



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE CIÊNCIAS DA SAÚDE DE PORTO ALEGRE
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIAS DA INFORMAÇÃO E
GESTÃO EM SAÚDE**

Kalanna Louise Garcia Costa

O Impacto da Hipogravidade Simulada na Biomecânica da Marcha

Porto Alegre

2024

Kalanna Louise Garcia Costa

O Impacto da Hipogravidade Simulada na Biomecânica da Marcha

Dissertação de Mestrado Acadêmico apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologias da Informação e Gestão em Saúde da Universidade Federal de Ciências da Saúde de Porto Alegre, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Tecnologias da Informação e Gestão em Saúde.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Juliana Silva Herbert
Coorientadora: Prof.^a Dr.^a Thais Russomano
Coorientador: Prof. Dr. Nelson Alexandre Campos
Vinagre

Porto Alegre

2024

Catálogo na Publicação

Costa, Kalanna Louise Garcia

O Impacto da Hipogravidade Simulada na Biomecânica da Marcha / Kalanna Louise Garcia Costa. -- 2024.

38 p. : tab. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) -- Universidade Federal de Ciências da Saúde de Porto Alegre, Programa de Pós-Graduação em Tecnologias da Informação e Gestão em Saúde, 2024.

Orientador(a): Profa. Dra. Juliana Silva Herbert ;
coorientador(a): Profa. Dra. Thais Russomano, Prof. Dr.
Nelson Alexandre Campos Vinagre.

1. Hipogravidade simulada. 2. Esteira
antigravitacional. 3. Reabilitação. 4. Voo espacial. 5.
Medicina aeroespacial. I. Título.

Kalanna Louise Garcia Costa

O Impacto da Hipogravidade Simulada na Biomecânica da Marcha

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologias da Informação e Gestão em Saúde da Universidade Federal de Ciências da Saúde de Porto Alegre como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Tecnologias da Informação e Gestão em Saúde.

Linha de pesquisa: Sistemas Inteligentes e Aplicações na Saúde

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Juliana Silva Herbert

Coorientadora: Prof.^a Dr.^a Thais Russomano

Coorientador: Prof. Dr. Nelson Alexandre Campos Vinagre

Aprovada em: 24 de maio de 2024.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. João de Carvalho Castro
Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul

Prof. Dr. Marcelo Faria Silva
Universidade Federal de Ciências da Saúde de Porto Alegre

Prof. Dr. Rodrigo Della Méa Plentz
Universidade Federal de Ciências da Saúde de Porto Alegre

AGRADECIMENTOS

Ao finalizar uma etapa tão importante para a minha vida profissional e, também, pessoal, eu não poderia deixar de fazer alguns agradecimentos.

Agradeço, primeiramente, à minha família, em especial à minha mãe, Solange, e ao meu irmão, Keoma, que sempre me apoiaram e me motivaram a seguir em frente. Agradeço, também, ao meu namorado Rafael, por tornar os meus dias mais leves e divertidos.

Agradeço à minha orientadora Juliana, por sempre confiar em mim e por me dar essa oportunidade de me tornar mestre. Agradeço à minha coorientadora Thais, por fortalecer ligações e por sempre ser tão motivadora. Agradeço ao meu coorientador Nelson, por tornar possível a realização da pesquisa, por fortalecer laços com a equipe de Lisboa e por acompanhar de perto a coleta de dados. Agradeço, também, à equipe que foi parte fundamental da coleta de dados, o mestrando Duarte Conchinhas e a professora Filipa João.

Por fim, mas não menos importante, agradeço a minha parceira de revisão sistemática, a Amanda, por me ajudar nesse processo.

Obrigada a todos! Sempre lembrarei com carinho de vocês!

RESUMO

Poucas informações se têm sobre a locomoção e o movimento humano sob hipogravidade sustentada, isso representa um sério problema para a expansão da exploração espacial humana. Estudos neste contexto são fundamentais para o entendimento e desenvolvimento de contramedidas necessárias. Esse trabalho procurou avaliar o impacto da hipogravidade simulada, através de uma esteira antigravitacional, na biomecânica da marcha. A primeira etapa consistiu no desenvolvimento de uma revisão sistemática, seguindo as diretrizes do *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-analysis* (PRISMA). As bases de dados definidas para a realização das buscas foram *Medline/Pubmed*, *Embase*, *Virtual Health Library*, *Web of Science*, *ScienceDirect*, *Scopus* e *SPORTDiscus*. A última busca foi realizada em agosto de 2022. A análise da qualidade foi realizada através da Escala PEDro (*Physiotherapy Evidence Database*). Na segunda etapa foi realizado um estudo observacional transversal, em que um total de 13 alunos da Universidade de Lisboa foram avaliados, através do equipamento *XSens™ Motion Capture MVN Analyze*, durante a marcha na esteira antigravitacional *AlterG® VIA 400/400X Anti-Gravity Treadmill™*, em 7 momentos de descarga corporal, simulando os ambientes da Terra, de Marte e da Lua. Foram coletados parâmetros espaço-temporais da marcha, bem como variáveis cinemáticas tridimensionais dos deslocamentos angulares do tornozelo, joelho e quadril, da perna direita. Os resultados da primeira etapa mostraram que o uso da *AlterG®* apresenta benefícios na reabilitação de osteoartrose, de fraturas e em casos pós-cirúrgicos. Os principais desfechos analisados foram a dor, quadro funcional, análise da marcha e a função muscular. Não foram encontrados estudos utilizando a esteira antigravitacional no condicionamento pós-voo espacial, apesar de existirem possíveis efeitos positivos. Sobre os resultados da segunda etapa, o ambiente da Lua apresentou tempo do passo maior que dois ambientes da Terra ($p=0,004$). O tempo da fase de balanço demonstrou ser maior no ambiente da Lua comparado aos três ambientes terrestres ($p<0.001$). Terra apresentou cadência maior que Lua ($p=0,006$). A variação angular da amplitude de movimento, mostrou que os três ambientes da Terra apresentam valores maiores comparados aos outros ambientes. Os ambientes de Marte apresentam curvas intermediárias entre os três ambientes da Terra e os dois ambientes da Lua, para a

maioria dos movimentos, mostrando que as alterações no padrão da marcha são diretamente proporcionais a exposição à hipogravidade. Espera-se que um maior entendimento da cinemática da marcha em hipogravidade simulada colabore para o desenvolvimento de contramedidas eficazes e inovadoras para a reabilitação da marcha e para a exploração humana do espaço.

Palavras-chave: Hipogravidade simulada. Esteira antigravitacional. Reabilitação. Voo espacial.

ABSTRACT

Little information is available about human locomotion and movement under sustained hypogravity, which represents a serious problem for the expansion of human space exploration. Studies in this context are essential for understanding and developing necessary countermeasures. This work sought to evaluate the impact of simulated hypogravity, using an antigravity treadmill, on the biomechanics of gait. The first stage consisted of developing a systematic review, following the guidelines of the Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-analysis (PRISMA). The databases defined for carrying out the searches were Medline/Pubmed, Embase, Virtual Health Library, Web of Science, ScienceDirect, Scopus, and SPORTDiscus. The last search was carried out in August 2022. Quality analysis was carried out using the PEDro Scale (Physiotherapy Evidence Database). In the second stage, a cross-sectional observational study was carried out, in which a total of 13 students from the University of Lisbon were evaluated, using the XSens™ Motion Capture MVN Analyze equipment, while walking on the AlterG® VIA 400/400X Anti-Gravity Treadmill™ antigravity treadmill, in 7 moments of body unloading, simulating the environments of Earth, Mars and the Moon. Spatio-temporal gait parameters were collected, as well as three-dimensional kinematic variables of the angular displacements of the ankle, knee, and hip of the right leg. The results of the first stage showed that the use of AlterG® presents benefits in the rehabilitation of osteoarthritis, fractures, and post-surgical cases. The main outcomes analyzed were pain, functional status, gait analysis, and muscle function. No studies were found using antigravity treadmills in post-space flight reconditioning, despite possible positive effects. Regarding the results of the second stage, the Moon environment had a longer step time than the two Earth environments ($p=0.004$). The swing phase time proved to be longer in the Moon environment compared to the three terrestrial environments ($p<0.001$). Earth showed a higher cadence than the Moon ($p=0.006$). The angular variation of the range of motion showed that the three environments on Earth present greater values compared to the other environments. The environments on Mars present intermediate curves between the three environments on Earth and the two environments on the Moon, for most movements, showing that changes in gait pattern are directly proportional to exposure to hypogravity. It is expected that a greater understanding of the kinematics of gait in

simulated hypogravity will contribute to the development of effective and innovative countermeasures for gait rehabilitation and human space exploration.

