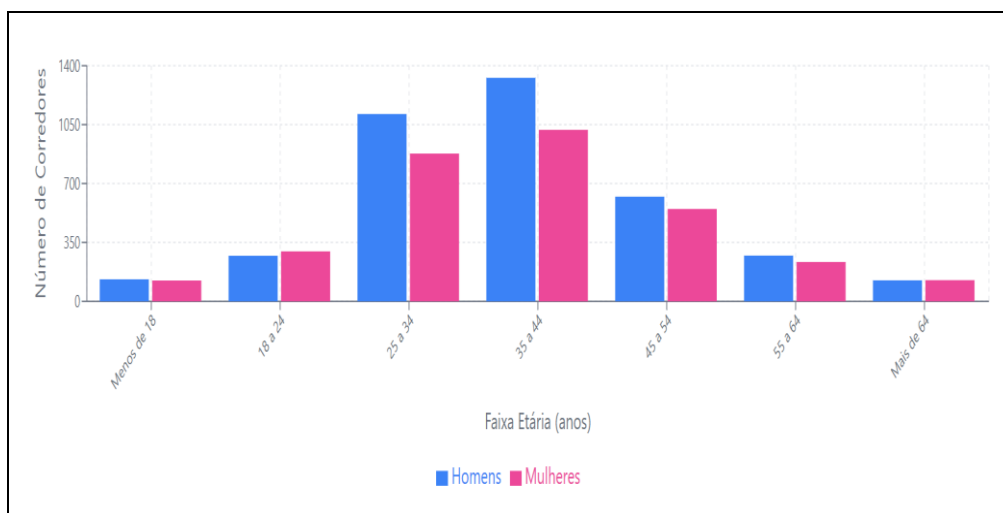
Esse aumento da participação feminina na corrida de rua tem sido associado, segundo a literatura, a fatores socioculturais, maior incentivo à prática de atividade física, políticas públicas de promoção da saúde e ampliação do acesso das

mulheres ao esporte recreacional e competitivo (Hunter et al., 2024; Lepers & Cattagni, 2018). Do ponto de vista do desempenho esportivo, segundo Gordon et al. (2017), diferenças fisiológicas e biomecânicas médias entre homens e mulheres, como composição corporal, capacidade aeróbia e desempenho, exercem influência sobre o rendimento em provas de endurance. De forma complementar, Braschler et al. (2025) destacam que essas diferenças médias podem ser observadas em análises populacionais de maratonistas, especialmente quando se avaliam parâmetros fisiológicos e mecânicos associados ao desempenho. No entanto, Van Hooren et al. (2024) ressaltam que a relação entre biomecânica e performance na corrida apresenta elevada variabilidade interindividual, o que faz com que tais diferenças não se manifestem de maneira uniforme dentro de cada grupo sexual. Além disso, análises observacionais em grandes amostras de corredores demonstram considerável sobreposição de desempenho entre homens e mulheres, indicando que classificações baseadas exclusivamente no sexo biológico são limitadas para explicar o comportamento individual biomecânico do corredor (Gamez-Paya et al., 2023; Gordon et al., 2017). Pesquisas que analisaram grandes bancos de dados de eventos de corrida demonstram uma sobreposição significativa de tempos de prova entre homens e mulheres, evidenciando que classificações baseadas exclusivamente no sexo biológico são insuficientes para explicar o comportamento do desempenho individual (Lepers & Cattagni, 2018; Hliš; Fister & Fister Jr., 2024). Esse padrão reforça a necessidade de cautela na interpretação de resultados populacionais e no uso de modelos simplificados para a construção de gêmeo digital.

Nesse contexto, os achados apresentados no Gráfico 1 estão alinhados a literatura que questiona a utilização de modelos generalistas na análise do desempenho esportivo e na modelagem do comportamento do corredor (Hunter et al., 2024; Gordon et al., 2017). Estudos recentes sobre modelagem individualizada no esporte defendem que a elevada variabilidade entre indivíduos exige abordagens capazes de integrar múltiplas dimensões do atleta, o que sustenta a proposta de utilização de gêmeos digitais como ferramenta para representar a complexidade do sistema humano na corrida de rua (Hunter et al., 2024).

O Gráfico 2 apresenta a distribuição dos corredores por faixa etária, evidenciando uma ampla dispersão dos participantes ao longo das diferentes décadas de vida, com maior concentração nas faixas etárias adultas, especialmente entre 25 e 44 anos, para ambos os sexos. Essa distribuição etária é compatível com o perfil observado em eventos de corrida de rua em diferentes contextos geográficos, nos quais a maior adesão ocorre entre adultos jovens e de meia idade, fase associada a maior estabilidade ocupacional, autonomia financeira e maior engajamento em práticas esportivas (Silva et al., 2015; Legnani et al., 2011).

Gráfico 2 - Distribuição por faixa etária dos corredores, organizada por categoria em faixas de idade.



Fonte: Elaborado pelos Autores (2026).

Segundo Legnani et al. (2011), a predominância de corredores nas faixas etárias adultas está relacionada não apenas a fatores fisiológicos, mas também a aspectos psicossociais, como a busca por qualidade de vida, controle do estresse e lazer. De forma complementar, Silva et al. (2015) destaca que a corrida de rua se consolidou como uma prática esportiva acessível e flexível, favorecendo a adesão contínua de indivíduos em diferentes fases da vida adulta, o que ajuda a explicar a concentração observada nas faixas entre 25 e 44 anos na amostra analisada.

Apesar da predominância de adultos jovens, os dados obtidos demonstram participação expressiva de corredores em faixas etárias mais avançadas, incluindo indivíduos acima de 45, 55 e até mais de 64 anos. Esse achado está de acordo com estudos que apontam a manutenção da prática da corrida ao longo do envelhecimento, desde que haja adaptações progressivas de volume, intensidade e recuperação (Braschler et al., 2025). Segundo esses mesmos autores, o envelhecimento cronológico não constitui, por si só, um fator limitante absoluto para a participação em provas de endurance, sendo o desempenho e a tolerância ao esforço fortemente modulados por histórico de treinamento, condições de saúde, estratégias de recuperação e acompanhamento médico para avaliar o risco de estresse no organismo como por exemplo as avaliações cardiológicas que avaliam o comportamento do coração a estímulos de alto estresse.

