

A influência da microgravidade na musculatura esquelética: alterações musculares e intervenção terapêutica

Diogo Quirino¹, Luísa Pedro²

1. Licenciatura em Fisioterapia, Escola Superior de Tecnologia da Saúde de Lisboa, Instituto Politécnico de Lisboa. pt.quirino@gmail.com

2. Área Científica de Fisioterapia, Escola Superior de Tecnologia da Saúde de Lisboa, Instituto Politécnico de Lisboa.

RESUMO: Introdução – O incremento do tempo de exposição à microgravidade origina um descondicionamento músculo-esquelético que precisa de ser prevenido através do treino. **Objetivos** – Identificar os padrões destas alterações e descrever os programas de treino em microgravidade e estratégias pós-exposição. **Método** – A pesquisa da revisão da literatura foi conduzida através da MEDLINE/PubMed e PEDro com as seguintes palavras-chave: “spaceflight rehabilitation”, “spaceflight muscle”, “microgravity muscle” e “bed rest muscle”, seguida de uma seleção dos artigos. **Resultados** – Os estudos encontrados apresentam uma resposta músculo-tendinosa diferencial sendo que o treino protege total ou parcialmente estas estruturas. **Conclusão** – O treino de *resistance* de intensidade elevada e baixas repetições associado a exercícios específicos é o mais adequado para responder ao descondicionamento.

Palavras-chave: microgravidade, músculo-esquelético, atrofia, exercício físico.

Microgravity’s effect on the skeletal muscle: muscular adaptations and therapeutic intervention

ABSTRACT: Introduction – The increased microgravity exposition time raised the need for training programs to avoid muscle and tendinous deconditioning. **Objectives** – To identify the deconditioning patterns and to identify and describe the training programs used for its prevention during and after microgravity exposure. **Methods** – This literature review is based on a search conducted via MEDLINE/PubMed and PEDro using the following search words: “spaceflight rehabilitation”, “spaceflight muscle”, “microgravity muscle” and “bed rest muscle”. The search was followed by an article selection. **Results** – The studies reveal a differential exposure phenomenon for which the training programs reviewed are partly effective. **Conclusion** – According to the literature the high intensity low volume resistance programs with specific exercises are more appropriate to address the deconditioning problem.

Keywords: microgravity, skeletal muscle, atrophy, exercise.

Introdução

A microgravidade representa, da parte de um observador nesse ambiente, a ausência de qualquer aceleração a atuar sobre o corpo humano (neste caso, a força gravitacional), sendo este ambiente responsável por um comprometimento global da homeostase²⁻⁵. As alterações sistémicas foram detetadas nos primeiros voos espaciais da década de 60, realizados pela União Soviética e pelos Estados Unidos⁶ e, na década seguinte, foram registadas alterações significativas na musculatura esquelética e nos tendões⁶. A ausência de estímulo de carga durante longos períodos^{3,7}

impõe sobre estas estruturas uma redução do volume e da força musculares^{3,8-9}, rigidez tendinosa¹⁰ e um aumento da fadiga³, as quais são verificáveis a partir de sete dias de voo espacial¹¹.

Para responder a estas alterações fisiológicas é prioritário o desenvolvimento de programas de treino adequados^{4,12}, evitando o comprometimento da segurança e eficácia das missões^{4,7,13}. A necessidade de exploração irá conduzir a uma acumulação do tempo de exposição em um a três anos^{2,4,12,14-16}, o que pode aumentar o risco de lesão^{2,4,9}, comprometendo funções próprias da missão^{2,17} ou o

regresso à Terra em caso de emergência⁴. O corpo humano precisará de semanas a meses em gravidade terrestre (consoante o período de exposição) para recuperar⁴. A identificação do modo como as estruturas músculo-tendinosas se adaptam em microgravidade é importante para estabelecer programas de reabilitação que respondam às necessidades descritas. A condução de programas de estudo em terra, mas simulando os efeitos da ausência de carga nestes sistemas, é um método aceitável^{5,17-20} face às limitações existentes para a realização de estudos em meio espacial⁴ como sendo o número reduzido de participantes para produzir efeito estatístico, ausência de grupo de controlo e de intervenções cegas^{4,7}.

Tendo em conta estas limitações, a necessidade de obter dados sobre a resposta muscular e tendinosa em microgravidade conduziu à sua recolha a partir de estudos de acamamento²¹ (*bed rest*). Estes estudos recriam em ambiente terrestre um modelo de ausência de carga, semelhante ao do voo espacial⁴, no qual a mobilidade dos participantes é diminuída, existindo ausência de trabalho em contra-gravidade.

Esta revisão pretende examinar a literatura disponível na área e encontra-se organizada de modo a responder aos seguintes objetivos: (i) identificar os padrões de resposta da musculatura esquelética e tecido tendinoso em microgravidade; (ii) identificar e descrever os programas de treino utilizados para a prevenção destas alterações em microgravidade e (iii) identificar estratégias de intervenção na pós-exposição a microgravidade.

Métodos

Método de pesquisa

Dois investigadores participaram em todos os aspetos desta revisão, tendo definido as bases de dados a consultar, os descritores de pesquisa e os critérios de pesquisa. Foram consultadas a PEDro, *Physiotherapy Evidence Database* e a MEDLINE/PubMed, de acordo com as palavras-chave: "spaceflight rehabilitation", "spaceflight muscle", "microgravity muscle" e "bed rest muscle". A pesquisa na PubMed teve como limites de pesquisa os estudos no período de janeiro de 2000 a junho de 2011, realizados em humanos.

Critérios de pesquisa

Foram tomados como critérios de inclusão estudos experimentais publicados em inglês no período supracitado, que estudam as alterações da musculatura esquelética e tecido tendinoso e a eficácia de programas de treino em indivíduos saudáveis expostos a microgravidade ou paradigma de microgravidade, em estrita ausência de carga durante o período de estudo.