Keywords: Simulated hypogravity. Antigravity treadmill. Rehabilitation. Space flight.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
1.2 OBJETIVOS	14
2 MÉTODOS	14
2.1 Etapa 1: Revisão Sistemática da Literatura.....	14
2.2 Etapa 2: Estudo Observacional Transversal.....	16
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	20
4 CONCLUSÃO.....	24
5 REFERÊNCIAS.....	25

1 INTRODUÇÃO

Marcha é o ato de se locomover, deslocar ou caminhar, e consiste na realização de movimentos alternados dos membros inferiores. O ciclo da marcha compreende uma passada completa, ou seja, a passagem do contato de um calcanhar com o solo até contato do mesmo calcanhar com o solo. Um ciclo de marcha é composto por dois passos, que é a passagem do contato de um calcanhar com o solo ao contato do calcanhar contralateral com o solo. Isso determina duas fases: uma de apoio, que corresponde 60% do ciclo da marcha; e uma de balanço, que corresponde 40% (1). Compreende-se que a gravidade exerce um papel importante na marcha humana desenvolvida na Terra, principalmente sobre a variação angular das articulações, ativação muscular e padrões de movimento.

O impacto da hipogravidade na biomecânica da marcha e os seus efeitos subsequentes na saúde muscular e óssea continuam sendo uma área de investigação difícil e importante. Tais efeitos podem gerar implicações sérias à saúde dos astronautas. Esse trabalho procurou compreender os efeitos das hipogravidades lunar (0,16g) e marciana (0,38g) na biomecânica da marcha, situações em que se têm dados apenas de simulações terrestres até o momento. Dessa forma, é importante entender como a microgravidade afeta a fisiologia humana para prever como será a exposição aos ambientes da Lua e de Marte. Até então, estudos sobre a exposição humana ao espaço ocorreram através da permanência na *International Space Station* (ISS), onde a gravidade é praticamente nula.

Em um ambiente de microgravidade, os humanos sofrem com a ausência de peso, o que provoca hipotrofia, principalmente, nos músculos antigravitacionais, de tronco e membros inferiores (2,3). Há estudos mostrando que o volume do quadríceps e do tríceps sural diminuiu em torno de 15% em voos espaciais de curta duração, de até 16 dias (4,5). Em voos espaciais de longa duração, a área de secção transversal do músculo sóleo tende a diminuir cerca de 30% (6).

Isso impacta diretamente nas fibras musculares, pois as fibras do tipo I atrofiam dando lugar às fibras do tipo II, tornando o percentual das fibras do tipo II maior, no músculo hipotrófico (6,7). Em relação ao tronco, o tamanho dos músculos multifídeos e do transverso do abdômen também apresentam uma redução significativa (8), o que gera maior instabilidade lombopélvica no retorno à gravidade terrestre. Além disso,

ocorre uma diminuição significativa na força muscular, potência, resistência e controle motor, impactando, negativamente, a funcionalidade dos tripulantes (3,9).

Os ossos apresentam, principalmente, duas funções: uma é dar suporte e proteção aos órgãos internos e a outra é o armazenamento de cálcio. No ambiente de microgravidade, essa função de suporte encontra-se perturbada e observa-se um aumento na excreção de cálcio pela urina de 60-70% (10). Durante voos espaciais, o sistema ósseo é um dos mais afetados pelos efeitos da microgravidade, pois ocorre um aumento da reabsorção óssea e, conseqüentemente, uma diminuição da densidade mineral óssea (DMO) (11).

A desmineralização induzida pela microgravidade se deve não apenas ao desuso, como também pelas alterações de perfusão do tecido e pelas respostas hormonais e/ou neurais causadas por fluidos corporais alterados (12). As regiões mais impactadas são a coluna lombar e o fêmur, com uma redução da DMO de 1% e 1,5% ao mês, respectivamente (13). Já o osso calcâneo, mostrou uma tendência de redução da DMO de 8% depois de 4 meses (10). Em voos de longa duração, a diminuição da DMO pode chegar a 10%, em diversas áreas do corpo, após 4-6 meses (14).

Análogos terrestres têm sido utilizados para simular os ambientes da Lua e de Marte, como uma alternativa para compreender os efeitos da hipogravidade no corpo humano. Um estudo que usou diferentes simuladores para reduzir a gravidade para 0,16g durante a marcha, mostrou que a locomoção nessas condições foi associada à redução da velocidade do pé e a mudanças significativas no movimento angular. Além disso, a hipogravidade simulada parece afetar diretamente a dinâmica da fase de balanço na formação de padrões locomotores, resultando em um balanço mais lento e em excursões mais longas dos pés (15).

Um outro estudo simulou as hipogravidades de Marte e da Lua e os resultados mostram que há mudanças significativas na ativação dos músculos tibial anterior e gastrocnêmio, bem como mudanças significativas na dorsiflexão e plantiflexão, sob diversas condições (16). Essas descobertas sugerem que há mudanças fundamentais na forma como os humanos se movem nesses ambientes de hipogravidade. Portanto, essas alterações podem afetar questões de segurança associadas à locomoção, incluindo aumento dos riscos de quedas (16). A complexidade destas descobertas

realça a razão pela qual a locomoção deve ser considerada uma área chave de investigação para futuras missões de exploração lunar e marciana (16).

Missões à Lua e a Marte são propostas para o futuro, as quais podem durar 2 anos ou mais em um ambiente de hipogravidade. Uma missão a Marte, por exemplo, irá expor o corpo humano à, aproximadamente, 6 meses de microgravidade, durante a transição da Terra para Marte, seguida por uma estadia em Marte por cerca de um ano. O descondicionamento dos sistemas musculoesquelético e cardiovascular durante a microgravidade prolongada reduz a capacidade física e a tolerância ortostática, bem como diminui o desempenho geral da tripulação, especialmente na chegada a Marte (17). As exposições ao voo espacial até agora documentam que a transição da microgravidade para a um nível de gravidade mais alto é uma fase crítica para um tripulante (18,19).

Portanto, o desenvolvimento de contramedidas para evitar o referido descondicionamento é um fator importante relacionado à pesquisa espacial. Simulações de hipogravidade serão necessárias para induzir os efeitos acima mencionados no corpo humano e para testar a eficácia de diferentes contramedidas. Até o momento, vários métodos de simulação foram testados (17), porém as esteiras de pressão positiva para a parte inferior do corpo estão, provavelmente, mais próximas da gravidade parcial “real”. Isso ocorre porque os membros se movem livremente ao caminhar e tanto o tronco quanto as pernas ficam expostos à gravidade parcial (20).

A tecnologia de pressão de ar diferencial da esteira antigravitacional foi originalmente desenvolvida para a *NASA (National Aeronautics and Space Administration)* (21). À medida que os astronautas passavam cada vez mais tempo em um ambiente de gravidade zero, surgiu uma consequência não intencional, a perda de massa muscular e de densidade óssea. Um engenheiro da *NASA* procurou uma solução para ajudar os astronautas usando uma câmara de ar pressurizada para simular a carga gravitacional. Reconhecendo que a redução inversa dos efeitos da gravidade sobre as pessoas na Terra poderia trazer benefícios significativos em uma vasta gama de aplicações, a solução foi submetida à engenharia reversa para criar o sistema de pressão de ar diferencial usado na esteira antigravitacional até hoje (21).

A esteira antigravitacional mostrou resultados positivos na reabilitação de condições ortopédicas de membros inferiores, como: osteoartrose (AO) de joelho (22), ruptura do ligamento cruzado anterior (23), fraturas de platô tibial, tornozelo e quadril (24–26) e lesões meniscais e condrais (27). Em relação a marcha, a esteira antigravitacional mostrou melhoras na velocidade de caminhada, comprimento da passada e amplitude de movimento do joelho em indivíduos com OA (22). Em pacientes com fraturas do platô tibial e de tornozelo submetidos a descarga parcial de peso pós-operatória, o uso da esteira antigravitacional foi associado a uma maior circunferência da coxa no grupo intervenção (25), que se manteve após 12 meses (24) (essa medida foi realizada para verificar a hipotrofia muscular do membro operado).

Além disso, o treinamento em esteira antigravitacional melhorou significativamente mais a força muscular com dinamômetro isocinético a 60°/s dos músculos extensores do quadril do que a terapia convencional (26). *Kim et al* (2020), avaliaram a atividade elétrica muscular de indivíduos com fratura de quadril, encontrando maior atividade nos músculos glúteo máximo e glúteo médio, no grupo intervenção (26). Nenhum evento adverso, associado à reabilitação em esteira antigravitacional, foi observado desses estudos.

Sendo assim, esse trabalho foi elaborado a partir da seguinte questão de pesquisa: como a hipogravidade simulada impacta a biomecânica da marcha?

1.1 JUSTIFICATIVA

Em breve, missões tripuladas à Lua serão, novamente, realizadas. O próximo lançamento será realizado em setembro de 2025 e, dessa vez, contará com a presença de quatro astronautas (28). Voos espaciais induzem alterações fisiológicas importantes aos sistemas muscular e ósseo dos tripulantes (3,29,30), como já mencionado anteriormente. No pós-voo espacial, essas alterações afetam drasticamente a funcionalidade corporal e a saúde dos astronautas. O exercício físico é a principal contramedida utilizada para atenuar esses efeitos debilitantes da microgravidade, durante e pós-voo (31,32). Astronautas em missões de longa duração estarão em risco de problemas de saúde, comportamentais e físicos, devido à sua permanência prolongada em ambientes isolados e confinados. Sendo assim, esse

trabalho poderá contribuir para avanços não só no desenvolvimento de contramedidas para maior segurança da exploração aeroespacial, mas também para o desenvolvimento de protocolos de reabilitação para as pessoas na Terra.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Avaliar o impacto da hipogravidade simulada, através de uma esteira antigravitacional, na biomecânica da marcha.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Analisar como a esteira antigravitacional auxilia na reabilitação de lesões musculoesqueléticas de membros inferiores, tanto de pessoas na Terra como de astronautas no pós-voo espacial;
- Avaliar os efeitos da hipogravidade simulada na cinemática da marcha;
- Caracterizar os parâmetros da marcha em três ambientes (Terra, Lua e Marte);
- Identificar diferenças no padrão da marcha nesses ambientes.