Do ponto de vista fisiológico e biomecânico, a literatura descreve alterações relacionadas ao envelhecimento que podem influenciar o desempenho na corrida, como reduções graduais da capacidade aeróbia, força muscular e elasticidade tendínea (Hliš; Fister & Fister Jr., 2024). No entanto, Van Hooren et al. (2024) ressaltam que a relação entre idade, biomecânica e performance na corrida apresenta elevada variabilidade entre os indivíduos, o que explica a presença de corredores mais velhos mantendo níveis funcionais elevados e participação ativa em eventos competitivos, conforme observado no Gráfico 2.

Essa variação na faixa etária observada na amostra reforça a limitação de abordagens que utilizam a idade cronológica como único parâmetro para caracterizar corredores. Estudos sobre treinamento e desempenho em atletas recreacionais indicam que indivíduos da mesma faixa etária podem apresentar respostas fisiológicas e biomecânicas diferentes ao treinamento e à competição (Prieto-González & Sedláček, 2022; Hliš; Fister & Fister Jr., 2024). Dessa forma, a simples categorização por idade é insuficiente para representar adequadamente o comportamento individual do corredor.

Nesse contexto, os resultados apresentados no Gráfico 2 sustentam a necessidade de modelos mais individualizados para a análise do desempenho, biomecânica e do risco de lesão em corredores de rua. A ampla variação na faixa etária, associada à diversidade de respostas fisiológicas e biomecânicas descritas na literatura, reforça a proposta de utilização de gêmeos digitais como ferramenta capaz de integrar múltiplas dimensões do atleta, indo além de classificações demográficas tradicionais, como sexo e idade cronológica (Hliš; Fister & Fister Jr, 2024; Katsoulakis et al., 2024).

De forma integrada, os resultados apresentados nos Gráficos 1 e 2 evidenciam que a participação em provas de corrida de rua ocorre de maneira heterogênea tanto entre os sexos quanto entre as diferentes faixas etárias, conformes achados prévios da literatura. Segundo Cejka et al. (2014), a corrida de rua caracteriza-se por ampla diversidade demográfica, com predomínio de adultos jovens e de meia idade, mas com presença significativa de praticantes em faixas etárias mais avançadas.

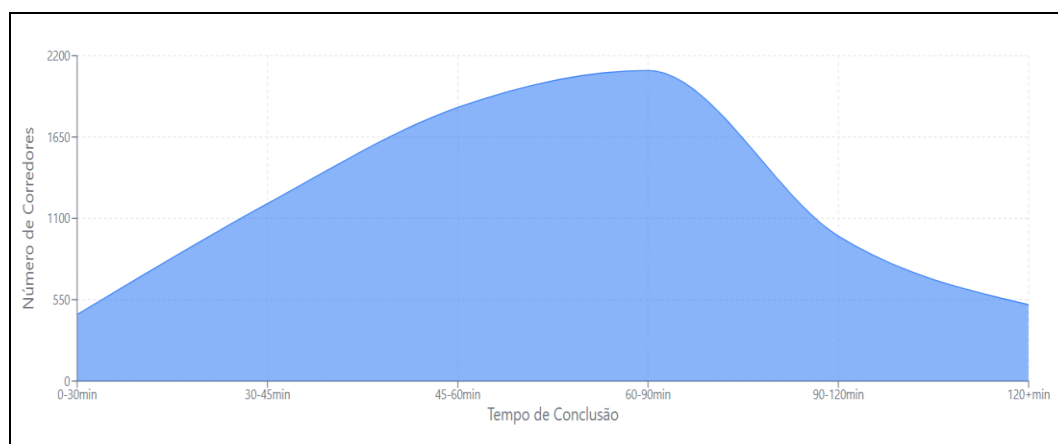
Do ponto de vista do sexo biológico, estudos indicam que diferenças médias fisiológicas e biomecânicas entre homens e mulheres, como composição corporal, capacidade aeróbia máxima e performance na corrida, podem influenciar o desempenho esportivo em provas de endurance (Hanley, 2021). No entanto, conforme destacado por Prieto-González e Sedláček (2022), tais diferenças não se manifestam de forma homogênea dentro de cada grupo, sendo observada ampla variabilidade entre corredores do mesmo sexo, o que contribui para a sobreposição de desempenhos e padrões de participação.

Em relação à idade, Van Hooren et al. (2024) apontam que o envelhecimento cronológico está associado a alterações progressivas na biomecânica e na performance da corrida, entretanto, esses fatores não atuam como barreiras absolutas à prática esportiva. Segundo Braschler et al. (2025), corredores master mantêm níveis relevantes de participação em provas de

endurance, especialmente quando adotam estratégias adequadas de treinamento e recuperação. Dessa forma, os dados do presente estudo reforçam a ideia de que a corrida de rua é uma modalidade acessível ao longo do ciclo de vida, sendo influenciada por fatores multifatoriais que envolvem aspectos fisiológicos, biomecânicos e motivacionais (Silva et al., 2015; Legnani et al., 2011).

O Gráfico 3 apresenta os tempos de conclusão da prova para o conjunto total de corredores. Observa-se uma distribuição assimétrica, com grande amplitude entre os menores e maiores tempos registrados. Essa dispersão indica a coexistência de diferentes níveis de desempenho dentro do mesmo evento, desde corredores mais rápidos até aqueles com tempos consideravelmente mais lento, evidenciando a diversidade funcional da amostra analisada.

Gráfico 3 - Tempos de conclusão da prova para o conjunto total de corredores.



Fonte: Elaborado pelos Autores (2026).

