

Terapia Assistida por Jogos e Wearables: Inovação na Reabilitação do Pé

Game-Assisted Therapy and Wearables: Innovation in Foot Rehabilitation

Ana Grasielle Dionísio Corrêa¹

Daniel Rogério de Matos Jorge Ferreira²

Silvana Maria Blascovi de Assis³

Bruno da Silva Rodrigues⁴

Resumo

Jogos sérios têm proporcionado engajamento e eficácia na recuperação funcional. Este estudo apresenta o desenvolvimento e avaliação de um jogo sério criado para treinar os movimentos de dorsiflexão e flexão plantar. O jogo é controlado por uma sapatilha eletrônica (wearable), equipada com um acelerômetro e um microcontrolador Arduino. Um paciente com Pé Torto Congênito (PTC) participou de um programa de reabilitação de seis semanas, com sessões de 30 minutos de jogo. Os resultados mostraram melhorias na mobilidade articular de ambos os pés, com ganhos mais expressivos no direito, e no equilíbrio (testes KTK). Em conjunto, os dados indicam um aprimoramento global do controle motor, da mobilidade articular e da capacidade de equilíbrio. Esses achados indicam que a combinação de tecnologias vestíveis e jogos sérios pode ser uma estratégia eficaz para a reabilitação motora de pacientes com PTC.

Palavras-chave: Jogos Sérios, Tecnologias Vestíveis, Pé Torto Congênito.

Abstract

Serious games have been providing engagement and effectiveness in functional recovery. This study presents the development and evaluation of a serious game created to train dorsiflexion and plantar flexion movements. The game is controlled by an electronic slipper (wearable), equipped with an accelerometer and an Arduino microcontroller. A patient with Congenital Clubfoot (PTC) participated in a six-week rehabilitation program, with 30-minute game sessions. The results showed improvements in joint mobility of both feet, with more significant gains in the right foot, and in balance (KTK tests). Collectively, the data indicate an overall improvement in motor control, joint mobility, and balance capacity. These findings indicate that the combination of wearable technologies and serious games can be an effective strategy for the motor rehabilitation of patients with PTC.

Keywords: Serious Games, Wearable Technologies, Congenital Clubfoot.

¹ Ana Grasielle Dionísio Corrêa, é Doutora em Engenharia Elétrica pela Poli-USP, Bacharel em Engenharia de Computação e docente do Programa de Pós-Graduação em Computação Aplicada da Universidade Presbiteriana Mackenzie.

² Daniel Rogério de Matos Jorge Ferreira, é Doutor em Distúrbios do Desenvolvimento pela Universidade Presbiteriana Mackenzie, fisioterapeuta especialista em PTC.

³ Silvana Maria Blascovi de Assis, é Doutora em Educação Física pela Universidade Estadual de Campinas e docente do Programa de Pós-Graduação em Ciências do Desenvolvimento Humano da Universidade Presbiteriana Mackenzie.

⁴ Bruno da Silva Rodrigues é Doutor em Engenharia Elétrica pela Poli-USP e colaborador do Laboratório de Gameterapia e Realidade Virtual da Universidade Presbiteriana Mackenzie.

Os jogos sérios (serious games) emergiram como uma ferramenta promissora na reabilitação motora, transformando processos terapêuticos tradicionalmente monótonos em experiências mais dinâmicas e motivadoras (Sepasgozar Sarkhosh et al., 2024). Sua aplicação tem demonstrado eficácia na promoção da recuperação funcional de pacientes com diversas condições neurológicas e musculoesqueléticas (Rutkowski et al., 2017; Lopes et al., 2017). As vantagens incluem o aumento significativo do engajamento e da adesão do paciente ao tratamento, proporcionado pela interatividade lúdica e feedback imediato (Nascimento et al., 2021). Adicionalmente, permitem a personalização dos níveis de dificuldade e a repetição de movimentos terapêuticos de forma envolvente, fundamental para a neuroplasticidade e o reaprendizado motor (Braga et al., 2023).