Foram excluídos os estudos que analisem: (i) efeitos de fármacos ou de suplementos nutricionais; (ii) efeitos da estimulação elétrica na contração muscular; (iii) com amostra não-humana; (iv) sem protocolo rigoroso de microgravidade, durante todo o período em estudo, como descrito

por Payne M, et. al.⁴, salvo se o estudo incidia sobre o período pós-exposição; (v) condições patológicas e (vi) alterações metabólicas ou proteicas.

A seleção dos artigos é demonstrada na Figura 1. Após a seleção foram considerados 25 artigos (n=25): oito descreviam as alterações musculares e tendinosas em microgravidade e 17 um plano de treino ou intervenção terapêutica.

Resultados

Os resultados da pesquisa podem ser consultados na Tabela 1, onde se encontram os estudos com ou sem treino muscular associado.

Em termos de protocolos de estudo, o acamamento é utilizado pela maioria dos estudos (n=18)^{8,10,14-16,20,22-32}, seguido pelos estudos de voo espacial (n=5)^{7,33-36}. Um estudo³⁷ compara os resultados entre estes dois modelos. Por último, foi revisto um estudo³⁸ sobre um protocolo de fisioterapia após exposição. Os protocolos de treino mais utilizados são o treino de *resistance*^{10,22-23,27-28} e o treino de *resistance* e vibração (TRV)^{8,16,20,26,32}, sendo que estes dois últimos treinos são comparados em três estudos^{14,30-31}. Os programas estudam alterações musculares em termos de volume muscular ou área seccional (ou fisiológica), avaliando a força muscular através de testes de contração máxima voluntária isométrica^{8,10,22-23,26-28,31,37-38}, sendo que outros utilizam

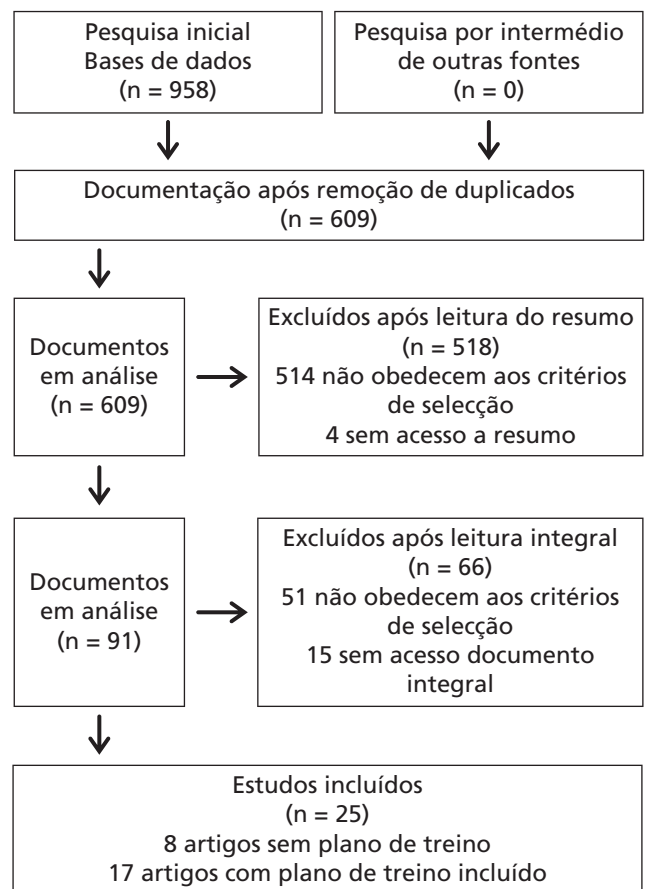


Figura 1: Diagrama de fluxo sobre a seleção de artigos.

Tabela 1: Efeitos do treino e da exposição à microgravidade nas estruturas músculo-tendinosas