Conforme apresentado no Gráfico 3, observa-se que os tempos de conclusão da prova não se distribuem de forma homogênea entre os corredores analisados, caracterizando uma distribuição assimétrica, com maior concentração nas faixas de 45–60 minutos e 60–90 minutos. Esses intervalos concentram o maior número de participantes, indicando que a maior parte da amostra concluiu a prova em tempos intermediários, enquanto os extremos, abaixo de 30 minutos e acima de 120 minutos apresentaram menor frequência. Esse comportamento sugere a coexistência de diferentes níveis de desempenho dentro do mesmo evento, aspecto comum em provas de corrida de rua com ampla participação recreacional.

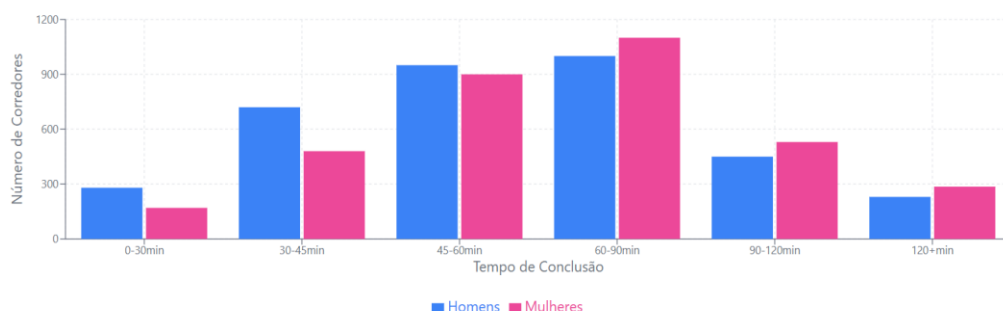
A literatura está de acordo com esse padrão ao indicar que eventos de endurance abertos tendem a reunir corredores com distintos perfis fisiológicos, históricos de treinamento e objetivos esportivos, o que se reflete diretamente na amplitude dos tempos finais de prova. Segundo Hliš; Fister e Fister Jr (2024), a variabilidade nos tempos de conclusão está associada, entre outros fatores, à performance na corrida, ao volume semanal de treinamento e à experiência prévia em competições. De forma complementar, Cejka et al. (2014) apontam que idade, sexo e estratégias de ritmo (pacing) exercem influência significativa sobre o tempo total de prova, contribuindo para distribuições assimétricas semelhantes às observadas no Gráfico 3.

Adicionalmente, a presença de um contingente expressivo de corredores nas faixas de tempo mais longas não deve ser interpretada exclusivamente como indicativo de baixo desempenho, mas como reflexo da diversidade funcional da amostra. Estudos destacam que, em corridas de rua, parte significativa dos participantes possui motivações relacionadas à saúde, lazer e superação pessoal, e não necessariamente ao rendimento competitivo máximo, o que se traduz em maior dispersão dos tempos de chegada (Willy & Paquette, 2019; Silva et al., 2015).

O Gráfico 4 mostra a distribuição dos tempos de prova classificado por sexo. O gráfico revela diferenças gerais entre homens e mulheres, porém também evidencia uma sobreposição relevante entre os grupos. Essa sobreposição indica que, apesar das tendências médias distintas, há corredores de ambos os sexos apresentando desempenhos semelhantes, reforçando a

ideia de que o sexo, isoladamente, não explica a totalidade da variabilidade observada nos tempos de conclusão.

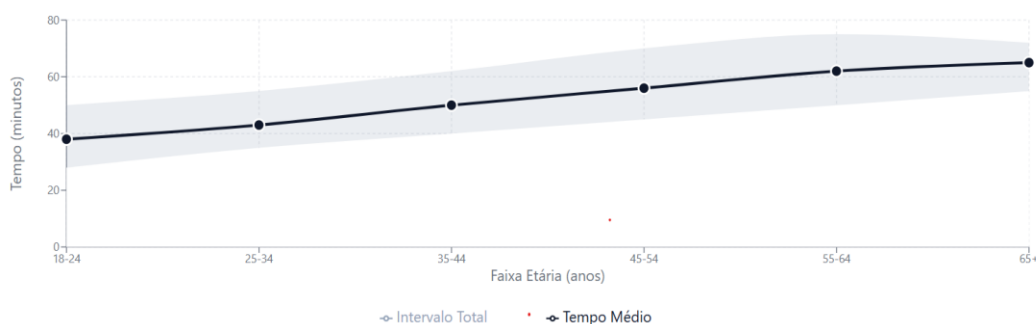
Gráfico 4 - Distribuição dos tempos de prova classificado por sexo.



Fonte: Elaborado pelos Autores (2026).

Conforme vimos anteriormente, o Gráfico 4 apresenta a distribuição dos tempos de conclusão da prova estratificada por sexo, evidenciando diferenças gerais entre homens e mulheres, sobretudo nas faixas intermediárias e mais rápidas de tempo, onde observa-se maior concentração de homens. Ainda assim, o gráfico revela uma expressiva sobreposição entre os grupos, especialmente nos intervalos de 45/60 min, 60/90 min e 90/120 min, indicando que corredores de ambos os sexos alcançam desempenhos semelhantes. Esses achados sugerem que, embora diferenças fisiológicas médias entre homens e mulheres como composição corporal, capacidade aeróbia e economia de corrida possam influenciar o rendimento em provas de endurance, tais diferenças não se manifestam de forma homogênea dentro de cada grupo sexual (Willy & Paquette, 2019; Hliš; Fister & Fister Jr., 2024). Estudos prévios demonstram que a variabilidade entre os indivíduos intra sexo frequentemente supera as diferenças médias entre sexos, reforçando que o sexo, isoladamente, é insuficiente para explicar a complexidade do desempenho em corrida de rua (Cejka et al., 2014; Nikolaidis & Knechtle, 2017). Nesse sentido, a ampla sobreposição observada no Gráfico 4 concorda com a literatura ao evidenciar que fatores individuais relacionados ao treinamento, histórico esportivo, biomecânica e estratégias de prova exercem papel determinante no tempo final, independentemente do sexo biológico (Vilela Junior et al., 2023; Van Hooren et al., 2024). Do ponto de vista da modelagem de gêmeos digitais no esporte, esses resultados reforçam a limitação de modelos baseados em classificações binárias ou médias populacionais, indicando a necessidade de abordagens personalizadas capazes de incorporar a elevada variabilidade entre os indivíduos observada entre corredores de rua.

