

Alterações musculoesqueléticas em ambiente de microgravidade

Musculoskeletal changes in a microgravity environment

Cambios musculoesqueléticos en un entorno de microgravedad

Leandro Emílio Nascimento Santos^I

Robinson Esteves Pires^{II}

Cláudia Sousa Antunes^{III}

Ricardo Gakiya Kanashiro^{IV}

RESUMO

O astronauta é um indivíduo que trabalha em um ambiente hostil de microgravidade. Esse ambiente anormal altera a fisiologia humana em praticamente todos os sistemas orgânicos. O sistema musculoesquelético apresenta repercussões clínicas que podem estender-se mesmo após a missão espacial. Conhecer as alterações do sistema osteomuscular para atuar antes, durante e depois do voo espacial é fundamental, pois a hipotrofia óssea pode permanecer anos após o retorno à Terra. A intervenção médica visa reduzir os riscos de agravos à saúde relacionados ao sistema musculoesquelético. O objetivo deste estudo é realizar uma revisão bibliográfica para identificar as alterações musculoesqueléticas no ambiente de microgravidade e descrever medidas de prevenção e tratamento durante e após viagem aeroespacial.

Palavras-chave: Astronautas. Microgravidade. Sistema musculoesquelético. Voo espacial.

ABSTRACT

The astronaut is an individual who works in a hostile microgravity environment. This abnormal environment changes human physiology in virtually all organ systems. The musculoskeletal system has clinical repercussions that can extend even after the space mission. Knowing the changes in the musculoskeletal system to act before, during and after the space flight is essential, since bone hypotrophy can remain years after returning to Earth.

Medical intervention aims to reduce the risks of health problems related to the musculoskeletal system. The aim of this study is to perform a bibliographic review to identify musculoskeletal changes in the microgravity environment and to describe prevention and treatment measures during and after aerospace travel.

Keywords: Astronauts. Microgravity. Musculoskeletal system. Space flight.

RESUMEN

El astronauta es un individuo que trabaja en un ambiente hostil de microgravedad. Este ambiente anormal cambia la fisiología humana en prácticamente todos los sistemas orgánicos. El sistema musculoesquelético tiene repercusiones clínicas que pueden extenderse incluso después de la misión espacial. Conocer los cambios en el sistema musculoesquelético para actuar antes, durante y después del vuelo espacial es esencial, ya que la hipotrofia ósea puede permanecer años después del regreso a la Tierra. La intervención médica tiene como objetivo reducir los riesgos de problemas de salud relacionados con el sistema musculoesquelético. El objetivo de este estudio es realizar una revisión bibliográfica para identificar cambios musculoesqueléticos en el entorno de microgravedad y describir medidas de prevención y tratamiento durante y después del viaje aeroespacial.

Palabras clave: Astronautas. Microgravedad Sistema musculoesquelético. Vuelo espacial.

I. Esquadrão de Saúde de Lagoa Santa (ES-LS) – Hospital Felício Rocho – Belo Horizonte/MG – Brasil. Doutorando em Ciências Aplicadas à Cirurgia e à Oftalmologia pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). *E-mail:* leandroens@hotmail.com

II. Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) – Hospital Felício Rocho – Belo Horizonte/MG – Brasil. Doutor em Cirurgia e Oftalmologia pela Universidade Federal de Minas Gerais Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). *E-mail:* robinsonestevespires@gmail.com

III. Universidade da Força Aérea (UNIFA) – Rio de Janeiro/RJ – Brasil. Doutora em Letras pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). *E-mail:* claudia.sousa@yahoo.com.br

IV. Diretoria de Saúde da Aeronáutica (DIRSA) – Rio de Janeiro/RJ – Brasil. Mestre em Ciências Aeroespaciais pela Universidade da Força Aérea (UNIFA). *E-mail:* ricarkan@uol.com.br

Recebido: 12/04/19

Aceito: 13/05/19

1 INTRODUÇÃO

Há duas maneiras conhecidas de simular ambiente de microgravidade na Terra. A primeira é por meio de uma enorme aeronave, conhecida como “Cometa Vômito” que realiza uma trajetória em parábola. O avião, como uma montanha-russa, sobe até aproximadamente 32.000 pés. Durante a subida, tudo no avião parece 1.8 vezes mais pesado que a gravidade da Terra. Ao chegar no topo, os ocupantes flutuam momentaneamente por cerca de 25-30 segundos até a aeronave tornar-se paralela à superfície da Terra. Depois a aeronave desce, a gravidade aumenta gradualmente até chegar próximo dos 1,8 G, até alcançar a mesma altitude em que começou o arco parabólico – próximo dos 24.000 pés. Cada arco parabólico dura 65 segundos e, dentro de um período de treinamento de 2-3 horas, a aeronave executa 31 parábolas por voo, momento em que os astronautas testam seus equipamentos, praticam atividades como comer, beber e realizam manobras de movimento no ambiente de microgravidade. Esses voos produzem náuseas e vômitos em alguns passageiros, justificando o apelido dado ao avião de “Cometa Vômito”.

A segunda maneira de simular microgravidade é com a construção de satélites sob a água. Os astronautas se vestem em trajes espaciais para ter flutuabilidade em mergulho, como se estivessem flutuando no espaço. Pode ser usado para treinar astronautas sobre como trabalhar no espaço. Não é perfeito, pois na água há mais arrasto do que no espaço e as pessoas ainda têm gravidade dentro dos trajes, então estão trabalhando com mais dificuldade do que no espaço.

Outra maneira de simular os efeitos da microgravidade nos sistemas musculoesquelético e cardiovascular é o repouso no leito com inclinação de cabeça para baixo (*Head-Down Tilt - HDT*) de 6 graus por pelo menos 30 dias. Essa inclinação da cabeça para baixo foi sugerida pelos investigadores russos na tentativa de compensar a mudança de fluidos dos membros inferiores para região cefálica que ocorre no espaço. O repouso no leito do HDT com voluntários normais é o análogo mais comum para simulação de microgravidade e para testar contramedidas para perda óssea, atrofia muscular e cardíaca, intolerância ortostática e redução da força muscular e capacidade de exercitar. (HARGENS, 2016).