2 MÉTODOS

Esse projeto foi dividido em duas etapas: a 1ª etapa foi o desenvolvimento de uma revisão sistemática da literatura e a 2ª etapa foi a realização de um estudo observacional transversal.

2.1 Etapa 1: Revisão Sistemática da Literatura

A primeira etapa desse trabalho consistiu na realização de uma revisão sistemática. Uma revisão sistemática da literatura é um estudo secundário, cujo objetivo é identificar, avaliar e interpretar estudos primários disponíveis e relevantes para uma questão de pesquisa específica, área ou fenômeno de interesse (33).

A revisão sistemática que foi desenvolvida seguiu as diretrizes do *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-analysis (PRISMA)* (34). O protocolo da revisão foi registrado na *International Prospective Register of Systematic Reviews (PROSPERO)*, com número de registro: CRD42022362770. O *checklist PRISMA* foi utilizado para auxiliar na escrita do artigo. A pesquisa teve como objetivo responder a seguinte questão norteadora: “Como a esteira antigravitacional *AlterG®* é capaz de auxiliar no processo de reabilitação de lesões musculoesqueléticas, de pessoas na Terra e de astronautas, no pós-voo espacial?”.

As bases de dados definidas para a realização das buscas foram *Medline/Pubmed, Embase, Virtual Health Library, Web of Science, ScienceDirect, Scopus e SPORTDiscus*. Foram aplicados filtros nas bases para título, resumo e palavras-chave, quando possível. Ademais, filtros para data de publicação foram aplicados para incluir apenas estudos publicados entre janeiro de 2017 e agosto de 2022. A expressão de busca utilizada foi:

(("anti-gravity treadmill" OR "lower body positive pressure" OR "alterg") AND rehabilitation)

Poucas *strings* foram utilizadas para compô-la para que houvesse um amplo retorno de artigos dentro do tema pesquisado, pois esse assunto ainda é pouco explorado. A última busca foi realizada em 24 de agosto de 2022. A seleção dos artigos identificados foi realizada de forma independente e cegada por duas autoras, utilizando o *website Rayyan* (35). Foram aplicados critérios de inclusão e exclusão, conforme detalhados na Tabela 1.

Tabela 1: Critérios de Elegibilidade.	
Critérios de Inclusão	Critérios de Exclusão
1. Uso da esteira antigravitacional.	1. Estudos que analisaram participantes com doenças neurológicas.
2. Estudo com delineamento de ensaio clínico randomizado.	2. Estudos de revisão, observacionais e capítulos de livros.
3. Estudos que analisaram participantes com lesões musculoesqueléticas de membros inferiores.	3. Estudos que não respondam à questão norteadora.
4. Estudos publicados entre janeiro de 2017 e agosto de 2022.	

A análise da qualidade foi realizada através da Escala *PEDro* (*Physiotherapy Evidence Database*) (36), na versão em português (Brasil). Essa escala é composta por 11 itens, os quais pontuam apenas quando o critério for claramente satisfatório. O item um da escala não pontua, dessa forma a pontuação máxima atribuída são 10 pontos. Os artigos deveriam atingir um escore mínimo de 5 pontos para seguir na revisão, ou seja, a pontuação média (em que se considera os estudos de moderada qualidade). A extração de dados foi realizada através de uma tabela *Excel*, elaborada pelas autoras. Os seguintes dados foram coletados: objetivo do estudo; população analisada; intervenção realizada; grupo controle; e desfechos encontrados. Ambas as etapas, a análise da qualidade e a extração de dados, foram realizadas por duas autoras, de forma independente e cegada, através de uma tabela *Excel*.

2.2 Etapa 2: Estudo Observacional Transversal

A segunda etapa consistiu no desenvolvimento de um estudo observacional transversal, que foi realizado em colaboração com a Universidade de Lisboa (ULisboa) e que foi aprovado pelo Conselho de Ética em Pesquisa da universidade, parecer CEIFMH N.º: 3/2023. O projeto também foi aprovado pela Comissão de Pesquisa da Universidade Federal de Ciências da Saúde de Porto Alegre (UFCSPA), registro nº: 608/2023. A coleta de dados foi realizada no Centro Desportivo Nacional do Jamor, em Lisboa. Ademais, o projeto está vinculado ao Núcleo de Pesquisa Espacial e Ambientes Extremos da UFCSPA e ao Centro de Estudos em Medicina Aeroespacial da ULisboa.

Inicialmente, pretendia-se utilizar um sistema de realidade virtual para intensificar a imersão nos ambientes de hipogravidade simulados. Entretanto, devido à intercorrências com o sistema e à problemas de sincronização com os demais equipamentos utilizados, optou-se por não o utilizar nesse trabalho.

2.2.1 População

Foram avaliados um total 13 alunos da Faculdade de Motricidade Humana e da Faculdade de Medicina da ULisboa, sendo 4 homens e 9 mulheres. O recrutamento dos participantes foi realizado por conveniência. Os voluntários deveriam ter entre 18 e 35 anos, possuir altura entre 1,55 e 1,75 metro (os níveis mínimos e máximos recomendados para a calibração da câmara da *AlterG*®, devido à altura das cristas ilíacas) e índice de massa corporal inferior a 30 kg/m². Os participantes responderam o *Physical Activity Readiness Questionnaire for Everyone (PAR-Q+)* (37), para verificar se estavam fisicamente aptos e para evitar condições que poderiam afetar a marcha. Foram excluídos aqueles que responderam “sim” a alguma das questões do *PAR-Q+*. Além disso, foram excluídos os indivíduos com histórico lesões musculoesqueléticas dos membros inferiores, com fraturas instáveis, trombose venosa profunda, hipotensão arterial, alterações cardiopulmonares e neurovestibulares, bem como quem estivesse em uso de medicamentos e/ou substâncias que pudessem alterar os sistemas corporais estudados. Todos os voluntários assinaram o Termo de Consentimento Livre e Esclarecido.

2.2.2 Hipogravidade Simulada

Os participantes foram avaliados durante a marcha em uma esteira antigravitacional, que aplica pressão positiva nos membros inferiores para reduzir o peso corporal. A esteira que foi utilizada é do modelo *AlterG VIA 400/400X Anti-Gravity Treadmill*® (38). Os participantes vestiram um *short* de *Neoprene* para acoplá-los ao *Cockpit* da esteira antigravitacional (39). Uma vez dentro da câmara, a pressão interna foi calibrada e ajustada para o nível que corresponde a 100% do peso corporal, gravidade terrestre, para dar início à coleta dos dados. Na sequência, a esteira foi ajustada para 38% (gravidade marciana) e 20% (gravidade lunar), voltando ao final do experimento a 100% do peso corporal. A velocidade foi padronizada em 3,2km/h, considerada uma velocidade de conforto para a população avaliada.

2.2.3 Avaliação

Os participantes foram equipados com o sistema *XSens™ Motion Capture MVN Analyze*, mostrado na Figura 1, compreendendo um traje de *lycra*, com 7 sensores de

unidade de medição inercial dispostos na parte inferior do corpo. Os sensores incorporam acelerômetros, giroscópios e magnetômetros, fornecendo orientação tridimensional com precisão. O sistema estima a orientação dos segmentos corporais e as mudanças de posição através da integração dos sinais do giroscópio e do acelerômetro, atualizando continuamente um modelo biomecânico de 23 segmentos do corpo humano com 22 articulações, corrigindo automaticamente desvios e outros erros. O sistema funciona em tempo real com taxa de atualização de 120 Hz. Os dados são capturados sem fio (via *Bluetooth™*) e transmitidos para o *software MVN Studio™*, que fornece funcionalidade para observar, gravar e exportar em 3 dimensões (40). Os dados foram normalizados para 100% do ciclo da marcha, através do *software Visual 3D (Visual 3D™ Professional v5.01.18.C_Motion, Inc)*. Procedimentos de calibração foram realizados para alinhar os sensores com o corpo e determinar o comprimento do segmento. Os sensores foram colocados bilateralmente sobre o peito do pé, sobre a tuberosidade anterior da tíbia e lateralmente sobre o meio da coxa. O sensor final foi colocado sobre o sacro, centralizado no tubérculo de S2. Todos os sensores *XSens™* tiveram seu posicionamento assegurado através de tiras de *Neoprene*. Foram coletados parâmetros espaço-temporais da marcha (comprimento do passo, tempo total do ciclo, tempo do passo, duração das fases de apoio e balanço, cadência e passadas por minuto), bem como variáveis cinemáticas tridimensionais dos deslocamentos angulares de cada articulação (tornozelo, joelho e quadril), nos três planos de movimento (sagital, frontal e transversal).