Paralelamente, os progressos na área de tecnologias vestíveis (wearable technologies) abriram novas perspectivas para a reabilitação. Esses dispositivos, equipados com sensores capazes de capturar movimentos corporais com precisão, começaram a ser integrados a jogos sérios, oferecendo interfaces de controle mais intuitivas e ecológicas (Nascimento et al., 2021). A combinação de jogos sérios com tecnologias vestíveis em programas de reabilitação motora apresenta vantagens substanciais. Além de potencializar o engajamento do paciente através de uma experiência imersiva e interativa, esses sistemas permitem a coleta contínua e objetiva de dados cinemáticos e de desempenho, fundamentais para o acompanhamento da evolução clínica e para o ajuste personalizado das terapias (Meijer et al., 2018). Tais sistemas também facilitam a realização de exercícios terapêuticos em ambientes domiciliares, aumentando a intensidade e a conveniência do tratamento (Agyeman & Al-Mahmood, 2019).

Apesar de evidências sobre os benefícios dos jogos sérios e tecnologias vestíveis na reabilitação motora (Nascimento et al., 2021; Meijer et al., 2018; Agyeman & Al-Mahmood, 2019), observa-se na literatura uma escassez de soluções especificamente direcionadas ao treinamento dos movimentos dos pés e tornozelos.

Estes movimentos, como a dorsiflexão e a flexão plantar, são fundamentais para atividades da vida diária, como a marcha, a manutenção do equilíbrio e a postura adequada (Dias et al., 2022). Embora existam algumas propostas que utilizam plataformas de força ou sensores inerciais para reabilitação de membros inferiores de forma mais ampla (Nascimento et al., 2021), poucos trabalhos se dedicam ao desenvolvimento e validação de jogos sérios controlados por dispositivos vestíveis desenhados especificamente para os complexos movimentos do pé. Essa lacuna é particularmente relevante considerando a importância da reabilitação específica do pé em condições como o Pé Torto Congênito (PTC), lesões ligamentares do tornozelo ou sequelas neurológicas que afetam a mobilidade distal (Dias et al., 2022).

Diante dessa lacuna e da necessidade de novas ferramentas para a reabilitação dos movimentos do pé, este estudo apresenta o design e a avaliação de um jogo sério, criado para treinar os movimentos de dorsiflexão e flexão plantar. O jogo é controlado por uma sapatilha eletrônica (wearable), equipada com um acelerômetro e um microcontrolador Arduino, conectada via cabo USB a um computador. Um paciente com PTC participou de um programa de reabilitação de seis semanas, com sessões de 30 minutos. Os resultados indicaram melhorias nos parâmetros de equilíbrio e amplitude de movimento do tornozelo, fortalecendo a literatura de estratégias de reabilitação motora assistida por tecnologia.

Pé Torto Congênito e a Reabilitação dos Movimentos do Tornozelo e Pé

O Pé Torto Congênito (PTC) é uma das anomalias congênitas mais comuns do sistema musculoesquelético, caracterizado por um conjunto complexo de deformidades do pé, presentes ao nascimento. Tipicamente, o PTC envolve os componentes CAVE: Cavus (arco plantar acentuado), Adductus (antepé aduzido), Varus (retopé em varo) e Equinus (tornozelo em flexão plantar) (Dias et al., 2022). O tratamento padrão-ouro, como o método de Ponseti, visa a correção gradual dessas deformidades através de manipulações e gessos seriados, frequentemente seguidos por uma tenotomia do tendão de Aquiles e o uso de órteses para manter a correção e prevenir recidivas (Motta & Amorim 2021). Neste contexto, a fisioterapia é

importante na otimização dos resultados, na manutenção da amplitude de movimento (ADM), no fortalecimento muscular e na funcionalidade do pé e tornozelo (Dias et al., 2022).