A NASA não cria um ambiente de microgravidade com o único objetivo de ajudar e treinar os astronautas. Muitos processos físicos e experimentos são testados também.

No ambiente de microgravidade, o peso dos órgãos do corpo humano diminui e o sistema osteomuscular

desenvolve alterações qualitativas e quantitativas. A magnitude do acometimento osteomuscular depende da duração da viagem espacial (TEIXEIRA, 2005).

Os músculos responsáveis pela postura ereta durante o ortostatismo são os mais afetados pela microgravidade. Esses músculos, conhecidos como antigravitacionais, atrofiam-se e até mesmo podem apresentar alterações histológicas, como a substituição de fibras do tipo I, lentas, por fibras do tipo II, de contração rápida (TEIXEIRA, 2005).

O metabolismo ósseo no espaço é alterado e o astronauta pode desenvolver osteopenia ou osteoporose. A redução da massa óssea é mais proeminente na região pélvica e nos membros inferiores (TEIXEIRA, 2005).

Faz-se necessário que os astronautas tenham uma dieta rica em cálcio, vitamina D e proteína, façam exercícios aeróbicos de impacto e anaeróbicos para amenizar a redução do estoque ósseo, ao mesmo tempo em que se busca manter o trofismo muscular.

Conhecer as alterações do sistema osteomuscular relacionadas com o voo espacial é fundamental. A intervenção médica visa reduzir os riscos de agravos à saúde relacionados ao sistema musculoesquelético, além de evitar o comprometimento da segurança e dos objetivos das missões aeroespaciais.

O objetivo do presente estudo é realizar uma revisão bibliográfica para identificar as alterações musculoesqueléticas relacionadas com o ambiente de microgravidade, além de descrever medidas de prevenção e tratamento durante a viagem aeroespacial e após o seu retorno.

2 MÉTODO

Foi realizada pesquisa nas bases de dados LILACS e PUBMED com os seguintes descritores em 2012: astronautas, atrofia muscular, medicina aeroespacial, microgravidade, osteoporose, simulação de microgravidade e voo espacial. De um total de 12619 artigos, apenas 15 foram selecionados, pois estavam relacionados às alterações musculoesqueléticas em humanos no ambiente de microgravidade.

Realizada nova pesquisa na base de dados PUBMED no período de 06/08/2018 a 08/08/2018, com os mesmos descritores, considerando estudos em humanos, nos últimos cinco anos, nas línguas espanhola, inglesa e portuguesa, foram selecionados mais 17 artigos científicos por atenderem aos critérios de seleção estritamente relacionados com as alterações musculares e ósseas em ambiente de microgravidade.

Os dois momentos da pesquisa correspondem ao ano da realização da monografia do Curso de Medicina Aeroespacial

no IMAE (UNIFA), em 2012, e ao ano da segunda coleta de dados para atualização bibliográfica, em 2018.

3 DISCUSSÃO

Os músculos perdem massa, força e rigidez tendinosa durante o voo espacial. Os mais afetados são os músculos posturais que mantêm o corpo humano em ortostatismo em um ambiente gravitacional. A partir de sete dias de voo espacial, as alterações estruturais musculares e tendinosas são detectáveis (RILEY, 1990). Após duas semanas no ambiente de microgravidade, a massa muscular diminui em até 20% (CLEMEND, 2003). Em missões mais longas – de três a seis meses – pode ocorrer uma perda de 30% do volume da massa muscular (SHACKELFORD, 2008).

A causa fundamental dessa atrofia muscular é a ausência da carga gravitacional sobre ossos e músculos durante voo espacial. Músculos sem carga apresentam mudanças bioquímicas e estruturais com redução do comprimento dos sarcômeros e redução da sua posição ótima de trabalho. Fatores adicionais como subnutrição e estresses físicos e psicológicos durante a viagem aeroespacial podem contribuir para o aumento da perda muscular (BUCKEY, 2006b). A atrofia muscular ocorre pela redução do tamanho da fibra muscular e não pela sua quantidade. Existem dois tipos de fibras musculares: as do tipo I, antigravitacionais, posturais ou de contração lenta, que possuem resistência à fadiga muscular, apresentam grande quantidade de mitocôndrias e mioglobinas, além de serem ricamente vascularizadas (BUCKEY, 2006b). As fibras musculares do tipo I são muito sensíveis à inatividade, à imobilização e à ausência de gravidade. Já as fibras musculares do tipo II ou de contração rápida possuem facilidade para fadiga e apresentam menor quantidade de mitocôndrias e mioglobinas (BUCKEY, 2006b). Essas parecem sofrer perdas maiores que as fibras do tipo I. Biópsias musculares após o desembarque também indicam uma mudança fenotípica das fibras do tipo I para fibras do tipo II, propiciando contração mais rápida, mas com maior fadiga (BUCKEY, 2006b; CLEMEND, 2003).

A diminuição do volume muscular é acompanhada de menor força muscular, embora não proporcional a essa redução. Os músculos que possuem um índice de maior atrofia muscular são: quadríceps, adutores do quadril, tríceps sural (principalmente músculo solear) e a musculatura paravertebral lombar, com especial destaque para os músculos multífidos (KAWASHIMA et al., 2004).

As alterações na lordose e na amplitude de movimento (ADM) associadas à atrofia dos músculos

multífidos ocorre na maioria dos astronautas. Entretanto, apenas aqueles com irregularidades severas na placa terminal apresentavam sintomas lombares pós-voos: lombalgia crônica ou hérnia de disco. A insuficiência de placa vertebral pré-voos pode elevar o risco de lesão dos astronautas ao retornar à carga gravitacional (BAILEY, 2017).

O repouso no leito, um análogo do voo espacial em solo, induz uma atrofia robusta da musculatura esquelética, sendo exacerbado com o aumento da idade. É já evidente após 14 dias de repouso no leito (ARENTSON-LANTZ, 2016).

