

OS EFEITOS DE UM PROGRAMA DE ATIVIDADE FÍSICA DE CARGA PROGRESSIVA NAS PROPRIEDADES FÍSICAS E NA FORÇA ÓSSEA DE RATAS OSTEOPÊNICAS

THE EFFECTS OF A PROGRESSIVE LOADING EXERCISE PROGRAM ON FEMORAL PHYSICAL PROPERTIES AND STRENGTH OF OSTEOPENIC RATS

ANA CLAUDIA MUNIZ RENNO¹, FLAVIA ROBERTA FAGANELLO¹, FERNANDA MENDES DE MOURA²,
NÁDIA SLEMER ANDRADE DOS SANTOS², RENATA PASSARELLI TIRICO², PAULO SÉRGIO BOSSINI³, JOSE ANTONIO ZUANON⁴,
CARLOS BENATTI NETO⁴, NIVALDO ANTONIO PARIZOTTO⁵

RESUMO

Muitos estudos demonstram que programas de atividade física são eficazes para estimular o metabolismo ósseo, sendo utilizados como uma modalidade terapêutica em caso de perda óssea devido a osteoporose. Entretanto, vários pontos relacionados a intensidade e frequência ideal para do exercício físico ainda não estão esclarecidos. Com isso, o objetivo deste estudo foi determinar os efeitos de um programa de exercícios físicos de alta intensidade na morfometria, na força óssea e no conteúdo mineral do fêmur de ratas osteopênicas. Foram utilizadas 40 ratas, distribuídas em 4 grupos: grupo intacto sedentário (SS); grupo osteopênico sedentário (OS); grupo intacto treinamento (ST) e grupo osteopênico treinamento (OT). O programa de exercício foi iniciado 8 semanas após a ovariectomia e foi realizado 3 vezes por semana, durante 8 semanas. Cada sessão foi constituída por 4 séries de 10 saltos cada. Após a eutanásia dos animais, os fêmures foram retirados e processados para as análises. Resultados: os animais osteopênicos sedentários demonstraram uma diminuição da força óssea e uma diminuição dos pesos ósseos, da densidade óssea e do conteúdo de cálcio. As ratas osteopênicas exercitadas mostraram maiores valores na avaliação dos pesos ósseos, da força óssea, da densidade óssea e do conteúdo mineral, evidenciando o efeito positivo deste protocolo no metabolismo ósseo. Os resultados deste estudo indicam que a intensidade e a duração do programa de exercícios utilizado foi eficaz para produzir modificações nas propriedades geométricas e na força óssea, nos fêmures das ratas osteopênicas, o que contribuiu para reverter as perdas ósseas após a ovariectomia.

Descritores: Osteoporose, Ovariectomia, Exercício físico, Ratos.

Citação: Renno ACM, Faganello FR, Moura FM, Santos NSA, Tirico RP, Bossini PS et al. Os efeitos de um programa de atividade física de carga progressiva nas propriedades físicas e na força óssea de ratas osteopênicas. *Acta Ortop Bras.* [periódico na Internet]. 2007; 15(5):276-279. Disponível em URL: <http://www.scielo.br/aob>

INTRODUÇÃO

A osteoporose é uma doença de imensa importância socioeconômica, tendo sido reconhecida como um grande problema de saúde pública. Este é um distúrbio ósseo caracterizado por perda de massa óssea, resultando em enfraquecimento dos ossos e em aumento da susceptibilidade a fraturas^(1,2).

Já foram desenvolvidos vários tratamentos objetivando a prevenção da perda óssea, incluindo reposição de estrogênios, compostos bifosfonados e programas de atividade física⁽³⁾. A atividade física tem sido defendida como possível meio de promover aumento e manutenção da densidade mineral óssea (DMO), constituindo um tratamento eficiente para administrar a perda de ossos em pacientes osteoporóticos.