Gráfico 5 - Relação entre idade e tempo de conclusão da prova.



Fonte: Elaborado pelos Autores (2026).

Os resultados apresentados no Gráfico 5 indicam que, embora haja um aumento progressivo do tempo médio de conclusão da prova com o avanço da idade, essa relação é caracterizada por grande variabilidade entre os grupos, o que limita a interpretação da idade cronológica como determinante isolado do desempenho em corrida de rua. Esse achado é consistente

com evidências prévias que demonstram que o declínio do desempenho associado à idade não ocorre de maneira uniforme e é fortemente modulada por fatores como volume de treinamento, experiência esportiva e adaptações neuromusculares acumuladas ao longo do tempo (Tanaka & Seals, 2008; Leyk et al., 2017).

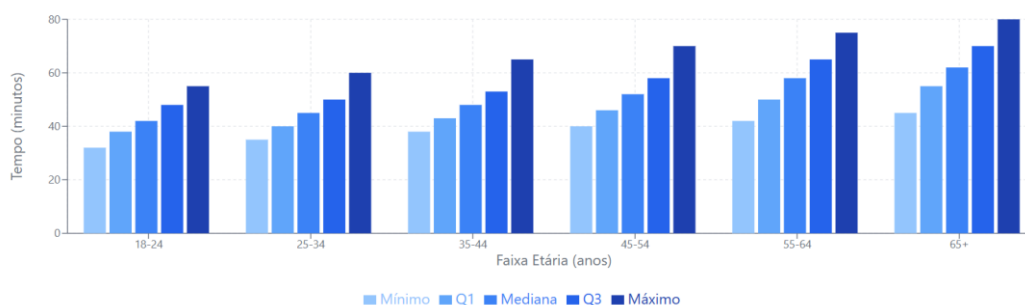
Estudos longitudinais e transversais mostram que corredores master podem manter níveis elevados de desempenho por décadas quando o treinamento é sistemático, sugerindo que a idade exerce efeito indireto, mediado principalmente por alterações na capacidade aeróbia máxima, performance na corrida e tolerância à carga mecânica (Ransdell; Vener & Huberty, 2009; Cejka et al., 2014). Essa interpretação ajuda a explicar a sobreposição de tempos observada entre diferentes faixas etárias no presente conjunto de dados, especialmente entre corredores mais velhos e adultos jovens.

Além disso, a fraca relação linear entre idade e tempo de conclusão observada neste estudo converge com achados recentes que apontam limitações nos modelos tradicionais de predição de desempenho baseados exclusivamente em variáveis demográficas. Abordagens mais recentes propõem a incorporação de parâmetros biomecânicos, dados funcionais e histórico individual de carga para melhor caracterizar o desempenho e o risco associado à prática da corrida (Willy & Paquette, 2019; Van der Worp et al., 2016).

Nesse contexto, a heterogeneidade identificada no Gráfico 5 reforça a relevância de modelos personalizados de análise, como aqueles baseados em modelagem biomecânica individualizada e gêmeos digitais, que permitem integrar idade, características morfológicas, padrões de movimento e respostas à carga mecânica de forma dinâmica (Wang; Hu & Wu, 2023; Xiang et al., 2025). Assim, os resultados sustentam a ideia de que a idade deve ser interpretada como um marcador contextual, e não como um preditor primário do desempenho em corredores recreacionais e competitivos.

O Gráfico 6 apresenta a distribuição dos tempos de conclusão da prova segundo faixas etárias, considerando valores mínimos, quartis, mediana e máximos. Observa-se que, embora haja um deslocamento progressivo das medianas e dos valores máximos em direção a tempos mais elevados com o avanço da idade, a amplitude dos intervalos intragrupo permanece elevada em todas as faixas etárias analisadas. Esse comportamento mostra que corredores pertencentes à mesma categoria etária podem apresentar desempenhos substancialmente distintos, reforçando a presença de acentuada variabilidade entre os indivíduos mesmo entre indivíduos cronologicamente semelhantes.

Gráfico 6 - Distribuição dos tempos de prova dentro de faixas etárias específicas.



Fonte: Elaborado pelos Autores (2026).

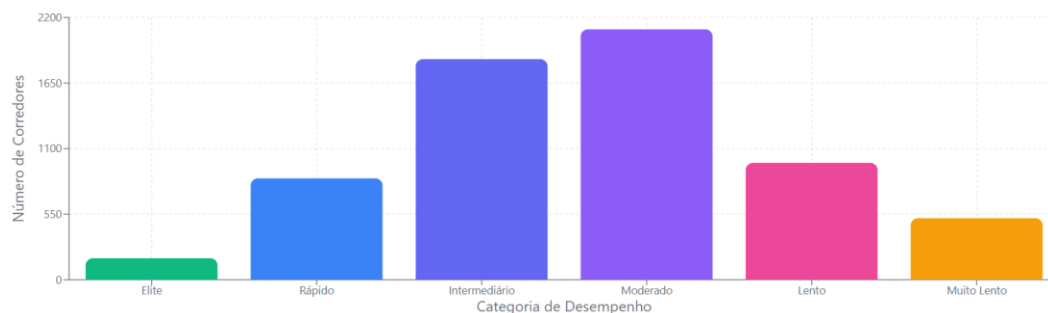
Do ponto de vista analítico, a sobreposição dos intervalos interquartis e a coexistência de tempos mínimos relativamente baixos em faixas etárias mais avançadas indicam que a idade cronológica, isoladamente, possui capacidade limitada para explicar o desempenho em provas de endurance. Esses achados estão de acordo com estudos que demonstram que fatores como históricos de treinamento, economia de corrida, eficiência biomecânica e adaptação neuromuscular exercem papel determinante no rendimento, frequentemente atenuando os efeitos fisiológicos do envelhecimento (Tanaka & Seals, 2008; Nikolaidis & Knechtle, 2017).