A redução da rigidez tendinosa deve-se às modificações no alinhamento e comprimento das fibras colágenas, devido à ausência da gravidade.

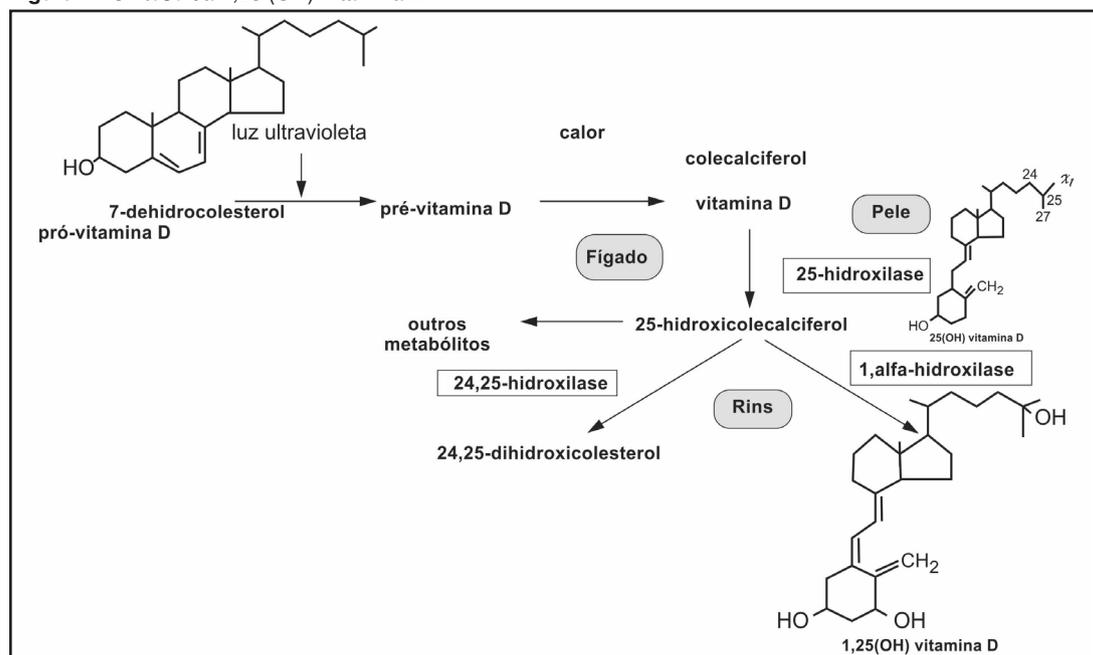
O retorno à Terra pode desencadear nos astronautas lombalgia, dores nas panturrilhas e coxas e, em alguns casos, fascíte plantar (CLEMEND, 2003; SHACKELFORD, 2008). Ao retornar da estação espacial, o astronauta deve ser submetido a um programa de reabilitação e condicionamento muscular para recuperar a massa e a força muscular, o que, geralmente, ocorre entre um e dois meses. (SHACKELFORD, 2008).

O desequilíbrio muscular causado pela hipertrofia do flexor e pela atrofia da musculatura extensora e lombo-pélvica aumenta o risco de lesão pós-missão espacial. Um método atualmente usado em voos espaciais tripulados na Europa para ajudar na recuperação pós-missão concentra-se no ensino da contração voluntária de músculos lombo-pélvicos específicos e no posicionamento da coluna vertebral, progredindo para o treinamento funcional com carga. Uma abordagem alternativa seria usar um Dispositivo de Exercício Funcional de Readaptação para recrutar adequadamente a musculatura (EVETTS, 2014).

Uma medida que aborda tanto a preservação da musculatura musculoesquelética quanto da cardiovascular é o exercício de remo de alta intensidade e curta duração seguido de exercícios de força resistida suplementar. O treino de remada preservou de forma eficaz a função e a estrutura da musculatura esquelética, evitando parcialmente a atrofia nos principais músculos antigravitacionais (KRAINSKI, 2013).

A microgravidade diminui a densidade mineral óssea. A formação óssea depende do grau de carga sobre o osso. Assim, a diminuição da carga sobre o osso dificulta e até mesmo inibe sua formação (BUCKEY, 2006a; CANN, 1997; SHACKELFORD, 2008). Outros fatores contribuem para a perda óssea, tais como o baixo nível de luz solar, que diminui a formação de vitamina D, e o ambiente com alta concentração de CO₂, que leva à acidose respiratória (BUCKLEY, 2006a).

Figura 1 - Síntese da 1,25 (OH) Vitamina D.



Fonte: PREMAOR; FURLANETTO, 2006. O 7-deidrocolesterol, através da ação da luz ultravioleta e do calor, isomeriza-se em colecalciferol na pele. É então transportado ao fígado, onde sofre ação da 25-hidroxilase, transformando-se em 25-hidroxivitamina D. Quando esta molécula chega ao rim, pode tanto transformar-se na forma ativa quando inativa deste hormônio, através da ação da 1, alfa, hidroxilase ou 24,25 hidroxilase, respectivamente.

O ambiente de microgravidade desregula a homeostase do cálcio por causa da dieta pobre deste íon, da ausência de luz solar, da elevada concentração de CO₂ e da ausência de carga sobre o osso. A diminuição do cálcio sérico eleva a secreção do paratormônio (PTH), ocasionando aumento na produção de 1,25-dihidroxicolecalciferol, aumento da absorção intestinal de cálcio e fosfato, estimula a reabsorção renal do cálcio, inibe a reabsorção renal de fosfato, além de aumentar a reabsorção óssea (Figura 2).

A desmineralização óssea começa logo ao se chegar ao espaço e pode continuar durante toda a missão. Nos primeiros dias, é observado um aumento de 60 a 70% do cálcio urinário e fecal (BUCKEY, 2006a; CLEMENT, 2003).