2.2.4 Procedimentos

Inicialmente, foram coletados os dados antropométricos dos participantes, aplicados os questionários e realizada a assinatura do Termo de Consentimento Livre e Esclarecido. Após esse momento os participantes passaram pela fase de familiarização com os equipamentos e com o protocolo, em que foram explicadas informações referentes à coleta, como: a posição em que deveriam efetuar o teste, as indicações de segurança, a velocidade da marcha, a duração da coleta e os critérios de execução que pudessem comprometer os dados. Nesse momento, os participantes

experimentaram caminhar na *AlterG®* em diferentes níveis de hipogravidade antes de dar início à coleta.

Depois da familiarização deu-se início ao teste da marcha, em que os participantes caminharam cerca de 3 minutos em cada ambiente (Terra, Marte, Lua e Terra final), sendo que no período intermediário de cada ambiente foi adicionada uma inclinação de 4% a esteira antigravitacional. Os dados foram coletados durante 30 segundos sem e com inclinação, apenas Terra final que não foi aplicada inclinação. Sendo assim, os dados foram coletados em sete momentos distintos: Terra, Terra 4%, Marte, Marte 4%, Lua, Lua 4% e Terra final.

O relato do nível de percepção de esforço foi solicitado aos participantes através da *Escala de Borg* modificada (41), considerando uma escala de zero (nenhum esforço) a 10 (esforço máximo).

2.2.5 Processamento dos Dados

Os dados coletados através do *XSens* foram transmitidos do *software MVN Studio™* para o *Visual 3D*, onde foram normalizados para 100% do ciclo da marcha. Assim, foi possível gerar planilhas *Excel* com os dados individuais de cada voluntário. Usando a linguagem de programação *Python*, foi possível organizar os dados da seguinte forma: o *Python* gerou arquivos *zip* com os dados separados por voluntário, articulação e patamar (dentro de cada arquivo, X, Y, Z, que são os movimentos tridimensionais articulares), com média, desvio padrão, mínimo, máximo e amplitude de movimento (ADM), para todos os ciclos da marcha coletados no *XSens*. Dos valores mínimos gerados pelo *Python*, foi identificado o mínimo do mínimo de todos os ciclos e dos valores máximos foi identificado o máximo do máximo de todos os ciclos. Assim, chegando no valor da ADM total percorrida por cada articulação e cada movimento (X, Y, Z) no tempo de coleta dos dados. Os dados espaço-temporais foram exportados direto do *Visual 3D* e processados através de planilhas *Excel*.

2.2.6 Análise Estatística

Os resultados foram apresentados em mediana e intervalo interquartil (IQR). A normalidade foi verificada pelo teste *Shapiro-Wilk*. Para a comparação dos ambientes foi aplicado o teste de *Friedman* com correção de *Bonferroni* para as comparações múltiplas. O nível de significância adotado foi de 0,05 e as análises foram realizadas através do *software* estatístico *SPSS (IBM SPSS Statistics for Windows, Version 25.0. Armonk, NY: IBM Corp.)*.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A primeira etapa desse trabalho analisou como a esteira antigravitacional auxilia na reabilitação de lesões musculoesqueléticas de membros inferiores. A partir disso, procurou-se entender o impacto da esteira antigravitacional nas variáveis biomecânicas e funcionais e a sua aplicação diária na população terrestre e em astronautas pós-voo espacial. Portanto, na segunda etapa o objetivo foi avaliar os efeitos da hipogravidade simulada na cinemática da marcha. A intenção foi observar as alterações na marcha desencadeadas pela hipogravidade simulada, através do uso da *AlterG®*, visto que missões à Lua e a Marte preveem uma permanência prolongada nesses ambientes. Dessa forma, contramedidas eficientes serão necessárias para diminuir os efeitos da hipogravidade no corpo humano.

Os estudos incluídos na revisão sistemática analisaram desfechos relacionados a dor, funcionalidade (através de questionários e escalas), amplitude de movimento, força muscular e análise da marcha. Sobre o desfecho dor, *Chen et al* (2021)(22) demonstraram reduções significativas da dor em ambos grupos, intervenção e controle. Esses achados são condizentes com outros estudos (42–44) que evidenciam redução da dor no joelho e quadril em pacientes com osteoartrose, que realizaram o uso da *AlterG®*. Além disso, *Kim et al* (2019) (45) relacionaram o aumento do suporte de peso com a diminuição da dor em pacientes pós-cirúrgico de artroplastia total de joelho.

Sobre a função muscular, de indivíduos com lesões de membros inferiores, os resultados da revisão sistemática mostram melhora significativamente superior, das medidas da circunferência da coxa, no grupo intervenção em comparação ao controle (24,25). Além de a força isocinética de extensores de quadril e a atividade elétrica dos

músculos glúteo médio e glúteo máximo também apresentarem melhores resultados no grupo intervenção (26). Aparentemente, existe uma relação entre o aumento da velocidade da esteira antigravitacional e maiores mudanças na eletromiografia de todos os músculos examinados (46). Em indivíduos hígidos, a *AlterG*® acaba induzindo reduções na atividade muscular de membros inferiores (47,48).

Os aspectos avaliados sobre a cinemática da marcha demonstraram resultados significativos a favor do uso da esteira antigravitacional em pacientes com lesões de joelho (22), apresentando melhoras na velocidade da marcha e comprimento da passada durante a caminhada na *AlterG*®. Além disso, reforça o fato de que a *AlterG*® possibilita o retorno a um padrão da marcha mais próximo ao normal após a intervenção (42,49). Ademais, o uso da *AlterG*® não foi associado a mudanças drásticas na cinemática da marcha, em resposta à redução do peso corporal, em mulheres com osteoartrose de quadril (44).

Há evidências controversas em relação à ADM, estudos relataram melhoras da ADM em pacientes com osteoartrose e pós-cirúrgico de fraturas (22,24). Entretanto, há estudos que não apresentaram diferenças significativas na ADM após o tratamento (42,43). *Vincent et al* (2022) (50) indicam a ocorrência da diminuição da ADM de joelho e tornozelo durante o exercício em esteiras antigravitacionais. Resultados semelhantes foram encontrados no estudo transversal desenvolvido nesse trabalho.

Na segunda etapa desse trabalho realizou-se um estudo observacional transversal, que investigou os efeitos da hipogravidade simulada na cinemática da marcha, caracterizando os parâmetros da marcha em sete momentos (Terra, Terra 4%, Marte, Marte 4%, Lua, Lua 4% e Terra final). Os resultados mostraram que as alterações cinemáticas da marcha são diretamente proporcionais a exposição à hipogravidade, apresentando diferenças principalmente entre os três ambientes da Terra comparados aos dois ambientes da Lua. O que difere dos dados apresentados na revisão sistemática é que foram analisados indivíduos com lesões de membros inferiores, durante o processo de reabilitação. Na reabilitação, a intenção é regularizar o mais rápido possível a marcha do paciente, para que ele possa retornar as suas atividades. Já durante uma simulação da hipogravidade, com indivíduos hígidos, o estímulo é diferente, com descarga corporal, muitas vezes, maiores.

Os resultados do estudo transversal não apresentaram diferença significativa na duração do ciclo da marcha entre ambientes. Provavelmente, devido a distribuição anormal dos dados e a heterogeneidade da amostra. A suspensão do peso corporal é outro método muito utilizado para simular a hipogravidade, estudos que experimentaram esse método mostraram um aumento significativo na duração do ciclo da marcha (15,20), na gravidade lunar.

Um fato, é que a descarga de peso corporal aumenta o tempo da fase de balanço, dado que foi identificado no estudo transversal, desenvolvido nesse trabalho, e em uma revisão sistemática (20). *MacLean e Ferris (2021)*, não encontraram efeito significativo do nível de gravidade simulada no comprimento do passo e da passada, mas identificaram que o comprimento da passada aumentou com a velocidade da caminhada (51). Corroborando com *Donelan e Kram (1997)* (52), que descobriram que a influência da velocidade no comprimento da passada é mais forte do que o nível de gravidade.

Essas descobertas são úteis para compreender as implicações da caminhada em hipogravidade simulada para a reabilitação. As técnicas utilizadas para simular a hipogravidade e seus efeitos na locomoção humana fornecem novos *insights* sobre a compreensão dos efeitos fisiológicos da gravidade. A redução das forças de reação do solo e da sobrecarga articular é benéfica para pacientes com osteoartrose (22,44,53), com próteses articulares (54) e com fraturas de membros inferiores (24,25,49). Além disso, a *AlterG®* mostrou benefícios na capacidade de locomoção de pacientes com condições neurológicas, como paralisia cerebral e acidente vascular cerebral (51,55–57). Entretanto, os autores mencionam a necessidade de mais estudos para definir o papel desse dispositivo como uma alternativa ou complemento aos protocolos de reabilitação estabelecidos. O conhecimento do padrão exato da marcha durante o uso *AlterG®* será fundamental para planejar o treinamento locomotor adaptado ao paciente, permitindo alcançar com mais precisão as necessidades individuais durante a reabilitação.