	Publicação	Amostra N(Gênero)	Duração (Dias)	Treino	Principal Resultado
VE	Akima H. 2000	3	9-16	-	↓VM Q (-5,6 a -15,4%) e Isq-Tb (-8,6 a -14,1%)
	LeBlanc A. 2000	4(H) + 16(15H, 1M)	17 e 98-112	-	↓VM generalizado (5-17%)
	Lambertz D. 2001	14	90-180	A+R	↓CMV isométrica FP (-17%), ↑Rigidez músculo-tendinosa FP (25%)
	Tesch P. 2005	4(H)	17	-	↓AS Q (-8%) e Glu (-8%), ↔ AS Isq-tb, ↓CMV em 9-11% em várias ações musculares
	Trappe S. 2009	9	180	A+R	↓AS FP (-13%), Gémeos (-10%), Solhar (-15%) ↓CMV isométrica FP (-14%)
	Kawakami Y. 2001	9(H)	20	R	↓ASF Q (-7,8%), ↓CMV isométrica Q (-10,9%), Treino: ↓ASF Q (-3,8%), ↔CMV isométrica Q
	Alkner B. 2004 A	23(H)	29	R	↓VM Q (-10%), FP (-16%). Treino: ↔ VM Q, ↓ VM FP (-8%).
	Alkner B. 2004 B	17(H)	90	R	↓VM Q (-18%), FP (-29%). Treino: ↔ AS Q e ↓AS FP (-15%) ↓CMV isométrica Q (-31%) e FP (-37%). Treino: ↔ CMV isométrica Q e FP
	Kawashima S. 2004	10(5H, 5M)	20	-	↓ASF AD (-6-8%)
	Gallagher P. 2005	17(H)	84	R	↓VM Q (-18%), FP (-29%). Treino: ↔ VM Q, ↓VM FP (-15%) ↓CMV isométrica Q (-45%), FP (-48%). Treino: ↓CMV isométrica Q (-18%), FP (-32%)
	Reeves N. 2005	18(H)	90	R	↓ Rigidez tendão Aquiles (-58%), Treino: ↓ Rigidez tendão Aquiles (-37%) ↓Módulo de Young (-57%), Treino: ↓ Módulo de Young (-38%)
	Blottner D. 2006	20(H)	56	RV	↓CMV isométrica FP (-18,9%). Treino: ↔ CMV isométrica FP
	Mulder E. 2006	18(H)	56	RV	↓AS Q (-14,1%), ↓CMV isométrica Q (-16,8%). Treino: ↓AS Q (-3,5%), ↔ CMV Q
	Berg H. 2007	10(H)	35	-	↓AS Q (-9%), FP (-12%), ↓CMV isométrica Q (-20%) e extensão anca (-12%)
A	Mulder E. 2007	20(H)	56	RV	↓CMV isométrica Q (-16%). Treino: ↓CMV isométrica Q (-11%). O treino previne o aumento da fadigabilidade do Q.
	Belavý D. 2008	20(H)	56	RV	↓AS MF (-21%). Treino: ↓ AS MF (-7%)
	De Boer M. 2008	10(H)	35	-	O Gémeo interno (-12,2%) atrofia a uma taxa superior do que o Vasto Lateral (-8,8%).
	Belavý D. 2009 A	10(H)	56	-	Existem diferentes taxas de atrofia nos músculos sinergistas dos membros inferiores.
	Belavý D. 2009 B	20(H)	56	RV	↓VM Q (-12%), Isq-tb (-7,6%), FP (-14,4%), AD (-4,5%). Treino: ↓VM Q (-1,7%), Isq-tb (10,9%), FP (-1,9%), AD (-5,4%)
	Mendis M. 2009	20(H)	56	RV	O treino não foi eficaz em prevenir ou reduzir a atrofia dos músculos anteriores da anca.
	Mulder E. 2009	24(H)	60	R, RV	↓AS Q (-13,5%) e FP (-23,8%) Treino: R, RV: ↔ AS Q, R: FP (-10,7%), RV: FP (-11%) ↓CMV isométrica Q (-21,3%), FP (-24,9%) Treino: R, RV: ↔ CMV isométrica Q, R: FP (-14,8%) RV: (-12,8%)
	Belavý D. 2010	24(H)	60	R, RV	↓AS MF (-10,1%), ES (-10,4%), QL (-9,2%), ↑AS Ps (+3,2%) Treino: R: ↓AS MF (-5,6%), ES (-4%), QL (-0,8%), ↑AS Ps (+11%), RV: ↓AS MF (-4%), ES (-7%), QL (-3,2%), ↑AS Ps (+10,2%)
	Miokovic T. 2011	24(H)	60	R, RV	↓VM S-m (-18,1%), PGLu (-11,2%). Treino: R: ↓VM S-m (-12,8%), PGLu (-5,4%) RV: ↓VM S-m (-14,8%), PGLu (-5,6%)
	Trappe S. 2001	4(H)+8(H)	17 e 17	-	↔ CMV isométrica FP em ambos os estudos
	Shin D. 2008	5(4H, 1M)	16	FT	↓CMV isométrica TS (-53%), ↓Módulo de Young tendão de Aquiles (-17,1%) Fisioterapia (6semanas): Recuperação total FM isométrica TS e do módulo de Young Aquiles

Legenda: *Modelos de estudo.* (VE) Voo espacial; (A) Acamamento; (A/VE) Comparação Acamamento/Voo espacial; (FT) Fisioterapia. *Género* (H) Homem, (M) Mulher. *Treino.* (A) Aeróbio, (R) Resistência, (RV) Resistência associado a Vibração. *Resultados:* VM, volume muscular; AS, área seccional; ASF, área seccional fisiológica; CMV, contração máxima voluntária; FP, flexores plantares; Q, quadríceps; Glu, Glúteos; Isq-tb, isquio-tibiais; AD, adutores da anca; MF, multifídus; ES, erector spinae; QL, quadrado lombar; Ps, Psoas; S-m, semi-membranosos; PGLu, pequeno glúteo. ↓, redução; ↑, incremento; ↔ sem alteração.

testes de contração máxima isocinética^{22,36}. Também foram considerados estudos sobre o tecido tendinoso (comportamento do tendão de Aquiles em microgravidade)^{10,34}. A avaliação das propriedades tendinosas foi realizada através da força isométrica de flexão plantar¹⁰.

Os estudos de voo espacial utilizam programas de treino aeróbio associado a treino de resistance^{7,34}.

Apesar dos músculos mais estudados serem o quadrícipete^{8,12,16,22-23,25,28,31-33,36} e os flexores plantares^{7,12,16,22-23,25-26,31,33-34,37}, também há estudos que estudam o comportamento da musculatura da região da anca^{16,20,25,29-30} e da coluna lombar¹⁴⁻¹⁵.

Durante a intervenção, os equipamentos mais utilizados são um sistema de vibração^{8,14-16,20,26,30-32} (*Galileo Space*, *Novotec*, *Pforzheim*, Alemanha) e o *Flywheel*^{10,12,22-23}.

O *Galileo Space* é um sistema de vibração desenvolvido para microgravidade e acamamento^{8,14-16,20,26,30-32}. Consiste numa plataforma vibratória em que os indivíduos se posicionam em decúbito dorsal⁸. Um sistema de cintas elásticas aplicadas na cintura escapular, cintura pélvica e mãos^{8,15,20,31} permite gerar uma força estática superior à massa corporal^{8,14-16,20,30-32} sobre a plataforma vibratória. A força é regulada^{14-15,26,30-31} de acordo com o exercício pretendido. O estímulo vibratório parte da plataforma e é transmitido por todo o membro inferior até à coluna lombar¹⁶. O protocolo utiliza vibração de baixa frequência (<30Hz)^{15,20,26}, uma vez que a de frequência elevada pode ter efeitos negativos para o organismo²⁶.