Dentre os movimentos essenciais na reabilitação do pé, a dorsiflexão – o movimento de trazer a ponta do pé em direção à tíbia – é de particular importância (Figura 1). A deformidade em equino, uma das principais características do PTC, resulta em uma limitação significativa da dorsiflexão, comprometendo o contato do calcâneo com o solo e a progressão normal da marcha. Exercícios que promovem o ganho e a manutenção da dorsiflexão são fundamentais para alongar as estruturas posteriores encurtadas, como o tendão de Aquiles, e permitir uma biomecânica de marcha mais eficiente (Dias et al., 2021). Por outro lado, a flexão plantar – o movimento de apontar os dedos para baixo – embora seja a posição da deformidade em equino, também necessita ser trabalhada de forma controlada. Após a correção inicial, o fortalecimento dos músculos flexores plantares e o treino do controle ativo deste movimento contribuem para a força de propulsão durante a marcha e para a estabilidade dinâmica do tornozelo (Galdino & Kneubuehler, 2018).



Figura 1. Movimentos do tornozelo

Os movimentos de inversão e eversão do pé também são alvos terapêuticos centrais no PTC (Figura 1). A inversão, que consiste em virar a planta do pé medialmente (para dentro), é um componente das deformidades em aduto e varo, encontrando-se exacerbada no PTC. Assim, os esforços terapêuticos frequentemente se concentram

em alongar as estruturas mediais tensas e promover o movimento corretivo para fora da inversão excessiva, além de conscientizar o paciente sobre o posicionamento neutro (Araújo et al., 2014). Em contrapartida, a eversão (movimento de virar a planta do pé lateralmente para fora), fundamental para a correção. Este movimento é ativamente limitado no PTC devido ao encurtamento das estruturas mediais e à fraqueza dos músculos evertidos, como os fibulares. Exercícios de eversão visam, portanto, alongar as estruturas mediais, fortalecer os músculos evertidos e promover um alinhamento mais neutro e funcional do pé, sendo vitais para a manutenção da correção e prevenção de recidivas das deformidades em aduto e varo (Araújo et al., 2014).

O treinamento direcionado e regular desses quatro movimentos – dorsiflexão, flexão plantar, inversão e eversão – é um pilar na reabilitação de longo prazo de pacientes com PTC. A capacidade de executar e controlar ativamente cada um desses movimentos contribui para a melhoria da amplitude articular, força muscular, propriocepção e, conseqüentemente, para a qualidade da marcha e a participação em atividades diárias. A utilização de abordagens inovadoras, como jogos sérios que incorporam o treino específico desses movimentos, pode oferecer uma forma motivadora e quantificável de complementar os protocolos de reabilitação tradicionais, auxiliando na adesão e no progresso terapêutico.

Gameterapia na Reabilitação do Pé

A gameterapia faz uso de jogos sérios e/ou exergames como ferramenta terapêutica. Ao transformar exercícios repetitivos em desafios interativos e motivadores, essa modalidade terapêutica tem trazido benefícios na recuperação de diversas condições que afetam os pés e os tornozelos (Al-Mallah et al., 2023). Por meio de sensores de movimento, plataformas de equilíbrio ou câmeras, os movimentos do paciente são capturados e integrados ao ambiente virtual do jogo. Essa interação direta permite que o indivíduo corrija a postura, melhore a amplitude de movimento, a força, o equilíbrio e a propriocepção – a consciência da posição do corpo no espaço – de uma maneira mais engajadora comparada aos métodos convencionais (Sepasgozar Sarkhosh et al., 2024; Gatica-Rojas & Elgueta-Cancino, 2021).

Diversas tecnologias são empregadas na gameterapia para o pé. Sistemas de Realidade Virtual (RV) transportam o paciente para ambientes simulados onde ele deve realizar tarefas que exercitam a articulação do tornozelo e a musculatura do pé (Al-Mallah et al., 2023). Plataformas de força e equilíbrio, como o Nintendo Wii Balance Board, são frequentemente utilizadas para treinar o controle postural e a distribuição de peso (Sepasgozar Sarkhosh et al., 2024). Ademais, jogos desenvolvidos para smartphones e tablets, que utilizam os acelerômetros e giroscópios dos dispositivos, oferecem uma opção acessível para a continuidade do tratamento em casa (Rocha et al., 2019).

