

ROBERTO RODRIGUES BANDEIRA TOSTA MACIEL

**Propriedades mecânicas e densidade mineral óssea
de ratas Wistar submetidas a programas de
exercícios físicos em roda e piscina**

Dissertação apresentada à Faculdade de Medicina
da Universidade de São Paulo para obtenção do
título de Mestre em Ciências

Área de concentração: Ortopedia e Traumatologia
Orientador: Profa. Dra. Julia Maria D'Andrea Greve

São Paulo

2008

God,

Give us grace to accept with serenity the things that cannot be changed, courage to change the things which should be changed, and the wisdom to distinguish the one from the other.

Reinhold Niebuhr

DEDICATÓRIA

A Deus

A minha Mãe, por todo o apoio, amor e grande exemplo de perseverança.

AGRADECIMENTOS

À **Dra. Claudia Bahia**, grande exemplo de profissional e amiga, pela minha inserção na pesquisa e ensino e por viabilizar esse trabalho.

Ao **Dr. Paulo Henrique Pális Aguiar** por todos seus ensinamentos, apoio e constante incentivo.

À **Profa. Sheyla Carla**, pela amizade e grande ajuda na elaboração desse projeto.

Às **Profas. Milena Medrado** e **Cristina Camardelli**, do Centro Universitário FIB pela amizade e compreensão nos momentos que necessitei ausentarme da sala de aula.

À **Dra. Letícia Castro** por possibilitar realizar parte do projeto na FAFIS.

À **Profa. Grace Jacobina** pela amizade e constante apoio nos diversos momentos de dificuldades para a viabilização desse projeto.

Ao meu amigo **César Martins Pereira**, que foi mais que um colaborador, sem sua ajuda esse trabalho não teria sido realizado.

A **Mansueto Neto** e **Juliana Menezes**, pela análise. Grandes amigos.

Ao meu amigo **Cristiano Sena**, pela revisão

À **Dra. Rosa Maria** e ao **Dr. Raul Bolliger** por possibilitarem a realização dos exames de densitometria óssea e ensaios mecânicos

À Biomédica **Lilium** pela grande ajuda na realização dos exames de densitometria óssea e pelas sugestões dadas

Ao **Ivan Viana** do biotério Anilab e **Cosme Santos**, grandes amigos que participaram ativamente do experimento.

Esta dissertação está de acordo com as seguintes normas, em vigor no momento desta publicação:

Referências: adaptado de *International Committee of Medical Journals Editors* (Vancouver)

Universidade de São Paulo. Faculdade de Medicina. Serviço de Biblioteca e Documentação. *Guia de apresentação de dissertações, teses e monografias*. Elaborado por Anneliese Carneiro da Cunha, Maria Julia de A. L. Freddi, Maria F. Crestana, Marinalva de Souza Aragão, Suely Campos Cardoso, Valéria Vilhena. 2^a ed. São Paulo: Serviço de Biblioteca e Documentação; 2005.

Abreviaturas dos títulos dos periódicos de acordo com *List of Journals Indexed in Index Medicus*.

SUMÁRIO

SUMÁRIO

Lista de Abreviaturas

Lista de Figuras

Lista de Gráficos

Lista de Tabelas

RESUMO

SUMMARY

1	INTRODUÇÃO	2
2	OBJETIVOS	7
3	REVISÃO DA LITERATURA	9
3.1	Osso	9
3.2	Exercícios	10
4	MÉTODO E MATERIAL	17
4.1	Semana 1	18
4.2	Semana 2 a 32	18
4.3	Avaliação	20
4.3.1	Ensaio mecânico	21
4.3.2	Método Biomecânico	21
4.4	Análise estatística	28
5	RESULTADOS	30

6	DISCUSSÃO	49
7	CONCLUSÕES	56
8	ANEXOS	58
9	REFERÊNCIAS	84

APÊNDICE

LISTAS

ABREVIATURAS

GC	Grupo Controle
GN	Grupo Natação
GR	<i>Grupo Roda</i>
IAENE	Instituto Adventista do Nordeste
Mpa	Tensão
R	Coefficiente de relação