O *Flywheel*, um aparelho de *resistance* independente da gravidade e concebido para o treino no espaço^{22,39-41} permite aplicar resistência (devido à sua inércia²²) durante todo o exercício: em contração concêntrica e excêntrica^{10,22}.

Outro estudo²⁸ utiliza um aparelho de *resistance* (VR-4100, Cybex Corp., EUA) para treino de extensão da anca, joelho e flexão plantar.

Discussão

Resposta muscular e tendinosa em microgravidade

Os dados revelam uma resposta muscular à microgravidade não uniforme, onde se pode traçar um panorama global dos músculos com maior atrofia. Estes são: (i) posturais²⁴, i.e., cadeia extensora do membro inferior^{16-17,23-24} face aos não posturais^{11,17}; (ii) exclusivamente extensores^{17,24,29-30} face aos seus pares sinergistas com outra função para além de extensão⁴²; (iii) profundos (estabilizadores articulares) face aos superficiais (responsáveis pela alavanca de movimento)²⁰; (iv) monoarticulares face aos biarticulares^{16-17,23-24,30}; (v) com maior composição em fibras oxidativas^{17,20,24,27}; (vi) com maior volume muscular e dimensão de fibras antes da exposição à microgravidade^{7,33} e (vii) aqueles que são estimulados de forma mais intensa e frequentemente durante as atividades do quotidiano^{16-17,20,22,33,43}.

A atrofia preferencial do tricípete sural face ao quadrícipete é verificável em vários estudos de acamamento^{22-23,27,31}, nomeadamente por De Boer M, et. al.²⁴ que regista uma taxa de atrofia do gêmeo superior face ao vasto lateral. A

atrofia preferencial do solhar face aos gêmeos é documentada em voo espacial⁷ e em acamamento¹⁶.

Alguns estudos documentam que a taxa de atrofia dos adutores da anca é semelhante à registada em igual período para o quadrícipete²⁹. Em períodos de acamamento de 60 dias verificamos a presença importante de atrofia diferencial na musculatura postero-lateral da anca, a qual se constitui como um fenómeno importante a estudar³⁰. Neste contexto verifica-se uma atrofia preferencial da longa porção do bicípete femoral em relação à pequena porção do bicípete femoral ou do semi-membranoso em relação ao semi-tendinoso, o que pode ser explicado com base na função de extensão da anca por parte da longa porção do bicípete femoral ou do semi-membranoso³⁰. É importante referir que a atrofia também ocorre ao nível dos músculos da região da coluna lombar¹⁴⁻¹⁵ com particular destaque para o multifídus¹⁵.

Paralelamente, as alterações registadas na arquitetura muscular¹⁷ (alteração do ângulo de penação e comprimento dos feixes musculares⁴⁴) são de instalação rápida⁴⁵ e irão reduzir o comprimento dos sarcómeros e removê-los da sua posição ótima de trabalho¹⁷, conduzindo a um incremento da fadiga^{28,32} e a redução da força muscular^{28,34}.

A redução da rigidez tendinosa^{10,34,46-47} e da aponevrose⁴⁸ também irá contribuir para a diminuição^{33,46} da força muscular^{10,38}, através de modificações no alinhamento³⁸, comprimento e força dos elementos contráteis musculares⁴⁹⁻⁵⁰. Estas alterações tendinosas irão depender exclusivamente de propriedades intrínsecas¹⁰ ao tendão que se modificam com a ausência de carga^{10,38}.

O modo como as alterações musculares e tendinosas progridem no tempo ainda não é claro⁸, embora se admita que, ao nível do voo espacial, se atinja um planalto após 4 meses³⁵, o que é semelhante com o verificado em acamamento sem exercício⁸. Este dado deve ser visto com cautela, pois existem diferentes taxas de atrofia para cada músculo.

Resposta músculo-tendinosa ao treino

Para que o treino em microgravidade seja eficaz a manter estas propriedades, é necessário definir quais os músculos mais afetados¹⁶, o tipo e características^{33,35,38} de protocolo de treino e exercícios específicos³⁵, sendo necessário um volume de treino¹⁰ que exceda um determinado limiar para prevenir alterações^{16,33,38}.

Durante a exposição à microgravidade, os investigadores recorrem a diferentes tipos de treino para garantir a manutenção das características musculares e tendinosas. Os treinos de *resistance* isolado ou associado à vibração protegem o volume^{8,12,16,22-23,28,31} e força^{8,12,22-23,28,31} musculares do quadrícipete, mas não o volume^{7,12,16,23,31} dos flexores plantares. A força muscular dos flexores plantares pode ser protegida total^{23,26} ou, pelo menos, parcialmente^{27,31}. Assim, a redução da força muscular não explica a redução da massa muscular após exposição a microgravidade, sendo que alguns estudos apontam para uma contribuição de fatores relacionados com o *neural drive*^{7,17,23-24,28,34} e/ou alterações nas propriedades das fibras musculares^{7,28}.

Verifica-se que a associação de vibração ao treino de *resistance* parece não trazer nenhum benefício adicional^{8,14,30-32}. Contudo, o facto dos estudos se basearem nas alterações do volume muscular pode não permitir que este parâmetro morfológico afirme a ineficácia da associação da vibração ao treino de *resistance*³⁰. Quanto ao treino aeróbio isolado para manutenção da performance muscular e tendinosa em microgravidade, a resposta pode ser insuficiente¹⁵, apesar dos ganhos cardiovasculares^{2,21}. Porém, o treino combinado aeróbio e *resistance* poderá ser uma opção viável¹⁵¹⁻⁵³.