SUMMARY

Background: Many studies have shown that physical exercises are able to stimulate bone formation and increase bone mass, constituting a therapeutic modality for the treatment of bone loss due to osteoporosis. However, some points about the intensity, duration and frequency of the exercises remain confusing and contradictory. Thus, the aim of this study was to determine the effects of a progressive loading exercise program on femur of osteopenic rats. To induce osteopenia, we used the animal model of ovariectomy (OVX). Forty animals were studied and divided into 4 groups: sham-operated sedentary (SS); ovariectomy-sedentary (OS); sham-operated training (ST) and ovariectomy training (OT). The trained groups performed jumps into water: 4 series of 10 jumps each, with an overload of 50% to 80% of the animal's body weight, during 8 weeks. Femora were submitted to an evaluation of physical properties, a biomechanical test, calcium and phosphorus content measurement and a morphometric histological evaluation. Results: osteopenic animals showed a decrease of bone strength and lower values of bone weights, bone density and calcium content. The exercised osteopenic rats showed higher values of geometrical, physical properties, bone strength and calcium content compared to controls. The results of the present study indicate that the progressive loading exercise program has stimulatory effects on osteopenic rats' femora. It seems that the intensity and duration of the used protocol produced bone structural adaptations, which contributed to revert bone loss due to ovariectomy.

Keywords: Osteoporosis; Rats; Ovariectomy; Physical exercise.

Citation: Renno ACM, Faganello FR, Moura FM, Santos NSA, Tirico RP, Bossini PS et al. The effects of a progressive loading exercise program on femoral physical properties and strength of osteopenic rats. *Acta Ortop Bras.* [serial on the Internet]. 2007; 15(5): 276-279. Available from URL: <http://www.scielo.br/aob>.

Estudos com animais investigando as respostas osteogênicas a exercícios físicos avaliaram diversos tipos de treinos, inclusive corridas e caminhadas^(8,9) em ratos osteopênicos jovens. Estudos recentes demonstraram que os exercícios dinâmicos são mais eficazes para estimular o tecido ósseo do que os exercícios estáticos^(10,11). Acredita-se que a sensibilidade óssea decai rapidamente após o início dos exercícios, atingindo uma saturação mecânico-sensorial, depois da qual a massa óssea aumenta apenas conforme o aumento da intensidade da carga^(6,11). Além disso, vários autores afirmam que curtos períodos de exercícios com períodos de descanso entre os mesmos são mais eficazes em produzir uma resposta osteogênica do que uma única sessão mais prolongada de recuperação^(10,11).

Trabalho realizado na Universidade Federal de São Carlos (UFSCar).

Endereço para Correspondência: Rua Jose Paulino 1800 apt. 93, Centro, Campinas - São Paulo, Brasil, CEP 13013002. E-mail: acmr_ft@yahoo.com.br

1. Doutora, Departamento de Fisioterapia da Universidade Federal de São Carlos;
2. Estudante de Fisioterapia da Universidade Federal de São Carlos;
3. Mestranda do Departamento de Fisioterapia da Universidade Federal de São Carlos;
4. Doutor do Departamento de Fisiologia e Patologia da Universidade Estadual de São Paulo - UNESP;
5. Doutor do Departamento de Fisioterapia da Universidade Federal de São Carlos.

Trabalho recebido em 12/12/06 artigo aprovado em 05/07/07

Embora diversos estudos tenham demonstrado um efeito estimulatório dos exercícios sobre o tecido ósseo, o mecanismo pelo qual os exercícios interferem nos ossos não está totalmente compreendido. Além disso, alguns pontos sobre intensidade, duração e frequência dos exercícios permanecem confusos e contraditórios. Portanto, é importante estudar todos os aspectos da resposta óssea aos exercícios físicos de forma que os mesmos possam ser utilizados confiantemente como tratamento em um ambiente clínico.

Pouco se sabe a respeito dos efeitos de programas de exercícios aquáticos com carga progressiva sobre o tecido ósseo de ratos osteopênicos. Avaliamos a hipótese de se as contrações musculares realizadas durante exercícios de salto poderiam ser eficazes para induzir um efeito osteogênico, promovendo aumento da força e massa óssea femoral, mesmo na água, onde a força gravitacional é menor. Este tipo de exercício poderia ser útil em pacientes osteoporóticos, constituindo uma modalidade terapêutica mais segura em relação aos exercícios tradicionais, como caminhadas, uma vez que o risco de quedas e, conseqüentemente, de fraturas, é menor em ambientes aquáticos. O objetivo deste estudo foi de determinar a resposta dos fêmures de ratos osteopênicos a um treinamento com exercícios progressivos. Os fêmures foram examinados antropometricamente, sendo avaliados através de análise morfométrica e com a realização de testes biomecânicos para determinar sua força mecânica.

MATERIAIS E MÉTODOS

Quarenta ratos do sexo feminino da raça Wistar (12 semanas, \pm 250 g) foram utilizados neste experimento. As ratas foram randomizadas em 4 grupos, com 10 animais cada: sedentárias e com operação simulada (SS); ovariectomia-sedentárias (OS); com treinamento e operação simulada (ST) e ovariectomia e treinamento (OT).