As evidências científicas que suportam o uso da gameterapia na reabilitação do pé têm crescido consistentemente. A pesquisa de Al-Mallah et al. (2023) mostra a aplicação da gameterapia na recuperação de cirurgias no pé e tornozelo, auxiliando na recuperação da mobilidade e força de forma mais motivadora. Nascimento et al., (2021) realizaram um estudo com crianças com pé torto congênito e constataram que os jogos sérios podem aumentar o engajamento e a execução correta dos exercícios de inversão e eversão do pé, fundamentais para o sucesso do tratamento. Ademais, a pesquisa de Lopes et al. (2018) mostrou que pacientes com sequelas de acidente vascular cerebral (AVC) ou com paralisia cerebral podem se beneficiar da gameterapia para melhorar a marcha, o equilíbrio e o controle motor dos membros inferiores.

Materiais e Métodos

O presente estudo foi conduzido sob uma abordagem de pesquisa qualitativa, de natureza exploratória e de campo, organizada em três etapas principais.

Etapas 1 – Análise de Necessidades e Modelagem das Tarefas do Jogo

A primeira etapa da metodologia consistiu em uma análise aprofundada das necessidades do público-alvo, especificamente pacientes com PTC. Este levantamento teve como objetivo identificar os requisitos e desafios específicos

enfrentados por esses pacientes, sendo fundamental para a modelagem das tarefas a serem incorporadas no jogo sério. Buscou-se, assim, assegurar que as interações propostas fossem adequadas, motivadoras e alinhadas com os objetivos terapêuticos da reabilitação do PTC.

Etapas 2 – Projeto de Design e Desenvolvimento do Sistema

Subsequentemente, na segunda etapa, procedeu-se ao projeto de design e desenvolvimento completo do sistema de reabilitação. Esta fase abrangeu o design e a criação dos componentes de software, correspondentes ao jogo sério propriamente dito (incluindo mecânicas, interface e feedback), e de hardware, referente ao dispositivo vestível (wearable) customizado, utilizado para a interação do paciente e a captura precisa dos movimentos do pé e tornozelo.

Etapas 3 – Estudo de Caso com Paciente com PTC

A terceira etapa foi dedicada à avaliação preliminar dos potenciais efeitos do sistema por meio de um estudo de caso.

Participante: Participou desta fase um paciente pediátrico, com 8 anos de idade, diagnosticado com PTC. Todos os procedimentos foram conduzidos mediante consentimento informado dos responsáveis legais e assentimento do participante, seguindo os princípios éticos aplicáveis à pesquisa com seres humanos.

Protocolo de Intervenção: O paciente foi submetido a um protocolo de intervenção com duração total de seis semanas. Foram realizadas duas sessões de jogo por semana, cada uma composta por um período de aquecimento seguido por 30 minutos de interação com o jogo sério. Ao todo, foram completadas 12 sessões de intervenção.

Coleta de Dados e Métricas de Avaliação: Para investigar os efeitos da intervenção, foram coletadas métricas antes do início (pré-intervenção) e após a conclusão (pós-intervenção) do protocolo. As seguintes variáveis foram mensuradas:

- **Equilíbrio:** Avaliado por meio do teste KTK (Körperkoordinationstest für Kinder), um instrumento validado para a avaliação da coordenação motora e equilíbrio global em crianças.
- **Amplitude de Movimento (ADM) do Tornozelo:** Aferida utilizando um goniômetro clínico padrão, para registrar quantitativamente a ADM ativa e/ou passiva do tornozelo.
- **Desempenho no Jogo:** O desempenho do participante no jogo sério foi continuamente monitorado e registrado pelo sistema, com foco específico na métrica de precisão dos movimentos realizados durante as tarefas propostas.

Resultados e Discussões

Os resultados coletados no teste KTK demonstram uma evolução no desempenho funcional entre a avaliação inicial e a final. Houve um progresso claro em todas as quatro métricas, indicando uma melhora significativa no equilíbrio, na potência e no controle motor do indivíduo. Especificamente, a performance no Equilíbrio em Traves aumentou de 19 cm para 26 cm; a capacidade de impulsão também mostrou ganhos, com o Salto Monopedal passando de 27 cm para 35 cm; o Salto Lateral apresentando um dos aumentos mais substanciais, de 17 cm para 26 cm; a Transferência Lateral também evoluiu, de 29 cm para 34 cm. Em conjunto, esses dados sugerem que a intervenção realizada foi eficaz para aprimorar o equilíbrio dinâmico, a força explosiva e a estabilidade dos membros inferiores.