Os estudos encontrados definem que os programas de *resistance* com intensidade elevada^{14,16,30} (75-85% de 1RM¹⁶), baixas repetições (número de contrações reduzido)^{12,23} e com um consumo reduzido de tempo são os mais adequados para proteger as propriedades músculo-tendinosas em microgravidade.

A frequência de treino varia de acordo com o aparelho: 2-3 dias/semana no caso do *Flywheel*^{5,10,12,22-23} e bidirário no caso do *Galileo Space*^{8,15-16,20,26,31}. A frequência de três dias por semana parece¹⁶ ser suficiente²³, embora o estabelecimento de um consenso na literatura sobre a dose de exercício necessária para manter as propriedades tendinosas¹⁰ e musculares^{14,22-23,27} ainda não tenha sido alcançado¹⁶. De facto, os dois aparelhos parecem ser eficazes em manter estas propriedades, mas o sistema de elásticos do *Galileo Space*⁵⁴ não obtém resultados satisfatórios noutros sistemas fisiológicos, ao contrário do *Flywheel*^{8,23}. Por esta razão e devido ao menor consumo de tempo, o *Flywheel* parece ser mais adequado para a prática de exercício físico²³. Assim, o treino de baixa repetição com contrações combinadas concêntricas-excêntricas do *Flywheel*^{22-23,39} parece ser mais adequado para a manutenção das características musculares^{5,12,23}.

O tipo de exercício realizado também condiciona a performance muscular^{15,22-23,39,54-56}. A atrofia e a redução da força muscular podem apresentar-se persistentes em músculos que não são estimulados por exercícios específicos^{8,16,20,31}. Estes exercícios devem ser conduzidos para músculos com maior atrofia e maior perda de força, uma vez que o tempo disponível é reduzido e o treino de outros sistemas fisiológicos não deve ser minorado em microgravidade⁷.

Na generalidade, os exercícios utilizados estimulam o quadríceps ou os flexores plantares. Nos estudos com o *Galileo Space*, o *squat*, *heel raise* e *toe raise*^{8,15-16,20,30-31} são os exercícios mais frequentes, não diferindo do que é praticado ao nível do *Flywheel* (*squat* e *calf raise*)^{5,10,22-23}.

A escolha de exercícios específicos para combater a atrofia preferencial dos flexores plantares^{22,31} constitui um estímulo importante²³, seja através do aumento do número de repetições por *set*^{5,8,10,12,16,23,31} ou pela realização do *calf raise* uni e bilateralmente^{14,30-31}. Apesar deste incremento no estímulo, a atrofia mantém-se^{5,10,12,16,22-23,31}, eventualmente associada a uma desregulação local da síntese proteica^{10,17,22-23} ou devido alterações quantitativas e qualitativas nas fibras musculares²²⁻²³. Eventualmente, a condução de um treino que simule a exposição quotidiana^{23,31} destes músculos à carga poderá encontrar-se em condições de

responder favoravelmente à preservação das características musculares dos flexores plantares.

O treino também deverá iniciar-se o mais precocemente possível, tendo em consideração a rápida redução (nas primeiras duas semanas⁵⁷) da rigidez tendinosa, a qual é proporcionalmente maior e mais rápida do que as propriedades musculares, tanto em ausência de carga^{48,57} como ao treino^{39,49-58}. Presentemente, o treino não consegue manter, de forma integral, as propriedades tendinosas em microgravidade¹⁰.

De acordo com os dados provenientes do voo espacial, os programas de exercício^{7,34-35} apresentam uma combinação de treino aeróbio (cicloergómetro e passadeira adaptados) e de *resistance*. Estes equipamentos oferecem alguma protecção^{7,35} durante exposições de 4 a 6 meses em microgravidade, mas não eliminam⁷ a atrofia e a redução da força muscular^{7,34}. Não obstante, o equipamento de *resistance* parece ter algumas limitações à carga^{7,54}, o que pode conduzir a um treino ineficaz em termos de tempo e de preservação das características estudadas⁷. O exercício realizado em acamamento parece consumir menos tempo e necessitar de menos contrações musculares para produzir efeito⁷. Por contrapartida, a redução da performance muscular após voo espacial de longa duração é menor do que em regime de acamamento sem exercício no leito⁷.

Regista-se que os dados voo espacial estão condicionados³⁶ pela dimensão reduzida das amostras, adesão^{33-34,59} e fatores associados à exigência da missão que reduzem o tempo disponível para a prática de exercício físico^{35,37}. Por outro lado, os estudos de acamamento recorrem a amostras de indivíduos centradas no género masculino e com um regime de atividade física normal, ao contrário dos astronautas que possuem uma preparação física intensa^{7,14}. Além disso, regista-se que os estudos de acamamento podem conduzir a um enviesamento de resultados, seja através da resistência própria do membro inferior ao movimento no leito³³ ou através da ativação de determinados músculos¹⁴, o que não se vem a verificar em voo espacial¹⁴.

Intervenção após exposição

Alguns autores defendem que o período de recuperação é igual ou inferior ao período de ausência de carga⁶⁰⁻⁶¹, mas a atrofia é mais persistente se o indivíduo não realizou nenhum treino durante a ausência de carga¹⁵. Verifica-se ainda que, após missões de 17 dias no espaço, o decréscimo global (5-17%) na massa muscular só desaparece ao fim de 30-60 dias em gravidade³⁵. No único estudo encontrado sobre o papel da fisioterapia³⁸ verifica-se que a intervenção terapêutica pode reduzir o tempo de recuperação músculo-tendinosa³³ pós-exposição.