A perda da densidade óssea durante repouso no leito é de 1 a 2% por mês em ossos de carga como nas vértebras lombares, na pelve, no colo do fêmur, na região trocântérica, na tíbia e no calcâneo (BUCKEY, 2006a; CANCELEDDA, 2001; CLEMENT, 2004; LANG et al, 2006a; LEBLANC et al, 2002). Nessas regiões, a perda da densidade mineral óssea após 6 meses na estação espacial é de 8 a 12% (SHACKELFORD, 2008).

A maior perda óssea absoluta média por desuso ocorre no compartimento cortical, aparentemente apenas durante os primeiros 60 dias. Após esse período, a perda trabecular pode se tornar mais proeminente (CERVINKA, 2014).

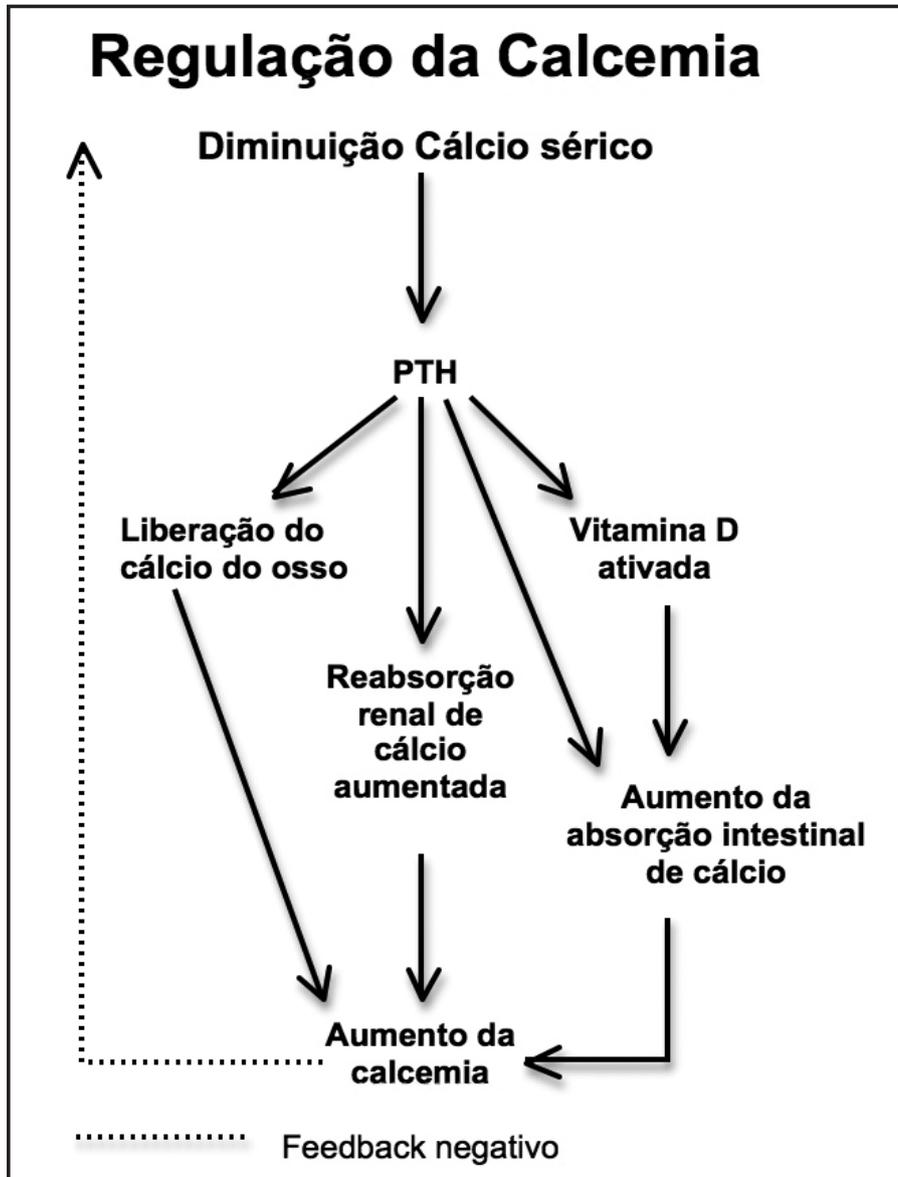
Densitometria óssea e tomografia computadorizada são exames úteis para monitorar a perda óssea e também para testar a eficácia dos exercícios de resistência e a eficácia da terapia com bisfosfonatos em astronautas que retornaram de viagens espaciais (WILLIAMS et al, 2009).

A medida da densidade mineral óssea (DMO) por absorciometria de raios-X de dupla energia (DXA: *Dual-energy X-ray Absorptiometry*) é usada na NASA Johnson Space Center. Os exames de DXA da DMO da tripulação mostraram declínios acentuados na DMO para o quadril e a coluna após as típicas missões espaciais de seis meses (SIBONGA, 2015).

Os achados laboratoriais do astronauta que retorna à Terra são caracterizados por elevação dos marcadores de reabsorção óssea, marcadores de formação óssea inalterados, diminuição da síntese da vitamina D, diminuição da absorção do cálcio intestinal e aumento do cálcio sérico (LEBLANC et al. 2000). As tabelas 1, 2 e 3 caracterizam os critérios para deficiência de vitamina D, os fatores de risco para hipovitaminose D e os valores de referência do cálcio sérico em adultos, respectivamente.

O Departamento de Metabolismo Ósseo e Mineral da Sociedade Brasileira de Endocrinologia e Metabologia (SBEM) estava discutindo os valores de normalidade da 25-OH-vitamina D há algum tempo. O valor normal proposto pela *Endocrine Society* e pela SBEM, antes acima de 30 ng/mL, foi alterado em 2017, sendo que maior do que 20 ng/mL é o desejável para população geral saudável e entre 30 e 60 ng/mL é o recomendado para grupos de risco.

Figura 2 - Homeostase do cálcio.