A análise comparativa da amplitude de movimento (ADM) revela uma assimetria acentuada entre os tornozelos na avaliação inicial, com uma melhora funcional expressiva no tornozelo direito ao final do período. Inicialmente, o tornozelo direito apresentava limitações consideráveis (ex: 6° de dorsiflexão e 29° de flexão plantar). Após a intervenção, este mesmo tornozelo demonstrou ganhos em todos os movimentos, com destaque para a flexão plantar que ganhou 10 graus (de 29° para 39°). Em contrapartida, o tornozelo esquerdo já apresentava uma ADM inicial muito superior e dentro da normalidade funcional (ex: 18° de dorsiflexão e 44° de flexão plantar). Consequentemente, as mudanças neste tornozelo foram mínimas, mantendo sua mobilidade praticamente estável.

A análise dos resultados de desempenho no jogo evidenciou uma performance consistentemente superior do pé esquerdo em comparação ao pé direito, uma diferença que se torna mais acentuada à medida que a complexidade e a amplitude exigida nas tarefas aumentam. Nas fases iniciais de menor dificuldade (Fase 1, 2 e 3) – Fases de até 2 segundos de flexão de movimentos - ambos os pés apresentaram um desempenho relativamente similar. Contudo, a disparidade torna-se evidente nas fases mais desafiadoras a medida em que o tempo de flexão dos movimentos aumenta. A queda de performance mais drástica do pé direito ocorreu na Fase 4, que exigia uma maior dorsiflexão (de 4 segundos); enquanto o pé esquerdo alcançou 29,67 graus, o direito atingiu apenas 5,5 graus, sugerindo uma dificuldade específica em realizar a dorsiflexão em maiores amplitudes. O pé esquerdo atingiu seu pico de performance na Fase 5 (48,22 graus), superando amplamente o pé direito (30,5 graus). Na fase mais difícil (Fase 6), a superioridade do pé esquerdo se manteve, com mais que o dobro do desempenho do pé direito (12 graus contra 5,7 graus).

Apesar do número limitado a apenas um único paciente, os resultados obtidos nesta pesquisa sugerem que o jogo sério pode ser eficaz no tratamento do PTC, corroborando com estudos como o de Al-Mallah et al., (2023) que aplicaram RV para melhorar a amplitude de movimento (ADM) e a funcionalidade geral em lesões ortopédicas do tornozelo. Os dados do jogo do nosso paciente exemplificam isso de forma prática: a performance inferior do pé direito (ex: apenas 5,5 graus na Fase 4) não é apenas um placar, mas uma quantificação dinâmica da sua dificuldade funcional, refletindo diretamente a limitação de ADM que foi observada na avaliação goniométrica inicial. Os resultados de desempenho no jogo vão além de uma simples medição de ADM estática, pois testa a habilidade do paciente de usar sua amplitude de forma controlada para atingir alvos específicos. A queda brusca de desempenho do pé direito em tarefas mais difíceis indica um déficit no controle neuromuscular, um tipo de dado rico que a gameterapia é particularmente apta a fornecer.

Conclusões

Conclui-se que o exergame com controle por dispositivo vestível representa uma abordagem viável e promissora na reabilitação de membro inferior em crianças com Pé Torto Congênito (PTC). O uso do jogo foi eficaz em promover engajamento e motivação, resultando em um impacto positivo na precisão motora, especialmente em fases de movimentos combinados. A principal evidência do estudo é a distinção fundamental entre ganho de amplitude e melhora funcional: enquanto o pé direito obteve ganhos expressivos de mobilidade, mostrou menor precisão em tarefas de média complexidade. Em contrapartida, o pé esquerdo, com maior consistência e controle motor, teve um desempenho geral superior. Fica claro, portanto, que a coordenação e o controle motor são fatores mais determinantes para o desempenho funcional do que a amplitude de movimento isoladamente. Dessa forma, o estudo evidencia o grande potencial dos sistemas de reabilitação baseados em jogos como estratégias inovadoras para o desenvolvimento de terapias eficazes e personalizadas.