Nesse sentido, os dados apresentados no Gráfico 6 estão de acordo com evidências prévias de que análises baseadas exclusivamente em categorias etárias tendem a mascarar diferenças funcionais relevantes entre atletas, reduzindo a sensibilidade de modelos explicativos baseados em médias populacionais (Leyk et al., 2007; Hunter et al., 2024). Tal limitação torna-se particularmente relevante quando o objetivo é compreender padrões individuais de desempenho e risco associados à corrida de rua.

Assim, a elevada dispersão observada dentro de cada faixa etária reforça diretamente o objetivo central desta dissertação, ao demonstrar a necessidade de abordagens analíticas que incorporem múltiplas dimensões individuais de forma integrada. A modelagem de gêmeos digitais surge, nesse contexto, como uma estratégia promissora para representar a singularidade funcional de cada corredor, superando classificações rígidas baseadas apenas em idade cronológica e possibilitando análises mais precisas do desempenho esportivo.

Os resultados apresentados nos Gráficos 3 a 6 evidenciam, de forma consistente, elevada variabilidade interindividual no desempenho de corredores de rua, mesmo quando considerados fatores tradicionalmente utilizados para estratificação, como sexo e faixa etária. A ampla sobreposição dos tempos de prova entre grupos e a elevada dispersão intragrupo indicam que modelos baseados exclusivamente em classificações demográficas ou médias populacionais são insuficientes para representar a complexidade do desempenho em provas de endurance. Nesse contexto, tais achados fornecem o suporte necessário para a adoção de abordagens individualizadas de análise, destacando a modelagem de gêmeos digitais como uma estratégia promissora para integrar múltiplas dimensões funcionais, biomecânicas e fisiológicas na representação do corredor de rua.

Gráfico 7 - Distribuição dos corredores por categorias de desempenho, definidas a partir de intervalos de tempo de conclusão da prova.



Fonte: Elaborado pelos Autores (2026).

O Gráfico 7 demonstra que a distribuição dos corredores por categorias de desempenho ocorre de maneira progressiva e contínua, sem a formação de agrupamentos claramente homogêneos. Segundo Cejka et al. (2014), o desempenho em provas de endurance tende a se organizar por capacidades fisiológicas e funcionais, e não em classes discretas, o que explica a elevada concentração de indivíduos nas categorias intermediária e moderada observada no presente estudo.

Esse comportamento distribucional está em consonância com os achados apresentados anteriormente nos Gráficos 3, 4, 5 e 6, nos quais a variabilidade entre os indivíduos permaneceu elevada mesmo após estratificações por sexo e faixa etária. Estudos prévios indicam que classificações baseadas apenas em tempo final ou em categorias amplas tendem a mascarar diferenças relevantes nos perfis biomecânicos, metabólicos e adaptativos dos corredores (Nikolaidis & Knechtle, 2017; Hunter et al., 2024).

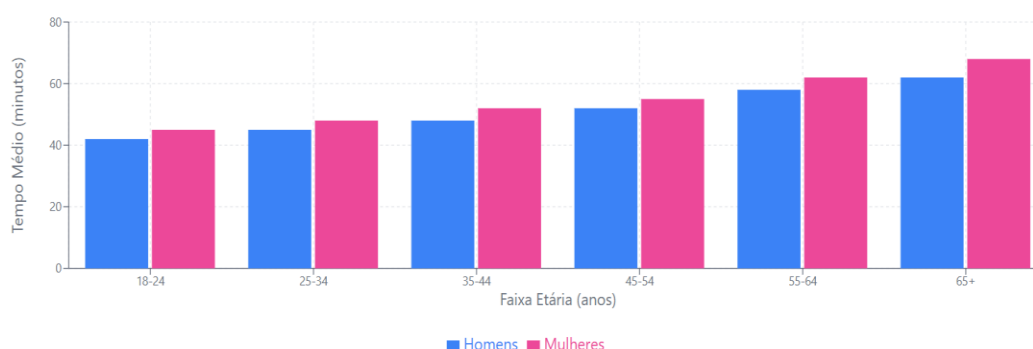
Do ponto de vista metodológico, embora a categorização por desempenho seja amplamente utilizada em análises

epidemiológicas e organizacionais de eventos esportivos, sua capacidade explicativa é limitada quando o objetivo é compreender o comportamento individual do atleta. Conforme destacado por Leyk et al. (2007), indivíduos pertencentes a uma mesma categoria de desempenho podem apresentar estratégias de corrida, respostas à carga de treino e riscos de lesão substancialmente distintos, o que reduz a validade de inferências baseadas exclusivamente nesse tipo de classificação.

Nesse contexto, os resultados apresentados no Gráfico 7 reforçam a pertinência da abordagem de gêmeos digitais aplicada ao esporte. De acordo com Hliš, Fister e Fister Jr. (2024), os gêmeos digitais permitem representar o atleta como um sistema dinâmico individualizado, integrando dados de desempenho, biomecânica e histórico de exposição ao treino, superando as limitações de modelos populacionais baseados em médias. A distribuição contínua observada neste estudo sustenta a necessidade de modelos capazes de captar nuances individuais ao longo do desempenho, em vez de assumir fronteiras artificiais entre categorias.

Portanto, o Gráfico 7 contribui diretamente para o objetivo central desta dissertação ao evidenciar que a população de corredores de rua apresenta elevada heterogeneidade funcional, incompatível com sistemas classificatórios estáticos. Esses achados estão de acordo com a literatura recente que aponta os gêmeos digitais como uma ferramenta promissora para a modelagem personalizada no esporte, com potencial para aprimorar a previsão de desempenho, o monitoramento adaptativo e a tomada de decisão individualizada (Kumar et al., 2023; Wang; Hu & Wu, 2023).