Ressalta-se que o uso da *AlterG®* deve ser focado na reabilitação de condições que necessitam a redução de impacto, com conservação do gasto energético e do condicionamento aeróbico. Portanto, a redução do peso corporal permite o aumento da velocidade (e do esforço metabólico) enquanto minimiza-se a carga sobre os

membros inferiores. Em concordância, a revisão sistemática de *Farina et al* (2016) (58) descreve como o treino em esteira antigravitacional permite aos indivíduos atingirem limiares de atividade metabólica com menor exigência do sistema musculoesquelético. A esteira antigravitacional apresenta diversas repercussões que não exclusivamente a redução do impacto, como mudanças na biomecânica da marcha e no padrão de ativação neuromuscular (58).

A microgravidade pode causar efeitos semelhantes aos do imobilismo após fraturas, como a redução da função muscular (29), bem como desencadear quadros de dor, como dor lombar (59). Esses cenários exigem condicionamento físico para recuperar as funções perdidas. Além disso, é importante destacar que os astronautas estão sob alto risco de dor e lesões musculoesqueléticas nos primeiros momentos após retornarem à gravidade terrestre (60).

Nesse sentido, a esteira antigravitacional pode ser uma ferramenta útil no processo de condicionamento e retorno à marcha funcional após voos espaciais de longa duração. Embora mais pesquisas sejam necessárias para investigar especificamente os efeitos da esteira antigravitacional em astronautas, os conhecimentos e resultados obtidos com a reabilitação na Terra podem fornecer *insights* valiosos para futuros estudos e aplicações no contexto espacial. No estudo de caso apresentado por *Petersen et al* (2017) (61), a *AlterG®* se mostrou parte do protocolo de condicionamento pós-voo, a partir do sexto dia após a aterrissagem.

De acordo com os achados da revisão sistemática realizada, os efeitos acima também serão aplicáveis aos astronautas e estudos disponíveis explicitam as suas dificuldades de retorno a atividades funcionais pós-voo (61,62). Desse modo, a *AlterG®* poderá fornecer uma exposição gradual à gravidade terrestre, com menor impacto no sistema musculoesquelético. Além disso, o exercício na esteira antigravitacional apresenta vantagens, em comparação à esteira clássica, pois tem mostrado manter o equilíbrio de oxidação do organismo, necessário para evitar mais declínio muscular (63), que já ocorre durante o longo período de exposição à microgravidade.

As limitações desse trabalho incluem a quantidade reduzida de estudos recentes sobre o tema, além da moderada qualidade deles, incluídos na revisão sistemática. Outra grande limitação é que não foram encontrados estudos experimentais que avaliassem o uso da esteira antigravitacional na reabilitação pós-

voo espacial. Também ocorrem controvérsias entre os estudos incluídos na revisão, em relação a diferentes populações, demonstrando a necessidade de mais pesquisas sobre o tema.

Além disso, a própria esteira antigravitacional pode apresentar inconsistências de acordo com seu modo de fixação e posição do suporte, sendo uma limitação do estudo transversal. Isso pode ter afetado as estratégias de movimento dos participantes. Outra limitação são as diferenças interindividuais, que podem ter ocorrido devido a heterogeneidade dos dados antropométricos e de gênero dos participantes. Estudos futuros devem realizar uma distribuição mais homogênea da amostra. Esse trabalho reconhece suas limitações e recomenda que estudos semelhantes sejam realizados, devido ao baixo volume de dados sobre o assunto.

4 CONCLUSÃO

O uso da *AlterG*® mostrou resultados promissores na reabilitação e no retorno às atividades funcionais de pacientes com osteoartrose, fraturas e após cirurgia de quadril. Os principais desfechos analisados foram a dor, quadro funcional, análise da marcha e a função muscular. Inclusive, nenhum estudo citou efeitos adversos associados a *AlterG*®, sugerindo segurança do seu uso durante os tratamentos. Não foram encontrados estudos que avaliassem o uso da esteira antigravitacional no condicionamento pós-voo espacial, apesar de existirem possíveis efeitos positivos. São necessários mais estudos de qualidade sobre o assunto.

A *AlterG*® também mostrou desempenhar um papel importante na simulação da hipogravidade. Os resultados demonstram que as alterações cinemáticas da marcha são diretamente proporcionais a exposição à hipogravidade, apresentando diferenças principalmente entre os três ambientes da Terra comparados aos dois ambientes da Lua. Espera-se que um melhor entendimento da cinemática da marcha em hipogravidade simulada colabore para o desenvolvimento de contramedidas eficazes e inovadoras para a reabilitação da marcha e para a exploração humana do espaço. Além disso, poderá fornecer novos *insights* sobre a compreensão dos efeitos fisiológicos da hipogravidade.

5 REFERÊNCIAS

1. Dufour M, Pillu M. Biomecânica Funcional - Membros, Cabeça, Tronco. 1º ed. Barueri - São Paulo: Manole; 2016. 0–582 p.
2. Stein TP. Weight, muscle and bone loss during space flight: Another perspective. *Eur J Appl Physiol*. 2013;113(9):2171–81.
3. Gopalakrishnan R, Genc KO, Rice AJ, Lee SMC, Evans HJ, Maender CC, et al. Muscle volume, strength, endurance, and exercise loads during 6-month missions in space. *Aviat Sp Environ Med*. 2010;81(2):91–102.
4. Leblanc A, Rowe R, Schneider V, Evans H, Hedrick T. Regional muscle loss after short duration spaceflight. *Aviat Sp Environ Med*. 1995;66(12):1151–4.
5. AKIMA H, KAWAKAMI Y, KUBO K, SEKIGUCHI C, OHSHIMA H, MIYAMOTO A, et al. Effect of short-duration spaceflight on thigh and leg muscle volume. *Off J Am Coll Sport Med*. 2000;1743–7.
6. Fitts RH, Trappe SW, Costill DL, Gallagher PM, Creer AC, Colloton PA, et al. Prolonged space flight-induced alterations in the structure and function of human skeletal muscle fibres. *J Physiol*. 2010;588(18):3567–92.
7. Edgerton VR, Zhou M, Ohira Y, Bell G, Harris B, Saltin B, et al. Human fiber size and enzymatic after 5 and 11 days of spaceflight properties. *J Appl Physiol*. 1995;78(5):1733–9.
8. Hides JA, Lambrecht G, Stanton WR, Damann V. Changes in multifidus and abdominal muscle size in response to microgravity: possible implications for low back pain research. *Eur Spine J*. 2016;25:175–82.
9. Koryak YA. Changes in human skeletal muscle architecture and function induced by extended spaceflight. *J Biomech* [Internet]. 2019;97:109408. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2019.109408>
10. Tanaka K, Nishimura N, Kawai Y. Adaptation to microgravity, deconditioning, and countermeasures. *J Physiol Sci*. 2017;67(2):271–81.
11. Smith SM, Wastney ME, O'Brien KO, Morukov B V., Larina IM, Abrams SA, et al. Bone markers, calcium metabolism, and calcium kinetics during extended-duration space flight on the Mir Space Station. *J Bone Miner Res*. 2005;20(2):208–18.
12. Hargens AR, Bhattacharya R, Schneider SM. Space physiology VI: Exercise, artificial gravity, and countermeasure development for prolonged space flight. *Eur J Appl Physiol*. 2013;113(9):2183–92.
13. Lang T, LeBlanc A, Evans H, Lu Y, Genant H, Yu A. Cortical and trabecular bone mineral loss from the spine and hip in long-duration spaceflight. *J Bone Miner Res*. 2004;19(6):1006–12.
14. Sibonga JD, Evans HJ, Sung HG, Spector ER, Lang TF, Oganov VS, et al. Recovery of spaceflight-induced bone loss: Bone mineral density after long-duration missions as fitted with an exponential function. *Bone*. 2007;41(6):973–8.