Fonte: O autor. Metabolismo do cálcio e fósforo. O PTH ativa a vitamina D, aumenta a absorção intestinal de cálcio, inibe a eliminação renal de cálcio, aumenta a eliminação renal de fosfato e aumenta a reabsorção óssea. Quando o cálcio sérico está aumentado, inibe a liberação do PTH: feedback negativo.

Tabela 1 - Novos critérios diagnósticos propostos pela SBEM em 2017 para deficiência de vitamina D.

Dosagem de 25-hidroxivitamina D (ng/mL)	
10 a 20 ng/mL	considerado baixo: com risco de aumentar remodelação óssea e, com isso, perda de massa óssea, além do risco de osteoporose e fraturas
> 20 ng/mL	desejável para população geral saudável
30 a 60 ng/mL	recomendado para grupos de risco como idosos, gestantes, pacientes com osteomalácia, raquitismos, osteoporose, hiperparatireoidismo secundário, doenças inflamatórias, doenças autoimunes e renal crônica e pré-bariátricos

Fonte: Departamento de Metabolismo Ósseo e Mineral da SBEM.

Tabela 2 - Fatores de risco para hipovitaminose D.

Pouca exposição à luz UVB	Diminuição da síntese de vitamina D pela pele	Doenças que alteram o metabolismo da vitamina D
Uso excessivo de roupas		Fibrose cística
Países de pouca insolação (alta latitude)	Raça amarela	Imobilização para tratamento de fratura óssea
Pouca penetração da luz UVB durante o inverno na atmosfera	Envelhecimento	Insuficiência cardíaca
Uso de bloqueadores solares		Doenças renais
Confinamento em locais onde não há exposição à luz UVB		Doenças hematológicas
		Doenças do trato gastrointestinal

Fonte: PREMAOR; FURLANETTO, 2006.

Tabela 3 - Valores de referência do cálcio sérico em adultos (PREMAOR; FURLANETTO, 2006).

Cálcio total	8.8 a 11.0 mg/dL
Cálcio iônico	4.60 a 5.40 mg/dL

Fonte: PREMAOR; FURLANETTO, 2006.

A tabela 4 mostra os marcadores bioquímicos do metabolismo ósseo.

Tabela 4 - Marcadores bioquímicos do metabolismo ósseo.

Formação	Reabsorção
	Hidroxirolina (urina)
	Interligadores do colágeno - <i>cross-links</i> (urina e soro)
	Piridinolinas totais
Fosfatase alcalina óssea e/ou total (soro)	Piridinolina e/ou deoxipiridinolina livre
Osteocalcina (soro)	N-telopeptídeo (NTX)
Propeptídeos do colágeno tipo 1 (soro)	C-telopeptídeo (CTX)
	Fosfatase ácida tartrato-resistente (soro)

Fonte: PREMAOR; FURLANETTO, 2006.

A perda óssea acelerada em ambiente de microgravidade faz com que o chumbo seja liberado dos ossos onde estavam armazenados. Tal fato aumentaria o risco de saturnismo, o que causa preocupação com a concentração aceitável de chumbo na água potável de veículos espaciais. Entretanto, segundo Garcia (2013), a maioria dos astronautas em longas missões espaciais não será afetada pela liberação de chumbo dos ossos no sangue. Uma pequena porcentagem de astronautas com alta concentração de chumbo em seus ossos poderia ter aumento da plumbemia, dependendo da taxa individual de perda óssea (GARCIA, 2013).

Devido à fragilidade óssea, os astronautas que acabaram de retornar de uma viagem espacial devem ficar afastados de atividades de impacto e de voos em aviões de alto desempenho (CLEMMENT, 2003; LANG et al. 2006).

Entretanto, essa perda óssea pode persistir por mais tempo. O tempo para a recuperação do estoque ósseo é mais longo que o tempo de permanência no espaço. A recuperação da densidade óssea pode demorar até três anos após a conclusão da viagem espacial e pode não retornar aos níveis prévios à viagem (CLEMMENT, 2003). A recomposição do estoque ósseo pode formar um trabeculado e uma mineralização óssea diferentes da arquitetura óssea antes do voo (LANG et al. 2006).

Na tíbia, além da diminuição da densidade mineral óssea nos compartimentos cortical e trabecular, uma diminuição de 4% na espessura da cortical e um aumento de 15% na porosidade cortical foram observados na aterrissagem. O tamanho e a densidade cortical subsequentemente se recuperaram e as alterações séricas da periostina [marcador de atividade dos osteócitos ou metabolismo periosteal, juntamente com a esclerostina] foi associada à recuperação cortical durante um ano após o desembarque. No entanto, a porosidade cortical da tíbia ou osso trabecular não se recuperou, resultando em comprometimento da força. O rádio, preservado no pouso, desenvolveu inesperadamente fragilidade pós-voos, a partir de 3 meses após o pouso, particularmente em sua estrutura cortical. Os marcadores de remodelação, desacoplados em favor da reabsorção óssea na aterrissagem, retornaram aos valores prévios em 6 meses, depois declinaram para valores abaixo dos valores pré-voos. Nossas descobertas destacam a necessidade de medidas de proteção específicas, não apenas durante, mas também após voos espaciais, por causa das incertezas contínuas sobre a recuperação do esqueleto, muito depois do pouso (VICO, 2017, p. 2).

Acredita-se que a radiação de alta transferência de energia linear (LET: *Linear Energy Transfer*) no espaço exacerba a

perda de densidade óssea induzida pela microgravidade pela via CHK1 (*Checkpoint Kinase1*)/MEPE (*Matrix Extracellular Phosphoglycoprotein*) ativada pela radiação que exacerba os efeitos da microgravidade na perda da densidade mineral óssea em astronautas (ZHANG, 2015).

Há uma preocupação com essa fragilidade óssea devido à possibilidade de osteoporose precoce e de fratura em astronautas (CLEMENT, 2003). A fratura pode ocorrer durante atividades espaciais extenuantes – caminhadas - ou principalmente após o retorno à Terra (SHACKELFORD, 2006).