Referências

Agyeman, M. O., & Al-Mahmood, A. (2019, junho). Design and implementation of a wearable device for motivating patients with upper and/or lower limb disability via gaming and home rehabilitation. In *2019 Fourth International Conference on Fog and Mobile Edge Computing (FMEC)* (pp. 247-252). IEEE.

Al-Mallah, M. I., Abutaleb, A. A., Al-Salti, A. M., Al-Mawali, H. S., & Al-Yahyai, A. S. (2023). The efficacy of virtual reality training in the rehabilitation of orthopedic ankle injuries: A systematic review and meta-analysis. *Cureus*, *15*(3), e35738.

Araújo, A. G. D. F., Barbosa, G. D. M., Freire, R. D. A., Andrade, P. R. D., Ferreira, J. J. D. A., & Santos, H. H. D. (2014). Fidedignidade das medidas inter e intratestes com goniômetro universal e artrômetro podálico da amplitude ativa de eversão e inversão do tornozelo. *Fisioterapia e Pesquisa*, *21*, 339-345.

Braga, M. A., Lopes, L. W., & dos Santos Machado, L. (2023). Contribuições dos Serious Games para neuroplasticidade, aprendizado motor e reabilitação neurológica: revisão integrativa. *Saúde (Santa Maria)*, 49(2), e67496-e67496.

Dias, H. F. R., Pissolato, G. G., de Lima, J. G., Fernandes, J. G. F., Júnior, J. A. F., & Pagliuso, J. F. V. (2022). Síndrome do pé torto congênito: uma revisão sistemática Congenital clubfoot syndrome: a systematic review. *Brazilian Journal of Development*, 8(5), 37823-37837.

Galdino, T. R., & Kneubuehler, P. A. (2018). Análise comparativa do movimento de extensão de joelho na cadeira extensora, associado à dorsiflexão ou flexão plantar do tornozelo durante treinamento de hipertrofia em mulheres. *RBPFE-Revista Brasileira de Prescrição e Fisiologia do Exercício*, 12(73), 130-139.

Gatica-Rojas, V., & Elgueta-Cancino, E. (2021). Effect of virtual reality-based physical therapy on balance and gait in people with multiple sclerosis: A systematic review and meta-analysis. *Multiple Sclerosis and Related Disorders*, 49, 102784.

Lopes, S. I. C., Costa, P. D. D., & Sousa, P. A. D. A. (2018). Games used with serious purposes: A systematic review of interventions in patients with cerebral palsy. *Frontiers in Psychology*, 9, 1712.

Meijer, H. A., Graafland, M., Goslings, J. C., & Schijven, M. P. (2018). Systematic review on the effects of serious games and wearable technology used in rehabilitation of patients with traumatic bone and soft tissue injuries. *Archives of physical medicine and rehabilitation*, 99(9), 1890-1899.

Motta, I. S., & Amorim, P. B. (2021). A atuação da fisioterapia no tratamento do pé torto congênito: Estudo de caso. *RECIMA21-Revista Científica Multidisciplinar-ISSN 2675-6218*, 2(10), e210870-e210870.

Nascimento, M. H. F. D., Tamura, L. H. B., Corrêa, A. G. D., Ferreira, D. R. D. M., & Corrêa, B. R. (2021). Um Jogo Sérioso Controlado por Dispositivo Vestível para

Rocha, T. F., Souza, A. C. B. d., & Bevilaqua-Grossi, D. (2019). The use of a smartphone accelerometer to measure the range of motion of the ankle joint. *Fisioterapia em Movimento*, 32, e003223.

Rutkowski, S., Ratajczak, E., & Wilińska, J. (2017). The use of virtual reality in the rehabilitation of patients with musculoskeletal system dysfunctions. *Journal of Education, Health and Sport*, 7(8), 543-551.

Sepasgozar Sarkhosh, S., Khanmohammadi, R., & Shiravi, Z. (2024). Comparison of the effects of exergaming and balance training on dynamic postural stability during jump-landing in recreational athletes with chronic ankle instability. *PLOS ONE*, 19(1), e0314686.