Os demais animais foram mantidos em ambiente com temperatura controlada ($22 \pm 2^\circ$ C) no Biotério Experimental da Universidade Federal de São Carlos, com ciclo de claridade-escuridão de 12/12 horas. Os animais receberam ração padrão laboratorial e água *ad libitum*.

Procedimento Cirúrgico de Ovariectomia

A ovariectomia (OVX) foi realizada através de incisões translobares bilaterais, sob anestesia com Cetamina/ Xilazina (80/10 mg/Kg). As tubas uterinas foram ligadas (Catgut 4.0) e, após a remoção dos ovários, as incisões foram suturadas (Catgut 3.0). Os grupos de operação simulada foram submetidos a uma incisão cutânea seguida de sutura. Após a cirurgia, todos os animais foram condicionados durante 8 semanas com o objetivo de induzir osteopenia⁽⁹⁾.

Programa de exercícios com cargas progressivas

As ratas foram treinadas no mesmo horário todos os dias. O programa de treinamento consistia de exercícios com cargas progressivas. O treinamento ocorria em um contêiner (altura de 1 m; diâmetro de 80 cm), 60% preenchido com água morna (33° C). O treinamento foi iniciado no 61º dia após OVX. As ratas submetidas a exercícios foram treinadas 3 vezes por semana, durante 8 semanas (Figura 1). O programa de treinamento foi conduzido fixando-se uma carga adicional no corpo do animal através de um colete adequado que permitia a execução dos saltos sem que a vestimenta saísse do corpo das ratas⁽¹²⁾. A carga aumentava durante o experimento, sendo ajustada diariamente (Tabela 1). Para reduzir o estresse, os animais foram adaptados à água na primeira semana (pré-treinamento). Esta adaptação consistia de sessões de levantamento de peso (carga de 40% do peso corpóreo), uma vez ao dia, durante 5 dias. Após a semana de pré-treinamento, os animais iniciaram o protocolo de treinamento experimental, que consistia de saltos dentro da água⁽¹²⁾ (Figura 1).

Resumidamente o protocolo de treinamento foi o seguinte: Primeira e segunda semana de treinamento: 4 séries de 10 saltos, sobrecarga em 50% do peso corpóreo. Segunda semana: 4 séries de 10 saltos, sobrecarga em 60% do peso corpóreo das ratas.

Terceira e quarta semanas: 4 séries de 10 saltos, em 60%. Quinta e sexta semanas: 4 séries de 10 saltos em 70% e; sétima e oitava semanas: 4 séries de 10 saltos, em 80%. Foi permitido descanso de 30 segundos entre as séries. Um observador estava presente durante todas as sessões de treinamento⁽¹²⁾.

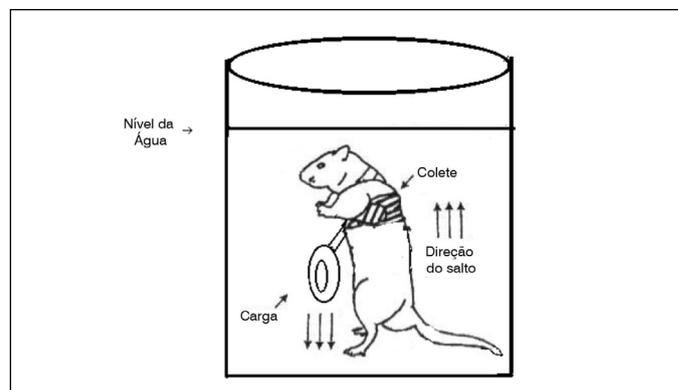


Figura 1 - Ilustração esquemática do container

Semanas	Peso
Dia 1	20% da massa corpórea
Dia 2	30% da massa corpórea
Dia 3	40% da massa corpórea
Dias 4 -7	50% da massa corpórea
2	50% da massa corpórea
3 e 4	60% da massa corpórea
5 e 6	70% da massa corpórea
7 e 8	80% da massa corpórea

Tabela 1 - Programa de exercícios físicos

Este estudo foi aprovado pelo Comitê de Ética em Estudos Animais da Universidade Federal de São Carlos.