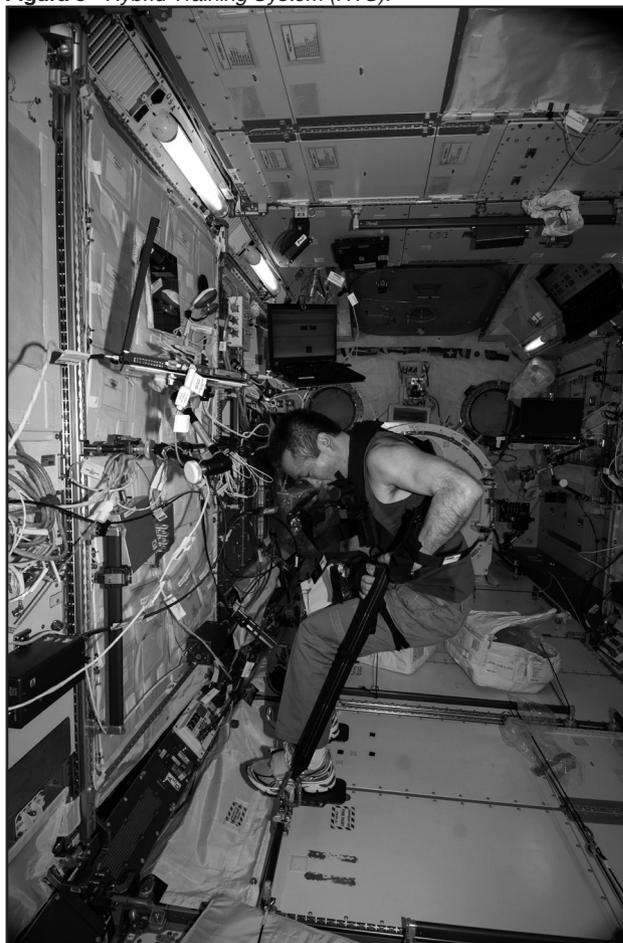
A falta de sinais mecânicos pelo desuso pode inibir a osteogênese e induzir a adipogênese das células-tronco mesenquimais. Dessa forma, a osteoporose pode ser causada também pelo número reduzido de osteoblastos. A estimulação mecânica adequada para osteogênese, particularmente sob condições de microgravidade, pode restaurar a diferenciação osteogênica normal, utilizando o ultrassom pulsátil de baixa intensidade (LIPUS: *Low Intensity Pulsed Ultrasound*) por estimulação diária de curta duração (UDDIN, 2013).

A tireóide controla os sistemas cardiovascular, musculoesquelético, nervoso e imunológico e afeta o comportamento e as funções cognitivas. Sabe-se que a microgravidade pode induzir alterações funcionais na glândula tireóide (ALBI, 2017) com consequente comprometimento dos sistemas supracitados.

Como a recuperação da massa óssea perdida após o voo espacial é longa, é importante atuar na prevenção da perda óssea antes e durante o voo. Assim, existem medidas para se evitar o catabolismo osteomuscular dos astronautas no ambiente de microgravidade. Tais medidas consistem em:

- seleção adequada dos astronautas, excluindo aqueles com baixa massa óssea ou tratando-os antes do voo (BUCKEY et al. 2006).
- dieta balanceada, com baixa concentração de sal (excesso pode contribuir ou facilitar a perda óssea), mas com alta concentração de cálcio e rica em proteína (BUCKEY et al. 2006).
- programa de exercícios de resistência de alta intensidade com baixas repetições e em curto espaço de tempo (BUCKEY et al. 2006). Entretanto, uma carga mecânica de baixa magnitude e alta frequência, experimentada em atividade para controle postural, também tem se mostrado anabólica ao osso e pode mitigar a perda óssea vivenciada pelos astronautas (NAGARAJA, 2014). Há também um Sistema de Treinamento Híbrido (HTS: Hybrid Training System) para manter o trofismo muscular e evitar a atrofia do sistema músculo-esquelético de um astronauta (SHIBA, 2015).

Figura 3 - Hybrid Training System (HTS).



Fonte: NASA.

- treino aeróbico para condicionamento cardiorrespiratório antes e durante a viagem espacial (QUIRINO et al. 2012). Existem alguns obstáculos a serem superados para que o astronauta possa pisar na esteira. Em primeiro lugar, eles devem se prender, para não flutuar. Para o astronauta correr no espaço, é necessário prendê-lo na esteira de modo que uma armadura (cinta) passe sobre os ombros e ao redor da pelve, fixando-o nos mesmos. Dois arreios laterais conectam a armadura à esteira e essa conexão pode ser ajustada de acordo com a carga que o astronauta deseja. Mais carregamento significa que os arreios tracionam mais a pessoa em direção à esteira: é como tentar correr com uma mochila mais pesada. Os astronautas precisam ajustar a velocidade e o carregamento correto para a corrida não ser desconfortável. A esteira possui um sistema de isolamento de vibração para que o corredor não transmita carga à estrutura da estação espacial.