A redução da performance músculo-tendinosa poderá conduzir a défices sensório-motores e a um comprometimento global da função muscular através do uso inadequado de nutrientes³², redução da capacidade oxidativa³², resistência à insulina ou do aumento da fadiga⁷. A própria resposta diferencial³³ encontrada ao nível muscular, resultante, por vezes, de um estímulo inadequado

durante o treino¹⁶, pode traduzir-se em desequilíbrios musculares^{14,16,20,30,33} suscetíveis de produzirem lesões^{10,20,24} no regresso à carga^{36,62-64}. Entende-se, pois, que a intervenção terapêutica deve responder a esta necessidade, adequando a atividade excêntrica^{10,57}, reduzindo o encurtamento muscular²⁸ através do alongamento³⁴ e atendendo à atividade muscular compensatória resultante da posição crônica no acamamento¹⁷. A realização de tarefas motoras não isoladas em cadeia fechada^{24,65-66} para extensão da anca e joelho e flexão plantar^{24,65-66} deve ser considerada para recrutamento dos vastos^{12,16} e isquio-tibiais^{16,30} e não sobrestimular o reto femoral²⁴. O treino deve respeitar os potenciais desequilíbrios musculares emergentes, como é o caso dos flexores plantares²⁴ face ao tibial anterior, no sentido de restituir o momento da tibia-társica¹⁷ e o equilíbrio^{17,24}. Também os músculos da região da anca^{20,25} (em particular os adutores²⁹, psoas-íliaco²⁰ e costureiro²⁰) e coluna lombar (em particular o multifídus)¹⁵ devem ser trabalhados. O facto de os estudos serem direcionados para populações saudáveis conduz-nos a assumir que qualquer transposição direta dos programas de intensidade elevada para indivíduos descondicionados deve ser levada com cuidado¹⁴. Eventualmente, um treino inicial de baixa intensidade poderá vir a ser necessário para ajustar às necessidades, minimizando o risco de lesão durante a aprendizagem dos exercícios¹⁶, mas essa questão só poderá ser respondida por outros estudos.

Conclusão

A microgravidade induz alterações específicas nas propriedades músculo-tendinosas com especial enfoque na atrofia diferencial. A intervenção terapêutica, realizada através do treino durante e após exposição a microgravidade deve atender a estas características, optando por um treino específico que preserve a performance músculo-tendinosa e reduza o risco de lesão. De acordo com os estudos revistos, o treino de *resistance* de intensidade elevada, baixas repetições e consumo reduzido de tempo é o adequado. Pesquisas futuras deverão ter em conta a importância do treino combinado (aeróbio + *resistance*), a influência do género no treino e a contribuição das alterações neuromusculares e de fibras musculares no processo. Será igualmente importante o desenvolvimento de respostas apropriadas para reverter desequilíbrios musculares resultantes do treino ou da exposição a microgravidade.

Referências Bibliográficas

1. Descritores em Ciências da Saúde. Biblioteca virtual em saúde [Internet]. São Paulo: DECS; 1999. [updated 2011 Jan, cited 2011 Apr 8]. Available from: <http://decs.bvs.br/cgi-bin/wxis1660.exe/decserver/>. Portuguese
2. Baker E, Barratt M, Wear M. Human response to space flight. In Buckley JC, editor. Space physiology. New York: Oxford University Press; 2006. ISBN 9780195137255.
3. Di Prampero PE, Narici MV. Muscles in microgravity: from fibres to human motion. J Biomech. 2003;36(3):403-12.
4. Payne MW, Williams DR, Trudel G. Review space-flight rehabilitation. Am J Phys Med Rehabil. 2007;86(7):583-91.
5. Trappe S, Trappe T, Gallagher P, Harber M, Alkner B, Tesch P. Human single muscle fiber function with 84 day bed-rest and resistance exercise. J Physiol. 2004;557(Pt 2):501-13.
6. West JB. Physiology in microgravity. J Appl Physiol. 2000;89(1):379-84.
7. Trappe S, Costill D, Gallagher P, Creer A, Peters JR, Evans H, et. al. Exercise in space: human skeletal muscle after 6 months aboard the International Space Station. J Appl Physiol. 2009;106(4):1159-68.
8. Mulder ER, Stegeman DF, Gerrits KH, Paalman MI, Rittweger J, Felsenberg D, et. al. Strength, size and activation of knee extensors followed during 8 weeks of horizontal bed rest and the influence of a countermeasure. Eur J Appl Physiol. 2006;97(6):706-15.
9. Shackelford L. Musculoskeletal response to space flight. In Buckley J, editor. Space physiology. New York: Oxford University Press; 2006. ISBN 9780195137255.
10. Reeves ND, Manganaris CN, Ferretti G, Narici MV. Influence of 90-day simulated microgravity on human tendon mechanical properties and the effect of resistive countermeasures. J Appl Physiol. 2005;98(6):2278-86.
11. LeBlanc A, Rowe R, Schneider V, Evans H, Hedrick T. Regional muscle loss after short duration spaceflight. Aviat Space Environ Med. 1995;66(12):1151-4.
12. Tesch PA, Trieschmann JT, Ekberg A. Hypertrophy of chronically unloaded muscle subjected to resistance exercise. J Appl Physiol. 2004;96(4):1451-8.
13. Narici MV, de Boer MD. Disuse of the musculo-skeletal system in space and on earth. Eur J Appl Physiol. 2011;111(3):403-20.
14. Belavý DL, Armbrecht G, Gast U, Richardson CA, Hides JA, Felsenberg D. Countermeasures against lumbar spine deconditioning in prolonged bed rest: resistive exercise with and without whole body vibration. J Appl Physiol. 2010;109(6):1801-11.
15. Belavý DL, Hides JA, Wilson SJ, Stanton W, Dimeo FC, Rittweger J, et. al. Resistive simulated weightbearing exercise with whole body vibration reduces lumbar spine deconditioning in bed-rest. Spine (Phila Pa 1976). 2008;33(5):E121-31.
16. Belavý DL, Miokovic T, Armbrecht G, Rittweger J, Felsenberg D. Resistive vibration exercise reduces lower limb muscle atrophy during 56-day bed-rest. J Musculoskelet Neuronal Interact. 2009;9(4):225-35.
17. De Boer MD, Seynnes OR, di Prampero PE, Pisot R, Mekjavic IB, Biolo G, et. al. Effect of 5 weeks horizontal bed rest on human muscle thickness and architecture of weight bearing and non-weight bearing muscles. Eur J Appl Physiol. 2008;104(2):401-7.
18. Alkner BA, Berg HE, Kozlovskaya I, Sayenko D, Tesch PA. Effects of strength training, using a gravity-independent exercise system, performed during 110 days of simulated space station confinement. Eur J Appl Physiol. 2003;90(1-2):44-9.