Após 8 semanas experimentais, as ratas foram sacrificadas com uma overdose de anestésico geral. O sucesso da operação era confirmado na necropsia através da confirmação da ausência de tecido ovariano e pela observação de acentuada atrofia da tuba uterina. Ambos os fêmures foram retirados, tendo sido removidos os tecidos moles para análise.

Comprimento femoral: esta medida foi feita no fêmur esquerdo, desde o trocânter femoral maior até a extremidade do côndilo lateral, utilizando um compasso digital (Bron-Sharp, erro de medição = 0,1%). Na seqüência, os fêmures esquerdos eram submetidos ao teste biomecânico.

Teste mecânico: este teste foi realizado no laboratório de Fisiologia Humana da Universidade Federal de São Carlos. As propriedades biomecânicas dos fêmures foram determinadas por um teste de inclinação de três pontos em uma Máquina Universal de Testes Instron (Instron cop, Cantn, MA, modelo 4444). Anteriormente ao teste, os ossos foram descongelados em temperatura ambiente. Cada osso foi colocado em um dispositivo de sustentação com dois suportes localizados a uma distância de 13 mm. Os fêmures foram carregados até a falha no teste de inclinação de três pontos no ponto médio dos fêmures, a uma velocidade cruzada perpendicular da cabeça de 5 mm/min. A partir da curva de carga-deformação, a carga máxima (N), a rigidez estrutural (N/mm) e a absorção de energia (mJ) foram obtidas.

Propriedades físicas: Após o teste mecânico, ambas as partes dos fêmures direitos foram incineradas a 800°C por 24 horas, para se obter o peso das cinzas (PC), utilizando uma balança digital eletrônica de alta precisão (Chyo, erro de medição = 0,1%). A densidade óssea (DO) e o volume ósseo (VO) foram calculados utilizando-se o princípio de Arquimedes⁽¹³⁾.

Propriedades geométricas: Após o sacrifício, os fêmures esquerdos foram fixados em formalina e descalcificados (utilizando a solução de Morse – 20% Citrato de Sódio e 50% de Ácido Fórmico). Para análise das propriedades geométricas, os fêmures foram cortados ao meio e ambas as partes foram imersas em parafina e processadas para análise histológica. Foram feitos cortes transversos de 5

mc e tingidos com tricoma de Masson. Foram tiradas fotografias de cada corte utilizando-se um microscópio (OLYMPUS), com objetiva de 40 X, e câmera acoplada ao microscópio. Um sistema de software específico para análises Imagelab foi utilizado para calcular a área transversal, a área medular e os diâmetros interno e externo. Conteúdo de Cálcio e Fósforo: Conteúdo de Cálcio e Fósforo: A análise espectrofotométrica indicando o conteúdo geral de cálcio e fósforo foi determinada através de um comprimento de onda de absorção de 490 nm.

ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os resultados são fornecidos como média e desvio padrão. O teste ANOVA foi utilizado para comparar as alterações entre os grupos e o teste de Duncan para identificar as diferenças. Um nível de $p \leq 0,05$ foi considerado como estatisticamente significativo.

RESULTADOS

Pode-se observar pela Tabela 2 que a massa corpórea inicial dos animais não demonstrava nenhuma diferença estatística entre si. A ovariectomia produziu um aumento estatisticamente significativo da massa corpórea final e da variação de massa corpórea durante o experimento (Tabela 2).

Grupos (n)	Massa corpórea inicial (g)	Massa corpórea final (g)	Aumento de massa corpórea (g)
Basal	251,66 ± 9,42		
OS	248 ± 6,6	305,5 ± 8,5	57,5 ± 2
SS	246,5 ± 14,11	285,5 ± 17,9 ⁱ	38,5 ± 3,7 ⁱ
ST	255,5 ± 13,54	288,8 ± 14,65 ⁱ	33,3 ± 0,2 ⁱ
OT	249,2 ± 5,7	302,4 ± 11,84 ^a	53,2 ± 6,1 ^a