15. Sylos-Labini F, Ivanenko YP, Cappellini G, Portone A, Maclellan MJ, Lacquaniti F. Changes of gait kinematics in different simulators of reduced gravity. *J Mot Behav*. 2013;45(6):495–505.
16. Orr S, Casler J, Rhoades J, de León P. Effects of walking, running, and skipping under simulated reduced gravity using the NASA Active Response Gravity Offload System (ARGOS). *Acta Astronaut*. 2022;197(March):115–25.
17. Schlabs T, Rosales-Velderrain A, Ruckstuhl H, Stahn AC, Hargens AR. Comparison of cardiovascular and biomechanical parameters of supine lower body negative pressure and upright lower body positive pressure to simulate activity in 1/6 G and 3/8 G. *J Appl Physiol*. 2013;115(2):275–84.
18. Morey-Holton ER, Whalen RT, Arnaud SB, Meulen MC. The Skeleton and its Adaptation to Gravity. In: *Comprehensive Physiology*. 1996. p. 691–719.
19. Watenpaugh DE, Hargens AR. The Cardiovascular System in Microgravity. In: *Comprehensive Physiology*. 1996. p. 631–74.
20. Richter C, Braunstein B, Winnard A, Nasser M, Weber T. Human biomechanical and cardiopulmonary responses to partial gravity - A systematic review. *Front Physiol*. 2017;8(AUG).
21. AlterG. Our story - AlterG [Internet]. [citado 20 de novembro de 2022]. Available at: <https://alterg.com/our-story>
22. Chen HX, Zhan YX, Ou HN, You YY, Li WY, Jiang SS, et al. Effects of lower body positive pressure treadmill on functional improvement in knee osteoarthritis: A randomized clinical trial study. *World J Clin Cases*. 2021;9(34):10604–15.
23. Brown J, Larsen B, Jacofsky MC, Ph D, Neal D, Brooks K. Traditional Rehabilitation versus AlterG Anti-Gravity Treadmill ® Following Anterior Cruciate Ligament Reconstruction : Clinical Outcomes from a Randomized Controlled Study [Internet]. *ACLS Rev. A*. 2015 [citado 15 de janeiro de 2022]. Available at: <https://www.alterg.com/wp-content/uploads/2019/12/ACL-Study-White-Paper.pdf>
24. Palke L, Schneider S, Karich B, Mende M, Josten C, Böhme J, et al. Anti-gravity treadmill rehabilitation improves gait and muscle atrophy in patients with surgically treated ankle and tibial plateau fractures after one year: A randomised clinical trial. *Clin Rehabil*. 2022;36(1):87–98.
25. Henkelmann R, Palke L, Schneider S, Müller D, Karich B, Mende M, et al. Impact of anti-gravity treadmill rehabilitation therapy on the clinical outcomes after fixation of lower limb fractures: A randomized clinical trial. *Clin Rehabil*. 2020;35(3):356–66.
26. Kim P, Lee H, Choi W, Jung S. Effect of 4 weeks of anti-gravity treadmill training on isokinetic muscle strength and muscle activity in adults patients with a femoral fracture: A randomized controlled trial. *Int J Environ Res Public Health*. 2020;17(22):1–9.
27. Debecker N, Luyten M, Vandenabeele F, Bellemans J. The effect of anti-gravity training after meniscal or chondral injury in the knee. A systematic review. *Acta*

- Orthop Belg [Internet]. 2020;86(3):422–33. Available at: <https://www.alterg.com/wp-content/uploads/2019/12/ACL-Study-White-Paper.pdf>
28. Hambleton K, Kraft R. NASA Shares Progress Toward Early Artemis Moon Missions with Crew - NASA [Internet]. NASA Web Site. 2024 [citado 7 de março de 2024]. Available at: <https://www.nasa.gov/news-release/nasa-shares-progress-toward-early-artemis-moon-missions-with-crew/>
 29. Comfort P, McMahon JJ, Jones PA, Cuthbert M, Kendall K. Effects of Spaceflight on Musculoskeletal Health : A Systematic Review and Meta - analysis, Considerations for Interplanetary Travel. Sport Med [Internet]. 2021;(0123456789). Available at: <https://doi.org/10.1007/s40279-021-01496-9>
 30. Ploutz-Snyder L, Ryder J, English K, Haddad F, Baldwin K, Caiozzo VJ, et al. Risk of Impaired Performance Due to Reduced Muscle Mass, Strength, and Endurance. 2015.
 31. Greenleaf JE, Bulbulian R, Bernauer EM, Haskell WL, Moore T. Exercise-training protocols for astronauts in microgravity. J Appl Physiol. 1989;67(6):2191–204.
 32. Scott JPR, Weber T, Green DA. Introduction to the frontiers research topic: Optimization of exercise countermeasures for human space flight – Lessons from terrestrial physiology and operational considerations. Front Physiol. 2019;10:1–8.
 33. Kitchenham BA, Budgen D, Brereton P. EVIDENCE-BASED SOFTWARE ENGINEERING AND SYSTEMATIC REVIEWS. 3ª. A Chapman & Hall Book. 2015.
 34. 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.
 35. Ouzzani M, Hammady H, Fedorowicz Z, Elmagarmid A. Rayyan-a web and mobile app for systematic reviews. Syst Rev [Internet]. 2016;5(1):1–11. Available at: <http://dx.doi.org/10.1186/s13643-016-0384-4>
 36. Shiwa SR, Costa LOP, Costa L da CM, Moseley A, Hespanhol Junior LC, Venâncio R, et al. Reproducibility of the Portuguese version of the PEDro Scale. Cad Saude Publica. 2011;27(10):2063–8.
 37. Schwartz J, Oh P, Takito MY, Saunders B, Dolan E, Franchini E, et al. Translation, Cultural Adaptation, and Reproducibility of the Physical Activity Readiness Questionnaire for Everyone (PAR-Q+): The Brazilian Portuguese Version. Front Cardiovasc Med. 2021;8(July):1–12.
 38. AlterG I. User Manual AlterG Anti-Gravity Treadmill ® Via 400 and 400X [Internet]. 2021. Available at: <https://www.alterg.com/wp-content/themes/alterg-child/PDFs/Manuals/AlterG-Via-400-User-Manual-000348-Rev-D.pdf>
 39. de Heer HD, Kaufman A, Repka CP, Rojas K, Charley B, Bounds R. AlterG Anti-Gravity Treadmill Accuracy of Unloading Is Affected by Support Frame Height. J Strength Cond Res. 2021;35(10):2910–4.

40. Roetenberg D, Luinge H, Slycke P. Xsens MVN: full 6DOF human motion tracking using miniature inertial sensors. Xsens Motion Technol BV, ... [Internet]. 2009;(February):1–7. Available at: http://www.xsens.com/images/stories/PDF/MVN_white_paper.pdf
41. Williams N. The Borg Rating of Perceived Exertion (RPE) scale. *Occup Med (Chic Ill)*. 2017;67(5):404–5.
42. Liang J, Guo Y, Zheng Y, Lang S, Chen H, You Y, et al. The lower body positive pressure treadmill for knee osteoarthritis rehabilitation. *J Vis Exp*. 2019;2019(149):1–8.
43. Liang J, Lang S, Zheng Y, Wang Y, Chen H. The effect of anti-gravity treadmill training for knee osteoarthritis rehabilitation on joint pain, gait, and EMG - Case report. *Medicine (Baltimore)*. 2019;18(December 2018).
44. Kataoka Y, Shimizu T, Takeda R, Tadano S, Saito Y, Osuka S, et al. Effects of unweighting on gait kinematics during walking on a lower-body positive-pressure treadmill in patients with hip osteoarthritis. *BMC Musculoskelet Disord*. 2021;22(1):1–9.
45. Kim BR, Kim SR, Nam KW, Lee SY, Park YG, Suh MJ, et al. Effects of body weight support and gait velocity via antigravity treadmill on cardiovascular responses early after total knee arthroplasty. *Med (United States)*. 2020;99(14):1–8.
46. Whiteley R, Hansen C, Thomson A, Sideris V, Wilson MG. Lower limb EMG activation during reduced gravity running on an incline. Speed matters more than hills irrespective of indicated bodyweight. *Gait Posture [Internet]*. 2021;83(September 2020):52–9. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2020.09.029>
47. Kristiansen M, Odderskær N, Kristensen DH. Effect of body weight support on muscle activation during walking on a lower body positive pressure treadmill. *J Electromyogr Kinesiol [Internet]*. 2019;48(March):9–16. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jelekin.2019.05.021>
48. Masumoto K, Soucy MT, Bailey JP, Mercer JA. Muscle activity during backward and forward running with body weight support. *Hum Mov Sci [Internet]*. 2017;55(February):276–86. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.humov.2017.08.015>
49. Kim JC, Leigh JH, Jang JY, Kim JK, Cho JW, Oh JK, et al. Early Quantitative Partial Weight-Bearing Exercise after Periarticular Fractures of the Tibia Using a Lower-Body Positive-Pressure Treadmill: A Case Series. *Am J Phys Med Rehabil*. 2020;99(7):E83–7.
50. Vincent HK, Madsen A, Vincent KR. Role of Antigravity Training in Rehabilitation and Return to Sport After Running Injuries. *Arthrosc Sport Med Rehabil [Internet]*. 2022;4(1):e141–9. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.asmr.2021.09.031>
51. MacLean MK, Ferris DP. Human muscle activity and lower limb biomechanics of overground walking at varying levels of simulated reduced gravity and gait