Gráfico 8 - Comparação dos tempos de prova entre diferentes categorias etárias e sexos.



Fonte: Elaborado pelos Autores (2026).

o Gráfico 8 sintetiza de forma integrada os efeitos combinados de idade e sexo sobre o tempo médio de conclusão da prova, evidenciando um padrão de aumento progressivo do tempo com o avanço etário em ambos os sexos, acompanhado por diferenças médias consistentes entre homens e mulheres. Segundo Hunter et al. (2024), diferenças fisiológicas relacionadas à capacidade aeróbia, composição corporal e performance na corrida tendem a se refletir em desempenhos médios distintos entre os sexos, o que é compatível com o deslocamento vertical observado entre as curvas masculinas e femininas neste gráfico.

Entretanto, apesar dessas tendências gerais, a análise conjunta do gráfico 8 com os Gráficos 3, 4, 5 e 6 revela que tais diferenças médias coexistem com elevada variabilidade intra e intergrupos. Conforme destacado por Cejka et al. (2014), o envelhecimento cronológico exerce influência progressiva sobre o desempenho em provas de endurance, mas sua magnitude é modulada por fatores individuais como histórico de treinamento, estratégias de pacing e adaptações neuromusculares, o que explica a sobreposição parcial dos tempos médios entre faixas etárias adjacentes.

Do ponto de vista analítico, o Gráfico 8 evidencia uma limitação fundamental de modelos explicativos baseados exclusivamente em estratificações demográficas. De acordo com Nikolaidis e Knechtle, (2017) análises centradas apenas em idade e sexo tendem a capturar tendências populacionais, mas falham em explicar a heterogeneidade funcional observada entre indivíduos pertencentes à mesma categoria. Esse comportamento é claramente observado no presente estudo, no qual

corredores de mesma faixa etária e sexo apresentam desempenhos médios semelhantes, mas distribuições amplamente dispersas em termos individuais.

Nesse contexto, os achados do Gráfico 8 reforçam diretamente a proposta central desta dissertação ao demonstrar que variáveis demográficas tradicionais são insuficientes para representar a complexidade do desempenho em corredores de rua. Conforme discutido por Kumar et al. (2023) e Hliš; Fister e Fister Jr. (2024), a abordagem de gêmeos digitais permite integrar múltiplas camadas de informação individual incluindo dados biomecânicos, fisiológicos e históricos, possibilitando a construção de modelos dinâmicos capazes de representar trajetórias de desempenho personalizadas ao longo do tempo.

Esses resultados sustentam a necessidade de modelos computacionais individualizados, como os gêmeos digitais, como base metodológica para futuras aplicações em monitoramento, previsão de desempenho e prevenção de lesões no contexto do esporte de endurance.

4. Conclusão

Este estudo analisou a variabilidade interindividual em corredores de rua a partir de dados secundários de desempenho, com o objetivo de avaliar a adequação de modelos tradicionais de classificação e fornecer subsídios para a modelagem de gêmeos digitais no esporte. Os resultados demonstraram ampla dispersão dos tempos de conclusão da prova, evidenciando a coexistência de diferentes níveis de desempenho dentro de uma mesma população de corredores.

As análises por sexo indicaram diferenças médias nos tempos de prova, contudo com significativa sobreposição entre os grupos, mostrando que o sexo, de forma isolada, não explica a variabilidade observada no desempenho. De maneira semelhante, a relação entre idade e tempo de conclusão apresentou apenas uma tendência geral, acompanhada por grande dispersão dos dados em todas as faixas etárias, indicando que o envelhecimento cronológico possui influência limitada sobre o rendimento individual.

A variabilidade entre os grupos identificada tanto nas análises por faixa etária quanto nas categorias de desempenho reforça que corredores classificados em grupos semelhantes podem apresentar perfis funcionais distintos. Esses achados evidenciam as limitações de abordagens baseadas exclusivamente em variáveis demográficas e classificatórias para a compreensão do desempenho em corrida de rua.

Diante disso, os resultados sustentam a necessidade de modelos individualizados capazes de representar a complexidade do comportamento funcional dos corredores. Nesse contexto, a modelagem por gêmeos digitais apresenta-se como uma abordagem promissora, ao permitir a integração de múltiplas variáveis e a representação dinâmica do desempenho individual. Assim, a variabilidade entre os corredores observada nesta pesquisa constitui um elemento central para o desenvolvimento e a aplicação de gêmeos digitais no esporte.

Referências

- Agostini, G. G. & Paixão, R. C. da. (2025). Tecnologias wearables no contexto da corrida de endurance. Lagoa Santa: Atena Editora. <https://educapes.capes.gov.br/handle/capes/1000494>.
- Anderson, L. M. et al. (2022). What is the effect of changing running step rate on injury, performance and biomechanics? A systematic review and meta-analysis. *Sports Medicine – Open*. 8(1), 112. DOI: 10.1186/s40798-022-00504-0. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/36057913/>.
- ATIVO. (2022). Corridas de rua em SP. Ativo. <https://www.ativo.com/corrida-de-rua/noticias/corridas-de-rua-em-sp/>.
- Braschler, L. et al. (2025). Physiology and pathophysiology of marathon running: a narrative review. *Sports Medicine – Open*. 11(1), 10. DOI: 10.1186/s40798-025-00810-3. <https://doi.org/10.1186/s40798-025-00810-3>.
- Barros Filho, M. A. et al. (2022). Motivos para a prática da corrida de rua e sua influência na satisfação com a vida. *Educación Física y Ciencia, Ensenada*. 24(2). DOI: 10.24215/23142561e215. <https://www.redalyc.org/journal/4399/439971020004/html/>.
- Cejka, N., Rüst, C. A., Lepers, R., Onywera, V., Rosemann, T. & Knechtle, B. (2014). Participation and performance trends in 100-km ultra-marathons worldwide. *Journal of Sports Sciences*. 32(4), 354–66. DOI: 10.1080/02640414.2013.825729. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24015856/>.