- exercícios físicos tais como: abdução e adução de quadril, exercícios de extensão de tronco, agachamento e flexão plantar do tornozelo por meio de uma máquina conhecida como Dispositivo Avançado de Exercício Resistivo (ARED: *Advanced Resistive Exercise Device*), em que se usam cilindros de vácuo acionados por pistão de resistência ajustável para fornecer carga aos astronautas e manter a força e a massa muscular durante longos períodos no espaço.
- uso de suplementos e medicações como cálcio, vitamina D e bisfosfonatos (BUCKEY et al, 2006).
- monitorização do cálcio urinário e sérico, além dos marcadores de reabsorção e formação óssea (BUCKEY et al. 2006). A reabsorção óssea provocada pelas missões espaciais eleva o cálcio sérico e urinário e o risco de nefrolitíase. A maneira mais fácil de prevenir o risco de cálculos renais é aumentar o consumo de água (SMITH, 2015).
- exposição intermitente da tripulação a um ambiente com gravidade durante o voo espacial: centrifugação é uma maneira plausível de gerar gravidade artificial. No espaço, é possível criar “gravidade artificial” girando a estação espacial. Cria-se um sistema rotativo que produz o mesmo efeito da gravidade, pois produz-se uma força (força centrífuga), que atua para puxar os habitantes para o exterior. Esse processo pode ser usado para simular a gravidade. Ao ajustar certos parâmetros de uma estação espacial, como o raio e a taxa de rotação, pode-se criar uma força nas paredes externas que se igualaria à força da gravidade. Assim, as paredes externas da estação espacial seriam o piso na estação espacial. A “força” centrífuga empurra objetos para fora, mas a força da estação espacial fornece uma “força centrípeta” oposta que empurra para dentro. Isso seria semelhante ao andar na superfície de um planeta (se a estação espacial estiver girando na velocidade correta). No entanto, as grandes forças de Coriolis também estariam presentes, e os objetos cairiam em curvas em vez de linhas retas (ANDERSON, 2015).

Figura 4 - *Advanced Resistive Exercise Device (ARED)*.



Fonte: NASA.

4 CONCLUSÃO

A exposição ao ambiente de microgravidade espacial descondiciona o astronauta, causando atrofia do sistema musculoesquelético com diminuição do volume e da força muscular e perda da massa óssea. Estas adaptações fisiológicas ocorrem logo após a sua chegada ao ambiente de microgravidade. Essas mudanças têm potencial deletério ao sistema musculoesquelético do astronauta, com risco aumentado de fratura ao retornar à Terra, além de potencial para prejudicar a eficácia da missão no espaço. A intervenção terapêutica antes, durante e depois da viagem aeroespacial, por meio de uma dieta balanceada e com um programa de exercícios físicos definidos, deve ser implementada com o intuito de evitar a deterioração osteomuscular do astronauta.

REFERÊNCIAS

- ALBI, E. *et al.* Impact of Gravity on Thyroid Cells. **International Journal of Molecular Sciences**, Basileia, v. 18, n. 5, 2017. Disponível em: https://www.wizdom.ai/publication/10.3390/IJMS18050972/title/impact_of_gravity_on_thyroid_cells. Acessado em: 12 mar 2019, doi: 10.3390/ijms18050972.
- ANDERSON, R. **Can artificial gravity be created in space?** 2015. Disponível em: <http://curious.astro.cornell.edu/about-us/150-people-in-astronomy/space-exploration-and-astronauts/general-questions/927-can-artificial-gravity-be-created-in-space-intermediate>. Acesso em: 19 ago 2018.
- ARENTSON-LANTZ, E. J.; ENGLISH, K. L.; PADDON-JONES, D.; FRY, C. S. Fourteen days of bed rest induces a decline in satellite cell content and robust atrophy of skeletal muscle fibers in middle-aged adults. **Journal of Applied Physiology, Rockville**, v. 120, n. 8, 2016. Disponível em: <https://journals.physiology.org/doi/full/10.1152/jappphysiol.00799.2015>. Acessado em: 02 dez 2017, doi:10.1152/jappphysiol.00799.2015.
- BAILEY J. F. *et al.* From the international space station to the clinic: how prolonged unloading may disrupt lumbar spine stability. **The Spine Journal**. Boston, v. 18, n. 1, 2018. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/28962911>. Acessado em: 05 fev 2018. doi: 10.1016/j.spinee.2017.08.261.
- BUCKEY, J. C. J. Bone loss: managing calcium and bone loss in space. In: _____. **Space physiology**. New York: Oxford University Press, 2006a. cap 1, p. 3-32.
- BUCKEY, J. C. J. Muscle loss: approach to maintaining strength. In: _____. **Space physiology**. New York: Oxford University Press, 2006b. cap. 4, p. 77-100.
- CANCEDDA, R. The skeletal system. In: FITTON, B; BATTRICK, B. **A world without gravity: research in space for health and industrial processes**. Paris: European Space Agency, 2001. p. 83-92.
- CANN, C. Response of the skeletal system to spaceflight. In: Churchill, S. E. **Fundamentals of space life sciences**. Malabar: Krieger publishing company, 1997. p. 83-103.
- CERVINKA, T.; SIEVÄNEN, H.; HYTTINEN, J.; RITTWEGGER, J. Bone loss patterns in cortical, subcortical, and trabecular compartments during simulated microgravity. **Journal of Applied Physiology, Rockville**, v. 117, n. 1, 2014. Disponível em: <https://journals.physiology.org/doi/pdf/10.1152/jappphysiol.00021.2014>. Acessado em: 05 jul 2017. doi:10.1152/jappphysiol.00021.2014.
- CLEMENT, G. Muscle-skeletal system in space. In: _____. **Fundamentals of space medicine**. Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2003. p. 173- 204.
- EVETTS, S. N., *et al.* Post space mission lumbo-pelvic neuromuscular reconditioning: a European perspective. **Aviation, Space, and Environmental Medicine**, Nova Iorque, v. 85, n. 7, 2014. Disponível em: <https://www.ingentaconnect.com/content/asma/asem/2014/00000085/00000007/art00014>. Acessado em: 07 ago 2016.
- GARCIA, H. D.; HAYS, S. M.; TSUJI, J. S. Modeling of blood lead levels in astronauts exposed to lead from microgravity-accelerated bone loss. **Aviation, Space, and Environmental Medicine**. Nova Iorque, v. 84, n. 12, 2013.
- HARGENS, A. R.; VICO, L. Long-duration bed rest as an analog to microgravity. **Journal of applied physiology**, v. 120, n. 8, p. 891-903, 2016.
- LANG, T. F. *et al.* Cortical and trabecular bone mineral loss from the spine and hip in long-duration spaceflight. **Journal of bone and mineral research: the official journal of the American Society for Bone and Mineral Research**, Washington/DC, v. 19, 2006a.
- LANG, T. F. *et al.* Adaptation of the proximal femur to skeletal reloading after long-duration spaceflight. **Journal of bone and mineral research: the official journal of the American Society for Bone and Mineral Research**, Washington/DC, v. 21, 2006b.
- QUIRINO, D; PEDRO, L. A influência da microgravidade na musculatura esquelética: alterações musculares e intervenção terapêutica. **Saúde & Tecnologia**, v. 4, n. 8, 2012.
- KAWASHIMA, S. *et al.* Human adductor muscles atrophy after short duration of unweighting. **European journal of applied physiology**, v. 92, n. 4-5, p. 602-605, 2004.
- KRAINSKI, F. *et al.* The effect of rowing ergometry and resistive exercise on skeletal muscle structure and function during bed rest. **Journal of Applied Physiology, Rockville**, v. 116, n. 12, 2013. Disponível em: <https://journals.physiology.org/doi/full/10.1152/jappphysiol.00803.2013>. Acessado em: 20 abr 2017. doi: 10.1152/jappphysiol.00803.2013.