- speeds. PLoS One [Internet]. 2021;16(7 July):1–23. Available at: <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0253467>
52. Donelan JM, Kram R. The effect of reduced gravity on the kinematics of human walking: A test of the dynamic similarity hypothesis for locomotion. *J Exp Biol.* 1997;200(24):3193–201.
 53. Peeler J, Leiter J, MacDonald P. Effect of Body Weight-Supported Exercise on Symptoms of Knee Osteoarthritis: A Follow-up Investigation. *Clin J Sport Med.* 2020;30(6):e178–85.
 54. Bugbee WD, Pulido PA, Goldberg T, D’Lima DD. Use of an Anti-Gravity Treadmill for Early Postoperative Rehabilitation After Total Knee Replacement: A Pilot Study to Determine Safety and Feasibility. *Am J Orthop (Belle Mead NJ).* 2016;45(4):E167–73.
 55. Azizi S, Birgani PM, Irani A, Shahrokhi A, Nourian R, Mirbagheri MM. Impact of anti-gravity locomotion (AlterG) training on structure and function of corticospinal tract and gait in children with cerebral palsy *. *Proc Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc EMBS.* 2019;(November):126–9.
 56. Azizi S, Marzbani H, Raminfard S, Birgani PM, Rasooli AH, Mirbagheri MM. The impact of an anti-gravity treadmill (AlterG) training on walking capacity and corticospinal tract structure in children with cerebral palsy. *Proc Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc EMBS.* 2017;(February 2018):1150–3.
 57. Calabrò RS, Billeri L, Andronaco VA, Accorinti M, Milardi D, Cannavò A, et al. Walking on the Moon: A randomized clinical trial on the role of lower body positive pressure treadmill training in post-stroke gait impairment. *J Adv Res.* 2020;21:15–24.
 58. Farina KA, Wright AA, Ford KR, Wirfel LA, Smoliga JM. Physiological and Biomechanical Responses to Running on Lower Body Positive Pressure Treadmills in Healthy Populations. *Sport Med.* 2016;47(2):261–75.
 59. Pool-Goudzwaard AL, Belavý DL, Hides JA, Richardson CA, Snijders CJ. Low back pain in microgravity and bed rest studies. *Aerosp Med Hum Perform.* 2015;86(6):541–7.
 60. Lambrecht G, Petersen N, Weerts G, Pruett C, Evetts S, Stokes M, et al. The role of physiotherapy in the European Space Agency strategy for preparation and reconditioning of astronauts before and after long duration space flight. *Musculoskelet Sci Pract [Internet].* 2017;27:S15–22. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.math.2016.10.009>
 61. Petersen N, Lambrecht G, Scott J, Hirsch N, Stokes M, Mester J. Postflight reconditioning for European Astronauts – A case report of recovery after six months in space. *Musculoskelet Sci Pract [Internet].* 2017;27:S23–31. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.msksp.2016.12.010>
 62. Mulavara AP, Peters BT, Miller CA, Kofman IS, Reschke MF, Taylor LC, et al. Physiological and Functional Alterations after Spaceflight and Bed Rest. *Med Sci Sports Exerc [Internet].* 2018;50(9):1961–80. Available at: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0->

85051589658&doi=10.1249%2FMSS.0000000000001615&partnerID=40&md5=4b9c2896ff9ea5dbf9d5943c640ea64b

63. Sielski L, Sutkowy P, Skopowska A, Pawlak-Osińska K, Augustyńska Z, Hewelt K, et al. The oxidant-antioxidant equilibrium and inflammatory process indicators after an exercise test on the Alterg antigravity treadmill in young amateur female athletes. *Oxid Med Cell Longev*. 2018;2018.

ANEXOS

Anexo 1 – Questionário de Prontidão para Atividade Física para Todos (PAR-Q+)

PARQ-short em PT

Código participante: _____

Questionário de Prontidão para Atividade Física (PAR-Q)

Este questionário tem o objetivo de identificar a necessidade de avaliação por um médico antes do início da atividade física. Caso você responda "SIM" a uma ou mais perguntas, converse com seu médico ANTES de aumentar seu nível atual de atividade física. Mencione este questionário e as perguntas às quais você respondeu "SIM".

Por favor, assinale "SIM" ou "NÃO" às seguintes perguntas:

1. Algum médico já disse que você possui algum problema de coração e que só deveria realizar atividade física supervisionado por profissionais de saúde?
☐ Sim ☐ Não
2. Você sente dores no peito quando pratica atividade física?
☐ Sim ☐ Não
3. No último mês, você sentiu dores no peito quando praticou atividade física?
☐ Sim ☐ Não
4. Você apresenta desequilíbrio devido à tontura e/ ou perda de consciência?
☐ Sim ☐ Não
5. Você possui algum problema ósseo ou articular que poderia ser piorado pela atividade física?
☐ Sim ☐ Não
6. Você toma atualmente algum medicamento para pressão arterial e/ou problema de coração?
☐ Sim ☐ Não
7. Sabe de alguma outra razão pela qual você não deve praticar atividade física?
☐ Sim ☐ Não

Nome completo _____ Idade: _____

Data _____ Assinatura: _____

Se você respondeu "SIM" a uma ou mais perguntas, leia e assine o "Termo de Responsabilidade para Prática de Atividade Física"

Termo de Responsabilidade para Prática de Atividade Física

Estou ciente de que é recomendável conversar com um médico antes de aumentar meu nível atual de atividade física, por ter respondido "SIM" a uma ou mais perguntas do "Questionário de Prontidão para Atividade Física" (PAR-Q). Assumo plena responsabilidade por qualquer atividade física praticada sem o atendimento a essa recomendação.

Nome completo _____

Data _____ Assinatura: _____

Anexo 2 – Termo de Consentimento Livre e Esclarecido – Modelo ULisboa



CONSELHO DE ÉTICA DA FACULDADE DE MOTRICIDADE HUMANA

CONSENTIMENTO INFORMADO LIVRE E ESCLARECIDO PARA INVESTIGAÇÃO CIENTÍFICA COM SERES HUMANOS

Título do projeto ou estudo: Biomechanical characterization of the gait pattern of healthy adults under different hypogravity conditions in a virtual reality environment

CÓDIGO PARTICIPANTE: _____

Equipa de investigação

Thaís Russomano: PhD | Centro de Estudos de Medicina Aeroespacial, FMUL, ULisboa | King's College London
Edson Oliveira: PhD | Centro de Estudos de Medicina Aeroespacial, FMUL, ULisboa
Juliana Herbert: PhD | Universidade Federal de Ciências da Saúde de Porto Alegre, Porto Alegre, Brasil
Nelson Vinagre: PhD | Centro de Estudos de Medicina Aeroespacial, FMUL, ULisboa
Filipa João: PhD | CIPER, Faculdade de Motricidade Humana, ULisboa
Duarte Conchinhas: aluno de mestrado, Faculdade de Motricidade Humana, ULisboa
Kalanna Louise: aluna de mestrado, Universidade Federal de Ciências da Saúde de Porto Alegre, Porto Alegre, Brasil
Rosirene Gessinger: MSc | Universidade Federal de Ciências da Saúde de Porto Alegre, Porto Alegre, Brasil

Instituições de acolhimento:

Faculdade de Motricidade Humana, Universidade de Lisboa (FMH-ULisboa)
 Centro de Estudos de Medicina Aeroespacial (CEMA) - Faculdade de Medicina, Universidade de Lisboa (FM-UL)

Este documento, designado **Consentimento, Informado, Livre e Esclarecido**, contém informação importante em relação ao estudo para o qual foi abordado/a, bem como o que esperar se decidir participar no mesmo. Leia atentamente toda a informação aqui contida. Deve sentir-se inteiramente livre para colocar qualquer questão, assim como para discutir com terceiros (amigos, familiares) a decisão da sua participação neste estudo.

Informação geral
A exposição prolongada a ambiente de hipogravidade gera fraqueza muscular e eleva o risco de queda e de lesão. É escassa a informação acerca do padrão de marcha neste contexto, o que coloca questões importantes na exploração espacial por parte do ser humano. No sentido de contribuir para esta temática, este estudo tem como principal objetivo avaliar a biomecânica do padrão de marcha de adultos saudáveis perante diferentes condições de hipogravidade simulada (20%; 38% que se assemelham às gravidades marciana e lunar, respetivamente), comparando-as com a gravidade terrestre.