- Chomienne, L. et al. (2024). Virtual reality to characterize anticipation skills of top-level 4 x 100 m relay athletes. *European Journal of Sport Science*, Londres. 24(10), 1463–71. DOI: 10.1002/ejsc.12192. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/39256899/>.
- Correia, C. K. et al. (2024). Risk factors for running-related injuries: an umbrella systematic review. *Journal of Sport and Health Science*. 13(6), 793-804. DOI: 10.1016/j.jshs.2024.04.011. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/38697289/>.
- Diniz, P. et al. (2025). Digital twin systems for musculoskeletal applications: a current concepts review. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*. 33(5), 1892-910. DOI: 10.1002/ksa.12627. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/39989345/>.
- Fredette, A. et al. (2022). The association between running injuries and training parameters: a systematic review. *Journal of Athletic Training*. 57(7), 650-71. DOI: 10.4085/1062-6050-0195.21. <https://nata.kglmeridian.com/view/journals/attr/57/7/article-p650.xml>.
- Gamez-Paya, J. et al. (2023). Footstrike pattern and cadence of the marathon athletes at the Tokyo 2020 Olympic Games. *Applied Sciences*. 13(11), 6620. DOI: 10.3390/app13116620. <https://www.mdpi.com/2076-3417/13/11/6620>.
- Gordon, D., Wightman, S., Basevitch, I., Johnstone, J. A., Espejo-Sanchez, C., Beckford, C., Boal, M., Scruton, A., Ferrandino, M. & Merzbach, V. (2017). Physiological and training characteristics of recreational marathon runners. *Open Access Journal of Sports Medicine*. 8, 231–41. DOI: 10.2147/OAJSM.S141657. <https://doi.org/10.2147/OAJSM.S141657>.
- Gu, L. (2025). The application of smart wearable devices in the detection of sports energy consumption: a review. *Intelligent Sports and Health*. 1(2), 67-78. DOI: 10.1016/j.ish.2025.04.001. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S3050544525000167>.
- Hanley, B. (2021). The science and practice of middle and long distance running. London, UK: Routledge. p. 17–27. DOI: 10.4324/9781003088912-3. <https://eprints.leedsbeckett.ac.uk/id/eprint/7491/>.
- Heiderscheit, B. C. et al. (2011). Effects of step rate manipulation on joint mechanics during running. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, Philadelphia. 43(2), 296–302. DOI: 10.1249/MSS.0b013e3181ebdf4. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/20581720/>.
- He, Q. et al. (2024). From digital human modeling to human digital twin: framework and perspectives in human factors. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. 37, 9. DOI: 10.1186/s10033-024-00998-7. <https://cjme.springeropen.com/articles/10.1186/s10033-024-00998-7>.
- Hlis, T., Fister, I. & Fister Jr, R. I. (2024). Digital twins in sport: Concepts, taxonomies, challenges and practical potentials. *Expert Systems with Applications*. 258, 125104. DOI: 10.1016/j.eswa.2024.125104. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957417424019717>.
- Hunter, S. K. & Senfeld, J. W. (2024). Sex differences in human performance. *Journal of Physiology*. 602(17), 4129–56. DOI: 10.1113/JP284198. <https://doi.org/10.1113/JP284198>.
- Katsoulakis, E. et al. (2024). Digital twins for health: a scoping review. *Digital Medicine*. 7, 77. DOI: 10.1038/s41746-024-01073-0. <https://www.nature.com/articles/s41746-024-01073-0>.
- Kumar, S. et al. (2023). Digital twins for health: a scoping review. *Journal of Biomedical Informatics*, San Diego. 146, 104609. DOI: 10.1016/j.jbi.2023.104609. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1532046423001501>.
- Lepers, R. & Cattagni, T. (2018). Age-related decline in endurance running performance – an example of a multiple World records holder. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*. 43(1), 98–100. DOI: 10.1139/apnm-2017-0298. <https://doi.org/10.1139/apnm-2017-0298>
- Legnani, R. F. S. F. et al. (2011). Fatores motivacionais associados à prática de exercício físico em estudantes universitários. *Revista Brasileira de Ciências do Esporte*. 33(3), 761–72. DOI: 10.1590/S0101-32892011000300016. <https://www.scielo.br/j/rbce/a/NHFgLhxScKx36j6NBgk7wRx/?lang=pt>.
- Leyk, D., Erley, O., Ridder, D., Leurs, M., Rüther, T., Wunderlich, M., Sievert, A., Baum, K. & Essfeld, D. (2007). Age-related changes in marathon and half-marathon performances. *International Journal of Sports Medicine*. 28(5), 513–7. DOI: 10.1055/s-2006-924658. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/17600902/>.
- Llanos-Lagos, C. et al. (2024). Effect of strength training programs in middle- and long-distance runners' economy at different running speeds: a systematic review with meta-analysis. *Sports Medicine*, Londres. 54, 895–932. DOI: 10.1007/s40279-023-01978-y. <https://doi.org/10.1007/s40279-023-01978-y>.
- Nikolaidis, P. T. & Knechtle, B. (2017). Effect of age and performance on pacing of marathon runners. *Open Access Journal of Sports Medicine*. 8, 171–80. DOI: 10.2147/OAJSM.S141649. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28860876/>.
- Mantuano, F., Rodrigues, G. J. O. & Silva, J. G. S. (2025). Aplicação do BIM e dos gêmeos digitais na gestão do ciclo de vida de OAEs. *Revista de Geopolítica, São José dos Pinhais*. 16(4), e678. DOI: 10.56238/revgeov16n4-043. <https://revistageo.com.br/revista/article/view/678>.
- Migliaccio, G. M., Padulo, J. & Russo, L. The impact of wearable technologies on marginal gains in sports performance: an integrative overview on advances in sports, exercise, and health. *Applied Sciences*, v. 14, n. 15, p. 6649, 2024. DOI: 10.3390/app14156649. <https://www.mdpi.com/2076-3417/14/15/6649>.
- Musgjerd, T. et al. (2021). Effect of increasing running cadence on peak impact force in an outdoor environment. *International Journal of Sports Physical Therapy*. 16(4), 1076–83. DOI: 10.26603/001c.25166. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8329321/>.
- Pereira, A. S. et al. (2018). Metodologia da pesquisa científica. (Free ebook). Santa Maria. Editora da UFSM.
- Prieto-González, P. & Sedláček, J. (2022). Effects of running-specific strength training, endurance training, and concurrent training on recreational endurance athletes' performance and selected anthropometric parameters. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, Basel. 19(17), 10773. DOI: 10.3390/ijerph191710773. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/36078489/>.
- Ransdell, L. B., Vener, J. & Huberty, J. (2009). Masters athletes: an analysis of running, swimming and cycling performance by age and gender. *Journal of Exercise Science & Fitness*. 7(2) (Suppl), S61–S73. DOI: 10.1016/S1728-869X(09)60024-1. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1728869X09600241>.