ⁱ vs OS; ^a vs SS; ^a vs ST, $p \leq 0,05$

Tabela 2 - Massa corpórea das ratas

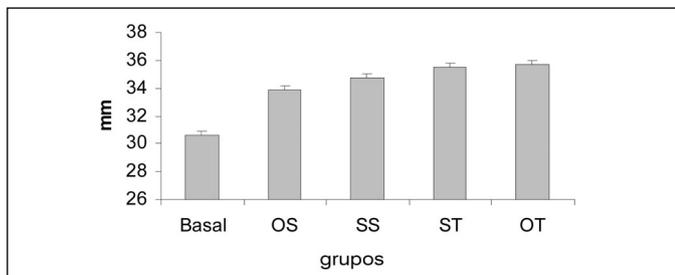


Figura 2 - Comprimento femoral; @ vs basal; ⁱ vs OS; $p \leq 0,05$

A OVX levou a uma redução significativa da área transversal, da área medular e do diâmetro externo em comparação aos grupos de operação simulada e OT. O diâmetro interno de animais sedentários com operação simulada era maior do que os outros grupos. A área medular e o diâmetro externo do grupo osteopênico treinado demonstraram valores maiores estatisticamente significativos em comparação aos animais osteopênicos sedentários ($p = 0,0021$ e $p = 0,0038$, respectivamente) e não demonstraram diferenças em relação aos animais dos grupos SS e ST (Tabela 3).

Grupos	Área transversal (mm ²)	Área medular (mm ²)	Diâmetro externo (mm)	Diâmetro interno (mm)
Basal	3,5 ± 0,4	1,8 ± 0,12	3 ± 0,2	2,1 ± 0,13
OS	3,7 ± 0,26	2,0 ± 0,14	3,1 ± 0,26	2,3 ± 0,26
SS	4,7 ± 0,7 ^{@i}	2,5 ± 0,25 ^{@i}	3,7 ± 0,4 ^{@i}	2,6 ± 0,12 ^{@i}
ST	4,9 ± 0,35 ^{@i}	2,4 ± 0,39 ^{@i}	4 ± 0,15 ^{@i}	2,3 ± 0,14 [*]
OT	4,7 ± 0,32 ^{@i}	2,02 ± 0,15 ^{@*a}	3,9 ± 0,16 ^{@i}	2,3 ± 0,1 [*]

[@] vs basal; ⁱ vs OS; ^{*} vs SS; ^a vs ST, $p \leq 0,05$

Tabela 3 - Propriedades geométricas dos fêmures

A OVX produziu uma redução significativa do comprimento femoral em comparação ao grupo SS. Além disso, podemos observar pela tabela 3 que os animais submetidos a exercícios demonstraram valores maiores de comprimento femoral, sugerindo que o programa de treinamento exercia um efeito estimulatório sobre o crescimento ósseo.

As propriedades físicas dos fêmures (peso das cinzas, volume ósseo, densidade óssea e densidade mineral) foram significativamente menores nos animais osteopênicos sedentários em comparação aos demais grupos, com exceção da densidade óssea e da densidade mineral dos animais sedentários com operação simulada (SS). Os animais submetidos a exercícios físicos apresentaram valores superiores de peso de cinzas, densidade óssea e densidade mineral em relação ao grupo SS, indicando efeito positivo dos exercícios. Não foram observadas diferenças entre os animais dos grupos ST e OT (Tabela 4).

Grupos	Peso das Cinzas (g)	Volume ósseo (cm ³)	Densidade óssea (g/cm ³)	Densidade mineral (g/cm ³)
Basal	0,28 ± 0,02	0,5 ± 0,05	1,46 ± 0,05	0,59 ± 0,04
OS	0,3 ± 0,003 [@]	0,52 ± 0,05 [@]	1,5 ± 0,02 [@]	0,59 ± 0,02
SS	0,34 ± 0,004 ^{@i}	0,57 ± 0,04 ^{@i}	1,50 ± 0,03 [@]	0,60 ± 0,04 [@]
ST	0,41 ± 0,004 ^{@i*}	0,60 ± 0,04 ^{@i}	1,56 ± 0,02 ^{@i*}	0,68 ± 0,02 ^{@i*}
OT	0,39 ± 0,02 ^{@i*}	0,59 ± 0,04 ^{@i}	1,57 ± 0,02 ^{@i*}	0,68 ± 0,02 ^{@i*}

[@] vs basal; ⁱ vs OS; ^{*} vs SS; $p \leq 0,05$

Tabela 4 - Propriedades físicas dos fêmures

As médias de carga máxima dos animais do grupo OS foram significativamente menores do que nos grupos SS, ST e OT ($p = 0,0091$, $p = 0,004$ e $p = 0,0027$, respectivamente). As cargas máximas dos grupos ST e OT foram maiores do que no grupo SS. Nenhuma diferença estatisticamente significativa foi observada entre as ratas submetidas a exercícios e operação simulada e as ratas osteopênicas submetidas a exercícios. A rigidez estrutural foi maior nos animais dos grupos SS, ST e OT em comparação ao grupo OS. A absorção de energia dos animais sedentários com operação simulada foi maior do que nos outros grupos. Nenhuma outra diferença foi encontrada nesta variável (Tabela 5).