19. Hackney KJ, Ploutz-Snyder LL. Unilateral lower limb suspension: integrative physiological knowledge from the past 20 years (1991-2011). *Eur J Appl Physiol.* 2012 ;112(1):9-22.
20. Dilani Mendis M, Hides JA, Wilson SJ, Grimaldi A, Belavy DL, Stanton W, et al. Effect of prolonged bed rest on the anterior hip muscles. *Gait Posture.* 2009;30(4):533-7.
21. Pavy-Le Traon A, Heer M, Narici MV, Rittweger J, Vernikos J. From space to Earth: advances in human physiology from 20 years of bed rest studies (1986-2006). *Eur J Appl Physiol.* 2007;101(2):143-94.
22. Alkner BA, Tesch PA. Efficacy of a gravity-independent resistance exercise device as a countermeasure to muscle atrophy during 29-day bed rest. *Acta Physiol Scand.* 2004;181(3):345-57.
23. Alkner BA, Tesch PA. Knee extensor and plantar flexor muscle size and function following 90 days of bed rest with or without resistance exercise. *Eur J Appl Physiol.* 2004;93(3): 294-305.
24. Belavý DL, Miokovic T, Armbrecht G, Richardson CA, Rittweger J, Felsenberg D. Differential atrophy of the lower-limb musculature during prolonged bed-rest. *Eur J Appl Physiol.* 2009;107(4):489-99.
25. Berg HE, Eiken O, Miklavcic L, Mekjavic IB. Hip, thigh and calf muscle atrophy and bone loss after 5-week bedrest inactivity. *Eur J Appl Physiol.* 2007;99(3):283-9.
26. Blottner D, Salanova M, Püttmann B, Schiffel G, Felsenberg D, Buehring B, et al. Human skeletal muscle structure and function preserved by vibration muscle exercise following 55 days of bed rest. *Eur J Appl Physiol.* 2006;97(3):261-71.
27. Gallagher P, Trappe S, Harber M, Creer A, Mazzetti S, Trappe T, et al. Effects of 84-days of bedrest and resistance training on single muscle fibre myosin heavy chain distribution in human vastus lateralis and soleus muscles. *Acta Physiol Scand.* 2005;185:61-9.
28. Kawakami Y, Akima H, Kubo K, Muraoka Y, Hasegawa H, Kouzaki M, et al. Changes in muscle size, architecture, and neural activation after 20 days of bed rest with and without resistance exercise. *Eur J Appl Physiol.* 2001;84(1-2):7-12.
29. Kawashima S, Akima H, Kuno SY, Gunji A, Fukunaga T. Human adductor muscles atrophy after short duration of unweighting. *Eur J Appl Physiol.* 2004;92(4-5):602-5.
30. Miokovic T, Armbrecht G, Felsenberg D, Felsenberg D, Belavý DL. Differential atrophy of the postero-lateral hip musculature during prolonged bedrest and the influence of exercise countermeasures. *J Appl Physiol.* 2011;110(4):926-34.
31. Mulder ER, Horstman AM, Stegeman DF, de Haan A, Belavy DL, Miokovic T, et al. Influence of vibration resistance training on knee extensor and plantar flexor size, strength, and contractile speed characteristics after 60 days of bed rest. *J Appl Physiol.* 2009;107(6):1789-98.
32. Mulder ER, Kuebler WM, Gerrits KH, Rittweger J, Felsenberg D, Stegeman DF, et al. Knee extensor fatigability after bedrest for 8 weeks with and without countermeasure. *Muscle Nerve.* 2007;36(6):798-806.
33. 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. *Med Sci Sports Exerc.* 2000;32(10):1743-7.
34. Lambertz D, Pérot C, Kaspranski R, Goubel F. Effects of long-term spaceflight on mechanical properties of muscles in humans. *J Appl Physiol.* 2001;90(1):179-88.
35. LeBlanc A, Lin C, Shackelford L, Sinityn V, Evans H, Belichenko O, et al. Muscle volume, MRI relaxation times (T2), and body composition after spaceflight. *J Appl Physiol.* 2000;89(6):2158-64.
36. Tesch PA, Berg HE, Bring D, Evans HJ, LeBlanc AD. Effects of 17-day spaceflight on knee extensor muscle function and size. *Eur J Appl Physiol.* 2005;93(4):463-8.
37. Trappe SW, Trappe TA, Lee GA, Widrick JJ, Costill DL, Fitts RH. Comparison of a space shuttle flight (STS-78) and bed rest on human muscle function. *J Appl Physiol.* 2001;91(1):57-64.
38. Shin D, Finni T, Ahn S, Hodgson JA, Lee HD, Edgerton VR, et al. Effect of chronic unloading and rehabilitation on human Achilles tendon properties: a velocity-encoded phase-contrast MRI study. *J Appl Physiol.* 2008;105(4): 1179-86.
39. Berg HE, Tesch A. A gravity-independent ergometer to be used for resistance training in space. *Aviat Space Environ Med.* 1994;65(8):752-6.
40. Berg HE, Tesch PA. Force and power characteristics of a resistive exercise device for use in space. *Acta Astronaut.* 1998;42(1-8):219-30.
41. Finni T, Komi PV, Lukkariniemi J. Achilles tendon loading during walking: application of a novel optic fiber technique. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol.* 1998;77(3):289-91.
42. Montgomery WH 3rd, Pink M, Perry J. Electromyographic analysis of hip and knee musculature during running. *Am J Sports Med.* 1994;22(2):272-8.
43. Akima H, Kubo K, Imai M, Kanehisa H, Suzuki Y, Gunji A, et al. Inactivity and muscle: effect of resistance training during bed rest on muscle size in the lower limb. *Acta Physiol Scand.* 2001;172(4):269-78.
44. Reeves NJ, Maganaris CN, Ferretti G, Narici MV. Influence of simulated microgravity on human skeletal muscle architecture and function. *J Gravit Physiol.* 2002;9(1):P153-4.
45. Kawakami Y, Abe T, Fukunaga T. Muscle-fiber pennation angles are greater in hypertrophied than in normal muscles. *J Appl Physiol.* 1993;74(6):2740-4.
46. Kubo K, Akima H, Ushiyama J, Tabata I, Fukuoka H, Kanehisa H, et al. Effects of resistance training during bed rest on the viscoelastic properties of tendon structures in the lower limb. *Scand J Med Sci Sports.* 2004;14(5):296-302.
47. Maganaris CN, Reeves ND, Rittweger J, Sargeant AJ, Jones DA, Gerrits K, et al. Adaptive response of human tendon to paralysis. *Muscle Nerve.* 2006;33(1):85-92.
48. Kubo K, Akima H, Ushiyama J, Tabata I, Fukuoka H, Kanehisa H, et al. Effects of 20 days of bed rest on the viscoelastic properties of tendon structures in lower limb muscles. *Br J Sports Med.* 2004;38(3):324-30.