- Risemberg, R. I. C. et al. (2026). A importância da metodologia científica no desenvolvimento de artigos científicos. *E-Acadêmica*. 7(1), e0171675. <https://eacademica.org/eacademica/article/view/675>.
- Rodero, C. et al. (2023). Advancing clinical translation of cardiac biomechanics models: a comprehensive review, applications and future pathways. *Frontiers in Physics*. 11, 13. DOI: 10.3389/fphy.2023.1306210. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/38500690/>.
- Silva, A. M. et al. (2015). Perfis motivacionais de corredores de rua com diferentes tempos de prática. *Revista Brasileira de Ciências do Esporte*. 37(1), 65–73. DOI: 10.1016/j.rbce.2013.08.001. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S010132891500013X>.
- Santos, I. F. et al. (2022). Efeito da corrida de rua na qualidade de vida: um estudo descritivo e exploratório. *Educación Física y Ciencia, Ensenada*. 24(3), e229. DOI: 10.24215/23142561e229. https://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2314-25612022000300229.
- Shitsuka, R. et al. (2014). *Matemática fundamental para tecnologia*. (2ed). Editora Érica.
- Stenerson, L. R. et al. (2023). Running-related overuse injuries and their relationship with run and resistance training characteristics in adult recreational runners: a cross-sectional study. *Journal of Functional Morphology and Kinesiology*. 8(3), 128. DOI: 10.3390/jfkm8030128. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/37754962/>.
- Tiller, N. B., Elliott-Sale, K. J., Knechtle, B., WILSON, P. B.; ROBERTS, J. D.; MILLET, G. Y.; et al. Do sex differences in physiology confer a female advantage in ultra-endurance sport? *Sports Medicine*, v. 51, n. 5, p. 895–915, 2021. DOI: 10.1007/s40279-020-01417-2. <https://escholarship.org/uc/item/5gt348gb>.
- Van Hooren, B. et al. (2024). The relationship between running biomechanics and running economy: a systematic review and meta-analysis of observational studies. *Sports Medicine, Londres*. 54(5), 1269–316. DOI: 10.1007/s40279-024-01997-3. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11127892/>.
- Van der Worp, M. P., DE WIJER, A.; VAN CINGEL, R.; VERBEEK, A. L. M.; NIJHUIS-VAN DER SANDEN, M. W. G.; STAAL, J. B. The 5- or 10-km Marikenloop Run: a prospective study of the etiology of running-related injuries in women. *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*, v. 46, n. 6, p. 462–470, 2016. DOI: 10.2519/jospt.2016.6402. <https://www.jospt.org/doi/10.2519/jospt.2016.6402>.
- Vilela Jr., G. B., Pereira, A. A., Dias, J. B. F., Fileni, C. H. P., Oliveira, H. F. R. et al. (2023). Biomecânica da corrida de longa distância. *Revista CP AQV – Centro de Pesquisas Avançadas em Qualidade de Vida*. 15(3), 1–14. DOI: 10.36692/V15n3-01R. <https://revista.cpaqv.org/index.php/CPAQV/article/view/1215>.
- Wang, M., Hu, H. & Wu, S. Opportunities and challenges of digital twin technology in healthcare. *Chinese Medical Journal*, v. 136, n. 23, p. 2895–2896, 2023. DOI: 10.1097/CM9.0000000000002896. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10686591/>.
- Walker, K., Phillips, N. & Sheeran, L. (2025). Exploring the use of digital technology for injury prevention and self-management among recreational runners. *Physical Therapy in Sport*. 71, 85–91. DOI: 10.1016/j.ptsp.2024.12.004. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1466853X24001317>.
- Willwacher, S. et al. (2022). Running-related biomechanical risk factors for overuse injuries in distance runners: a systematic review considering injury specificity and the potentials for future research. *Sports Medicine, Londres*. 52(8), 1863–77. DOI: 10.1007/s40279-022-01666-3. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35247202/>.
- Willy, R. W. & Paquette, M. R. (2019). The physiology and biomechanics of the Master runner. *Sports Medicine and Arthroscopy Review*. 27(1), 15–21. DOI: 10.1097/JSA.0000000000000212. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30601395/>.
- Xu, L., Wang, Y. & Wen, X. (2025). The role of footwear in improving running economy: a systematic review with meta-analysis of controlled trials. *Scientific Reports*. 15, 3963. DOI: 10.1038/s41598-025-88271-2. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11787295/>.
- Xiang, L. et al. (2025). Integrating personalized shape prediction, biomechanical modeling, and wearables for bone stress prediction in runners. *Digital Medicine*. 8, 276. DOI: 10.1038/s41746-025-01677-0. <https://www.nature.com/articles/s41746-025-01677-0>.
- Tanaka, H. & Seals, D. R. (2008). Endurance exercise performance in Masters athletes: age-associated changes and underlying physiological mechanisms. *Journal of Physiology*. 586(1), 55–63. DOI: 10.1113/jphysiol.2007.141879. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/17717011/>.