Grupos	Carga máxima (N)	Absorção de energia (mJ)	Rigidez estrutural (N/mm)
Basal	82,11 ± 14,89	52,2 ± 4,52	152,26 ± 4,89
OS	89,16 ± 14,89	57,12 ± 6,65	186,59 ± 26,62
SS	109,67 ± 13,6 ^{@i}	61 ± 14	232,1 ± 35,14 ^{@i}
ST	129,78 ± 20 ^{@i*}	77,8 ± 18 ^{i*}	253,31 ± 35,2 ^{@i}
OT	124,97 ± 13,23 ^{@i*}	65,33 ± 13,4	231,89 ± 54,8 ^{@i}

[@] vs basal; ⁱ vs OS; ^{*} vs SS; $p \leq 0,05$

Tabela 5 - Propriedades biomecânicas

A Tabela 6 demonstrou os valores encontrados na avaliação do conteúdo mineral. Os animais osteopênicos sedentários demonstraram valores inferiores de conteúdo de cálcio. Nenhuma outra diferença foi encontrada entre os outros grupos.

Grupos	Cálcio (mg/ Kg)	Fósforo (mg/ kg)
Basal	343,49 ± 21,85	165,04 ± 7,76
OS	332,50 ± 16,59	159,96 ± 13,65
SS	367 ± 25,80 ^{@i}	160,39 ± 13,08
ST	375,71 ± 20,70 ^{@i}	160,55 ± 8,64
OT	368,66 ± 17,78 ^{@i}	153,59 ± 13,71

[@] vs basal; ⁱ vs OS; $p \leq 0,05$

Tabela 6 - Conteúdo de cálcio e fósforo

DISCUSSÃO

Observamos que o modelo de ovariectomia em ratas foi eficiente para induzir osteopenia nos animais estudados. Os animais do grupo OS apresentaram uma redução significativa das áreas transversais, diâmetros externos, áreas medulares, pesos ósseos e resistência óssea em comparação aos demais grupos. As ratas osteopênicas foram então examinadas para determinar o efeito do exercício de saltos na água sobre seus fêmures. Considerou-se que o exercício de salto realizado na água exercia um efeito

estimulatório sobre ossos osteopênicos, melhorando a resistência femoral, as propriedades físicas e geométricas dos fêmures, e aumentando o conteúdo de cálcio em ratas osteopênicas submetidas a exercícios físicos.

Programas de exercícios físicos têm sido amplamente utilizados como parte do tratamento e da prevenção da osteoporose⁽¹⁴⁾. A atividade física induz um aumento da carga mecânica que age sobre o tecido ósseo devido a forças externas e contrações musculares. O aumento da carga mecânica gera uma força de tensão, que impede o remodelamento dos ossos e conserva/aumenta a massa óssea^(4,5). Turner e Robling⁽¹⁵⁾ afirmaram que cargas mecânicas em ossos criam um gradiente dentro da rede lacunar-canalicular preenchida pelos fluidos ósseos que promove uma cascata de eventos celulares, incluindo a elevação dos níveis de cálcio intracelulares, da expressão de fatores de crescimento e aumento da produção de matriz óssea.

Nossos resultados estão de acordo com outros estudos que revelaram que um programa de exercícios pode estimular a osteogênese, aumentando os valores de pesos ósseos e área transversal após OVX^(4-8,16,17). Além disso, Peng et al.⁽⁵⁾ e Hart et al.⁽⁶⁾ relataram que a OVX leva a um enfraquecimento significativo da resistência óssea e que um programa de exercícios foi capaz de reverter este decréscimo.

Algumas das principais preocupações sobre o papel das atividades físicas sobre a estimulação de tecidos ósseos são a modalidade e a intensidade dos exercícios^(5,18). Vários estudos demonstraram que exercícios de sustentação de pesos podem aumentar a densidade mineral óssea (DMO)⁽¹⁹⁻²¹⁾. Embora a sustentação de peso seja um dos fatores mais importantes para influenciar a formação e reabsorção de ossos esponjosos, existem evidências de que exercícios que não utilizam sustentação de peso também poderiam beneficiar a osteogênese^(6,7). Por exemplo, em humanos, Yung et al.⁽²²⁾ descobriu que nadadores apresentavam mais massa óssea calcânea do que os controles sedentários. Snyder et al.⁽²³⁾ que compararam os efeitos de um programa de corrida e um treinamento de natação, observaram que os ratos nadadores demonstravam maior conteúdo mineral ósseo do que os ratos corredores.