- LEBLANC, A. *et al.* Bone mineral and lean tissue loss after long duration space flight. **Journal of Musculoskeletal Neuronal Interactions**, Attiki, v. 1, 2000.
- NAGARAJA, M. P.; JO., H. The Role of Mechanical Stimulation in Recovery of Bone Loss-High versus Low Magnitude and Frequency of Force. **Life, Basileia**, v. 4, n. 2, 2014. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/25370188>. Acessado em: 27 mai 2016, doi: 10.3390/life4020117.
- NASA. National Aeronautics and Space Administration. Disponível em: https://www.nasa.gov/mission_pages/station/research/experiments/163.html. Acesso em: ago. 2018.
- NASA. National Aeronautics and Space Administration. Disponível em: https://www.nasa.gov/mission_pages/station/research/experiments/1001.html. Acesso em: ago. 2018.
- PREMAOR, M. O.; FURLANETTO, T. W. Hipovitaminose D em adultos: entendendo melhor a apresentação de uma velha doença. **Arquivos Brasileiros de Endocrinologia & Metabologia, ABE&M**, Rio de Janeiro, v. 50, n. 1, p. 25-37, 2006.
- QUÍMICA Fisiológica, 2017. Disponível em: <http://quimicafisiologicaufrj.blogspot.com/2017/07/metabolismo-do-calcio-e-fosfato.html>. Acesso em: ago. 2018.
- RILEY, D. A. *et al.* Skeletal muscle fiber, nerve, and blood vessel breakdown in space-flown rats. **The FASEB Journal, Rockville**, v. 4:, n. 1, 1990, doi: doi.org/10.1096/fasebj.4.1.2153085.
- SHIBA, N. *et al.* Electrically Stimulated Antagonist Muscle Contraction Increased Muscle Mass and Bone Mineral Density of One Astronaut - Initial Verification on the International Space Station. **PLoS One**, San Francisco, v. 10, n. 8, 2015. 21 ago. 2015. Disponível em: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0134736>. Acessado em 09 fev 2017. doi:10.1371/journal.pone.0134736.
- SIBONGA J. D. *et al.* **Evaluating Bone Loss in ISS Astronauts. Aerospace Medicine and Human Performance**, Alexandria, v. 86, n. 12, 2015. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/26630194>. Acessado em: 14 jun 2016, doi: 10.3357/AMHP.EC06.2015.
- SHACKELFORD, L. C. Musculoskeletal response to space flight. In: BARRATT M. R., POOL, S. L. **Principles of clinical medicine for space flight**. New York: Springer Science and Business Media, 2008. p. 293-306.
- SMITH, S. M. *et al.* Bone metabolism and renal stone risk during International Space Station missions. **Bone**, Rockville Pike, v. 81, 2015. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/26456109>. Acessado em: 27 ago 2016, doi: 10.1016/j.bone.2015.10.002.
- SOCIEDADE BRASILEIRA DE ENDOCRINOLOGIA E METABOLOGIA. **Vitamina D: novos valores de referência**. Disponível em: <https://www.endocrino.org.br/vitamina-d-novos-valores-de-referencia/>. Acesso em: 31 jul 2018.
- TEIXEIRA, R. C. M. Atmosfera e espaço. In: TEMPORAL, W. **Medicina aeroespacial**. Rio de Janeiro: Luzes, 2005. cap. 3, p. 75-76.
- UDDIN, S. M., QIN, Y. X. Enhancement of osteogenic differentiation and proliferation in human mesenchymal stem cells by a modified low intensity ultrasound stimulation under simulated microgravity. **PLoS One**. San Francisco, v. 8, n. 9, 2013. Disponível em: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0073914>. Acessado em: 04 set 2016, doi: 10.1371/journal.pone.0073914.
- VICO, L. *et al.* Cortical and Trabecular Bone Microstructure Did Not Recover at Weight-Bearing Skeletal Sites and Progressively Deteriorated at Non-Weight-Bearing Sites During the Year Following International Space Station Missions. **Journal of bone and mineral research: the official journal of the American Society for Bone and Mineral Research**, Washington/DC, v. 30, n. 10, 2017. Disponível em: <https://asbmr.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/jbmr.3188>. Acessado em: 09 out 2018, doi: 10.1002/jbmr.3188.
- VITAMINA D: novos valores de referência. **Sociedade Brasileira de Endocrinologia e Metabologia**, 2017. Disponível em: <https://www.endocrino.org.br/vitamina-d-novos-valores-de-referencia/>. Acesso em: jul. 2018.
- WILLIAMS, D. *et al.* Acclimation during space flight: effects on human physiology. **Canadian Medical Association Journal**, Ottawa, n. 13, p. 1317-23, jun. 2009.
- ZHANG, X.; WANG, P.; WANG, Y. Radiation activated CHK1/MEPE pathway may contribute to microgravity-induced bone density loss. **Life Sciences in Space Research**, Rockville Pike, v. 81, 2015. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/26553637>. Acessado em: 08 ago 2016. doi: 10.1016/j.lssr.2015.08.004.