Qual a duração esperada da minha participação?
A duração esperada para efetuar todos os procedimentos necessários à realização desta investigação será de 3 sessões realizadas com um intervalo de 7 dias entre elas. Primeiramente será realizada uma sessão de familiarização e posteriormente serão realizadas 2 sessões de teste. Cada sessão irá demorar aproximadamente 60 minutos por participante.
Quais os procedimentos do estudo em que vou participar?
O presente estudo é composto por 3 sessões onde terá que realizar marcha numa passarela rolante anti-gravidade (AlterG®) utilizando um sistema de óculos de realidade virtual. Ser-lhe-ão colocados sensores inerciais para medir a cinemática da marcha, bem como sensores de eletromiografia para medir a ativação muscular dos membros inferiores. Duas sessões de testes serão posteriormente realizadas, com um intervalo de 7 dias entre elas, nas quais os participantes irão realizar a prova de marcha, de forma a determinar a reprodutibilidade intra e inter-sessão de cada medida recolhida e aferir o impacto da diminuição do peso no padrão biomecânico e de ativação muscular no ciclo da marcha. <u>Sessão 1</u> (Familiarização): esta sessão tem como objetivo familiarizar o participante com o protocolo, recolher parâmetros antropométricos (massa, altura, % massa gorda, perímetros da anca e coxa, comprimento do pé, perna e coxa) e preencher dois questionários. Ser-lhe-á explicada a posição em que deverá efetuar o teste, as indicações de segurança, o número de condições de teste, a velocidade de marcha, a duração de cada sessão e os critérios de execução subjacentes à exclusão e repetição da prova. Nesta sessão irá experimentar caminhar no Alter-G, com diferentes níveis de hipogravidade. De seguida irá experimentar utilizar uns óculos de realidade virtual (RV) que simulam o ambiente visual da Lua e de Marte. Por fim, experimentará caminhar novamente no Alter-G utilizando em simultâneo os óculos de RV. Em todas estas condições ser-lhe-á perguntado como se sente. <u>Sessão 2</u> (Teste de marcha): nesta sessão irá realizar a marcha em diferentes condições de microgravidade, utilizando em simultâneo os óculos de RV. A sequência de ambientes será aleatória, podendo realizar uma das seguintes: T-M-L-T, T-L-M-T, M-T-L-T ou L-T-M-T, onde T é Terra, M é Marte, e L é Lua. Terá que caminhar durante 10 minutos em cada condição de gravidade, de forma consecutiva, à velocidade constante de 3.2km/h. Em cada ambiente gravítico, dentro dos 10 minutos, 2 deles serão a caminhar com uma inclinação de 4% na passarela e será avisado antes desse momento acontecer. <u>Sessão 3</u> (Re-teste de marcha): nesta sessão irá realizar o mesmo teste realizado na sessão anterior. Através deste estudo serão avaliadas variáveis cinemáticas tridimensionais, parâmetros espaço-temporais e ativações musculares do membro inferior.
A minha participação é voluntária?
A sua participação é voluntária e pode recusar-se a participar. Caso decida participar neste estudo é importante ter conhecimento que pode desistir a qualquer momento, sem qualquer tipo de consequência para si. No caso de decidir abandonar o estudo, a sua relação com a Faculdade de Motricidade Humana (FMH), Faculdade de Medicina (FMUL) e o Centro de Estudos de Medicina Aeroespacial (CEMA), não será afetada. Se for o caso, o seu estatuto enquanto estudante ou funcionário de qualquer uma destas instituições será mantido e não sofrerá nenhuma consequência da sua não-participação ou desistência. A sua participação não conduzirá a qualquer gratificação ou benefício desportivo, pessoal, ou profissional, assim como uma eventual recusa ou abandono não terá qualquer consequência para si.

Quais os possíveis benefícios da minha participação?
Ao participar neste estudo terá a possibilidade de contribuir para a produção de conhecimento científico, experienciar e colaborar num projeto de investigação científica e ter contacto com metodologias inovadoras. Para além disso, poderá conhecer melhor o seu estado atual de padrão de marcha, pois ser-lhe-á fornecido um relatório detalhado com os resultados da avaliação. Este consistirá na avaliação do seu padrão de locomoção e ativação muscular.
Quais os possíveis riscos da minha participação?
As avaliações e tarefas motoras solicitadas na realização do teste em qualquer uma das condições, não envolvem atividade física de elevado risco, pelo que a probabilidade de sofrer danos físicos é mínima. Poderá sentir um ligeiro desconforto muscular durante a utilização da passadeira, associado às condições de menor peso, que ocorrerá somente no período de transição entre diferentes gravidades. Existem apenas contra-indicações para pessoas que previamente tenham fraturas instáveis, trombose venosa profunda, hipotensão arterial ou outras alterações cardiovasculares.
Quem assume a responsabilidade, no caso de um evento negativo?
O laboratório e os seus técnicos rejeitam qualquer responsabilidade por lesões ou acidentes que possam ocorrer, bem como pelos seus efeitos ou consequências, cuja causa não seja atribuível a manifestos erros ou omissões de ordem técnica na aplicação das recolhas. A assinatura deste termo de consentimento implica a aceitação expressa desta limitação de responsabilidade.
Há cobertura por uma companhia de seguros?
Não.
Quem deve ser contactado em caso de urgência?
Nome da pessoa a contactar: _____ Idade da pessoa a contactar: _____ Grau de parentesco relativamente ao participante no estudo: _____ Contacto telefónico: _____
Como é assegurada a confidencialidade dos dados?
Os dados do presente estudo serão confidenciais, sendo atribuído um código a cada pessoa para identificar a sua avaliação no momento de análise dos dados. Não haverá qualquer referência ao nome de nenhum participante, ou outro elemento de identificação.
O que acontecerá aos dados quando a investigação terminar?
Os dados serão tratados e darão lugar a um relatório personalizado de avaliação. Este relatório será fornecido ao participante. Os dados resultantes da avaliação serão posteriormente armazenados e encriptados num servidor próprio, no Laboratório de Biomecânica da FMH, de acordo com a lei europeia de proteção de dados.
Como irão os resultados do estudo ser divulgados e com que finalidades?
A informação recolhida pode vir a ser utilizada no futuro por razões estatísticas ou científicas, mantendo-se a confidencialidade dos dados. Com a informação recolhida, poderão vir a ser produzidas teses de mestrado e publicados artigos técnicos e/ou científicos em revistas de impacto nacional e/ou internacional na área do treino e/ou da investigação. Em qualquer dos casos, será sempre garantido o anonimato dos participantes.

Em caso de dúvidas quem devo contactar?

Para qualquer questão relacionada com a sua participação neste estudo, por favor, contactar:
 Duarte Conchinhas: 910 973 560. Email: duarte.conchinhas@gmail.com
 Filipa João: filipa.joao@fmh.ulisboa.pt

Assinatura do Consentimento Informado, Livre e Esclarecido

Li (ou alguém leu para mim) o presente documento e estou consciente do que esperar quanto à minha participação no estudo "Caracterização biomecânica do padrão de marcha de adultos saudáveis perante diferentes condições de hipogravidade". Tive a oportunidade de colocar todas as questões e as respostas esclareceram todas as minhas dúvidas. Assim, aceito voluntariamente participar neste estudo. Foi-me dada uma cópia deste documento.

Nome do participante

Assinatura do participante

Data

Investigador/Equipa de Investigação

Os aspetos mais importantes deste estudo foram explicados ao participante ou ao seu representante, antes de solicitar a sua assinatura. Uma cópia deste documento ser-lhe-á fornecida.

Nome da pessoa que obtém o consentimento

Assinatura da pessoa que obtém o consentimento

Data

Anexo 3 – Registro do Projeto no Conselho de Ética da ULisboa



Conselho de Ética
para a Investigação

MEMBROS

Maria Helena Santa Clara Pombo Rodrigues - Presidente
António José Marques dos Santos - Vice-Presidente
Ana Isabel Amaral Nascimento Rodrigues de Melo
Fernando Manuel da Cruz Duarte Pereira
Filipa Oliveira da Silva João
João Manuel Fardel Banciras
Pedro Jorge Moreira da Parrot Morato
António Fernando Boleto Rosado - Suplente

Para:

Prof^a Doutora Filipa João
Faculdade de Motricidade Humana

Data: 27 de março de 2023

Projeto: "Projeto Biomechanical characterization of the gait pattern of healthy adults under different hypogravity conditions in a virtual reality environment"

Estado CEIFMH: **Positivo com Recomendações** (em anexo)
Parecer CEIFMH N.º: 3/2023

Este Conselho analisou o projeto em epígrafe. Confirma-se que o mesmo está em conformidade com as diretrizes nacionais e internacionais para a investigação científica que envolve seres humanos, incluindo a Declaração de Helsínquia sobre os Princípios Éticos para a Investigação Médica em Seres Humanos (2013) e a Convenção sobre os Direitos do Homem e a Biomedicina ("Convenção de Oviedo", 1997). As recomendações não envolvem alto risco e são deixadas ao critério do investigador.

A Presidente do Conselho de Ética para a Investigação da FMH

Professora Doutora Maria Helena Santa Clara Pombo Rodrigues



Conselho de Ética
para a Investigação

Data: 27 de março de 2023

Projeto: "Projeto Biomechanical characterization of the gait pattern of healthy adults under different hypogravity conditions in a virtual reality environment"

ANEXO

Existência de um seguro de responsabilidade civil que proteja os participantes na investigação.

Anexo 4 – Registro do Projeto na COMPESQ da UFCSPA



REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE CIÊNCIAS DA SAÚDE DE PORTO ALEGRE

Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação

Comissão de Pesquisa - COMPESQ

ATESTADO DE REGISTRO

Dados do Projeto:

Número: **608/2023**

Título: **O Impacto da Realidade Virtual na Atividade Elétrica Muscular e na Biomecânica da Marcha em Hipogravidade Simulada**

Pesquisador(a) Responsável: **Juliana Silva Herbert**

Vigência: **11/09/2023 a 31/03/2024**

Pesquisadores:

Equipe UFCSPA:

- Juliana Silva Herbert
- Kalanna Louise Garcia Costa
- Rosirene Pantaleão Gessinger
- Yann Lucas Dihl
- Willian De Vargas

Equipe Externa:

- Thais Russomano - INNOVASPACE
- Filipa João - ULISBOA
- Nelson Vinagre - ULISBOA
- Duarte Conchinhas - ULISBOA

Atestamos que o projeto de pesquisa acima identificado foi previamente aprovado pelo CEP e após, foi registrado no Sistema de Registro de Projetos de Pesquisa da UFCSPA. Salientamos que cabe ao CEP toda a avaliação referente às questões éticas do projeto e que qualquer alteração no projeto original deve ser reportada ao CEP que aprovou o projeto. Este atestado não garante a concessão de recursos financeiros por parte da UFCSPA.

Porto Alegre, 29 de setembro de 2023

RENATA PADILHA GUEDES