Supõe-se que as contrações musculares realizadas durante o exercício de nadar podem exercer efeitos osteogênicos, sendo responsáveis pela adaptação positiva de massa óssea⁽⁶⁾. Aparentemente, mais de 70% do momento de inclinação de um osso são transmitidos pela força muscular ao invés de pelo peso corpóreo, amparando a idéia de que a força muscular impõe cargas maiores aos ossos do que as forças gravitacionais associadas ao peso⁽²⁴⁾.

Podemos teorizar que os efeitos estimulatórios do presente programa de exercícios nos fêmures de ratas osteopênicas poderiam estar relacionados às contrações dos músculos dos membros inferiores necessárias para a realização dos saltos. Provavelmente, as forças geradas pelos músculos durante o exercício, suficientemente sobrecarregaram o tecido ósseo, produzindo adaptação óssea com aumento do metabolismo ósseo⁽²⁵⁾.

Além disso, o regime de exercícios utilizado no presente estudo sobrecarregou progressivamente os animais durante as 8 semanas de treinamentos com exercícios e que consistia de baixas repetições. Isto confirma as recentes teorias que sugerem que protocolos consistindo de várias sessões de menor número ao invés de esforços únicos repetitivos⁽¹¹⁾, ou um intervalo mais longo (30 s) ao invés de mais breves entra cada colocação de carga⁽²⁶⁾ são mais eficazes para aumentar a massa e a resistência óssea⁽⁶⁾. Adicionalmente, o protocolo de exercícios foi realizado em ambiente aquático, o que poderia ser mais seguro para indivíduos idosos para aumentar a força muscular e a qualidade óssea e a coordenação motora do que exercícios aeróbicos de alto impacto com carga.

A despeito dos efeitos positivos do presente programa de exercícios sobre os tecidos ósseos, devemos considerar algumas limitações deste estudo. Em primeiro lugar, nosso estudo não conseguiu comparar os efeitos do presente programa de treinamento com outros tipos de exercícios, como caminhadas ou corridas. Em segundo, não pudemos mensurar diretamente a magnitude da carga e nem a força gerada pelos animais durante o exercício de salto. Em terceiro, sugerimos que os efeitos positivos do protocolo de exercício sobre a massa óssea devem-se ao aumento da hipertrofia muscular. Entretanto, a massa muscular e sua correlação com o aumento da massa óssea não foram mensuradas.