49. Reeves ND, Narici MV, Maganaris CN. In vivo human muscle structure and function: adaptations to resistance training in old age. *Exp Physiol*. 2004;89(6):675-89.
50. Tesch PA, Ekberg A, Lindquist DM, Trieschmann JT. Muscle hypertrophy following 5-week resistance training using a non-gravity-dependent exercise system. *Acta Physiol Scand*. 2004;180(1):89-98.
51. Trappe TA, Burd NA, Louis ES, Lee GA, Trappe SW. Influence of concurrent exercise or nutrition countermeasures on thigh and calf muscle size and function during 60 days of bed rest in women. *Acta Physiol (Oxf)*. 2007;191(2):147-59.
52. Trappe S, Creer A, Slivka D, Minchev K, Trappe T. Single muscle fiber function with concurrent exercise or nutrition countermeasures during 60 days of bed rest in women. *J Appl Physiol*. 2007;103(4):1242-50.
53. Trappe S, Creer A, Minchev K, Slivka D, Louis E, Luden N, et al. Human soleus single muscle fiber function with exercise or nutrition countermeasures during 60 days of bed rest. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol*. 2008;294(3):R939-47.
54. Schneider SM, Amonette WE, Blazine K, Bentley J, Lee SM, Loehr JA, et al. Training with the International Space Station interim resistive exercise device. *Med Sci Sports Exerc*. 2003;35(11):1935-45.
55. Akima H, Ushiyama J, Kubo J, Fukuoka H, Kanehisa H, Fukunaga T. Effect of unloading on muscle volume with and without resistance training. *Acta Astronaut*. 2007;60(8-9):728-36.
56. Kouzaki M, Masani K, Akima H, Shirasawa H, Fukuoka H, Kanehisa H, et al. Effects of 20-day bed rest with and without strength training on postural sway during quiet standing. *Acta Physiol (Oxf)*. 2007;189(3):279-92.
57. De Boer MD, Maganaris CN, Seynnes OR, Rennie MJ, Narici MV. Time course of muscular, neural and tendinous adaptations to 23 day unilateral lower-limb suspension in young men. *J Physiol*. 2007;583(Pt 3):1079-91.
58. Reeves ND, Narici MV, Maganaris CN. Strength training alters the viscoelastic properties of tendons in elderly humans. *Muscle Nerve*. 2003;28(1):74-81.
59. Kozlovskaya IB, Barmin VA, Stepantsov VI, Kharitonov NM. Results of studies of motor functions in long-term space flights. *Physiologist*. 1990;33(1 Suppl):S1-3.
60. Berg HE, Larsson L, Tesch PA. Lower limb skeletal muscle function after 6 weeks of bed rest. *J Appl Physiol*. 1997;82(1):182-8.
61. LeBlanc AD, Schneider VS, Evans HJ, Pientok C, Rowe R, Spector E. Regional changes in muscle mass following 17 weeks of bed rest. *J Appl Physiol*. 1992;73(5):2172-8.
62. Fitts RH, Riley DR, Widrick JJ. Functional and structural adaptations of skeletal muscle to microgravity of skeletal muscle to microgravity. *J Exp Biol*. 2001;204(Pt 18):3201-8.
63. Ploutz-Snyder LL, Tesch PA, Hather BM, Dudley GA. Vulnerability to dysfunction and muscle injury after unloading. *Arch Phys Med Rehabil*. 1996;77(8):773-7.
64. Prou E, Marini JF. Muscle research in space-increased muscle susceptibility to exercise-induced damage after a prolonged bed-rest. *Int J Sports Med*. 1997;18 Suppl 4:S317-20.
65. Enocson AG, Berg HE, Vargas R, Jenner G, Tesch PA. Signal intensity of MR-images of thigh muscles following acute open- and closed chain kinetic knee extensor exercise: index of muscle use. *Eur J Appl Physiol*. 2005;94(4):357-63.
66. Richardson RS, Frank LR, Haseler LJ. Dynamic knee-extensor and cycle exercise: functional MRI of muscular activity. *Int J Sports Med*. 1998;19(3):182-7.

Artigo recebido em 22.10.2011 e aprovado em 11.10.2012