Em conclusão, os exercícios com carga progressiva realizados em ambiente aquático conseguiram intensificar a resposta osteogênica no tecido osteopênico. Embora a força gravitacional e o impacto da carga sejam menores na água, provavelmente a hipertrofia muscular devido aos exercícios sobrecarregou o tecido ósseo, aumentando a massa femoral e a resistência femoral nas ratas osteopênicas. Dessa forma, o protocolo de exercícios utilizado neste estudo poderia constituir uma modalidade terapêutica alternativa mais segura a ser utilizada no tratamento e na prevenção de perda óssea, ao invés dos tradicionais exercícios de sustentação de peso. Contudo, são necessários mais estudos para esclarecer as influências das contrações musculares sobre a massa óssea e para comparar os efeitos do presente protocolo de exercícios com outros tipos de exercícios físicos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Culhan EG, Jimenez HI, King CBK. Thoracic kyphosis, rib mobility, and lung volumes in normal women and women with osteoporosis. *Spine*. 1994; 19:1250-55.
2. Klein RF, Mitchell SR, Phillips TJ, Belknap JK, Orwoll ES. Quantitative trait loci affecting peak bone mineral density in mice. *J Bone Min Res*. 1998; 13:1648-56.
3. Kalu DN. The ovariectomized rat model of postmenopausal bone loss. *Bone Miner*. 1991; 15: 175-191.
4. Barends EI, Lathon PV, Curry, DJ, Kukreja SC. Effects of endurance exercise on bone histomorphometric parameters in intact and ovariectomized rats. *Bone Miner*. 1994; 26:133-40.
5. Peng Z, Tuukkanen H, Zhang H, Jamsa T. The mechanical strength of bone in different rat models of experimental osteoporosis. *Bone*. 1994; 15:523-32.
6. Hart KJ, Shaw JM., Vajda E, Hegsted M, Miller SC. Swim-trained rats have greater bone mass, density, strength, and dynamics. *J Appl Physiol*. 2001; 91:1663-8.
7. Bourrin S, Palle S, Genty C, Alexandre C. Physical exercise during remobilization restores a normal bone trabecular network after tail suspension-induced osteopenia in young rats. *J Bone Miner Res*. 1995;10:820-8.
8. Honda A, Sogo S, Nagasawa S, Shimizu T, Umemura Y. High-impact exercise strengthens bone in rats ovariectomized with the same outcome as Sham rats. *J Appl Physiol*. 2003; 95:1032-7.
9. Notomi T, Lee SJ, Okimoto N, Okazaki Y, Takamoto T, Nakamura T, Suzuki M. Effects of resistance exercise training on mass, strength, and turnover of bone in growing rats. *Eur J Appl Physiol*. 2000; 82:268-74.
10. Turner CH., Robling AG. Exercises for improving bone strength. *Br J Sports Med*. 2005; 39:188-9.
11. Robling AG, Hinant FM, Burr DB, Turner CH. Shorter, more frequent mechanical loading sessions enhance bone mass. *Med Sci Sports Exerc*. 2002; 34:196-202.
12. Marqueti RC, Parizotto NA, Chriquer RS, Perez SE, Selistre-de-Araujo HS. Androgenic-anabolic steroids associated with mechanical loading inhibit matrix metalloproteinase activity and affect the remodeling of the achilles tendon in rats. *Am J Sports Med*. 2006; 34:1274-80.
13. Martin RB. Effects of simulated weightlessness on bone properties in rats. *J Biomech*. 1990; 23:1021-29.
14. Bayramoglu M, Sozay S, Karatas M, Kilinc S. Relationships between muscle strength and bone mineral density of three body regions in sedentary postmenopausal women. *Rheumatol Int*. 2005; 25:513-7.
15. Turner CH. Three rules for bone adaptation to mechanical stimuli. *Bone*. 1998; 23: 399-407.
16. Donahue HJ, Mazzeo RS, Horvath S.M. Endurance training and bone loss in calcium-deficient and ovariectomized rats. *Metabolism*. 1988; 37:741-4.
17. Myburgh KH, Noakes TD, Roodt M., Hough FS. Effect of exercise on the development of osteoporosis in adult rats. *J Appl Physiol*. 1989; 66:14-9.
18. Nordsletten L, Kaastad TS, Madsen JE, Reikeras O, Ostvebo R, Stromme JH, et al. The development of femoral osteopenia in ovariectomized rats is not reduced by high intensity treadmill training: a mechanical and densitometric study. *Calcif Tissue Int*. 1994; 55:436-42.
19. Grimston SK. An application of mechanostat theory to research design: a theoretical model. *Med Sci Sports Exerc*. 1993; 25:1293-7.
20. Kung AW, Ng, F. A rat model of thyroid hormone-induced bone loss: effect of anti-resorptive agents on regional bone density and osteocalcin gene expression. *Thyroid*. 1994; 4:93-8.
21. Heinonen A, Sievanen H, Kannus P, Oja P, Pasanen M, Vuori I. High-impact exercise and bones of growing girls: a 9-month controlled trial. *Osteoporos Int*. 2000; 11:1010-7.
22. Yung P, Lai YM, Tung PY, Tsui HT, Wong CK, Hung VW, Oin L. Effects of weight bearing and non-weight bearing exercises on bone properties using calcaneal quantitative ultrasound. *Br J Sports Med*, 2005; 39:547-51
23. Snyder A, Zierath JR, Hawley JA, Sleeper MD, Craig BW. The effects of exercise mode, swimming vs. running, upon bone growth in the rapidly growing female rat. *Mech Ageing Dev*. 1992; 66:59-69.
24. Iwamoto J, Yeh JK, Aloia JF. Differential effect of treadmill exercise on three cancellous bone sites in the young growing rat. *Bone*. 1999; 24:163-9.
25. Mullender M, El Haj AJ, Yang Y, van Duin MA, Burger EH, Klein-Nulend J. Mechanotransduction of bone cells in vitro: mechanobiology of bone tissue. *Med Biol Eng Comput*. 2004; 42:14-21
26. Umemura Y, Sogo N, Honda A. Effects of intervals between jumps or bouts on osteogenic response to loading. *J Appl Physiol*. 2002; 93:1345-8.