FIGURAS

Figura 1	– Rata em roda de exercitação (GR)	19
Figura 2	– Ratas sendo exercitadas em piscina (GN)	20
Figura 3	– Fêmur submetido a ensaio de flexão a três pontos	22
Figura 4	– Tíbia submetida a ensaio de flexão a três pontos	23
Figura 5	– Representação esquemática do ensaio de flexão	24
Figura 6	– Imagem representativa do programa de computador utilizado para determinar o momento de inércia. “A” e “B” correspondem aos contornos interno e externo respectivamente e “C” a escala correta	26
Figura 7	– Ilustração do relatório do exame de densitometria óssea através do densitômetro Discovery 4500 (Hologic)	27

GRÁFICOS

- Gráfico 1** – Média e desvio padrão do conteúdo mineral ósseo (G) do fêmur de ratas dos grupos roda (GR), natação (GN) e controle (GC) após 32 semanas de experiência **33**
- Gráfico 2** – Média e desvio padrão dos valores de densitometria do fêmur (g/cm²) de ratas dos grupos roda (GR), natação (GN) e controle (GC) após 32 semanas de experimento **34**
- Gráfico 3** – Média e desvio padrão do conteúdo mineral ósseo da tíbia (G) de ratas dos grupos roda (GR), natação (GN) e controle (GC) após 32 semanas de experimento **35**
- Gráfico 4** – Média e desvio padrão dos valores de densitometria da tíbia (g/cm²) dos grupos roda (GR), natação (GN) e controle (GC) após 32 semanas de experimento **36**
- Gráfico 5** – Média e desvio padrão do conteúdo mineral ósseo da coluna (G) dos grupos roda (GR), natação (GN) e controle (GC) após 32 semanas de experimento .. **37**
- Gráfico 6** – Média e desvio padrão dos valores de densitometria da coluna (g/cm²) dos grupos roda (GR), natação (GN) e controle (GC) após 32 semanas de experimento **38**
- Gráfico 7** – Média e desvio padrão dos valores de força máxima (N) dos fêmures dos grupos roda (GR), natação (GN) e controle (GC) após 32 semanas de experimento **39**
- Gráfico 8** – Média e desvio padrão dos valores de flecha (mm) dos fêmures dos grupos roda (GR), natação (GN) e controle (GC) após 32 semanas de experimento **40**

Gráfico 9	– Média e desvio padrão dos valores de momento de inércia (mm^4) dos fêmures dos grupos roda (GR), natação (GN) e controle (GC) após 32 semanas de experimento	41
Gráfico 10	– Média e desvio padrão dos valores de tensão (Mpa) dos fêmures dos grupos roda (GR), natação (GN) e controle (GC) após 32 semanas de experimento	42
Gráfico 11	– Média e desvio padrão dos valores de força máxima (N) das tíbias dos grupos roda (GR), natação (GN) e controle (GC) após 32 semanas de experimento	43
Gráfico 12	– Média e desvio padrão dos valores de flecha (mm) das tíbias dos grupos roda (GR), natação (GN) e controle (GC) após 32 semanas de experimento	44
Gráfico 13	– Média e desvio padrão dos valores de momento de inércia (mm^4) das tíbias dos grupos roda (GR), natação (GN) e controle (GC) após 32 semanas de experimento	45
Gráfico 14	– Média e desvio padrão dos valores de tensão (Mpa) das tíbias dos grupos roda (GR), natação (GN) e controle (GC) após 32 semanas de experimento	46
Gráfico 15	– O treinamento em piscina apresenta alta correlação (0,750127475) da tensão (Mpa) com a densidade mineral óssea (g/cm^2) em tíbias de ratas exercitadas em piscina	47

TABELAS

Tabela 1 – Densidade e conteúdo mineral ósseo dos grupos: Roda, Controle e Natação após 32 semanas de experimento. Comparação pelo teste de Análise de Variância com teste de comparações múltiplas de Tukey	30
Tabela 2 – Propriedades mecânicas das tíbias de ratas submetidas ao ensaio de flexão. Comparação dos grupos roda, natação e controle pelo teste de Análise de Variância com teste de comparações múltiplas de Tukey	31
Tabela 3 – Propriedades mecânicas dos fêmures de ratas submetidas ao ensaio de flexão. Comparação dos grupos roda, natação pelo teste de Análise de Variância com teste de comparações múltiplas de Tukey	32
Tabela 4 – Coeficiente de correlação (R) entre a tensão e a densidade mineral óssea (g/cm ²) de tíbias de ratas exercitadas em piscina (GN) após 32 semanas de experimento	47

RESUMO

Maciel RR. *Propriedades mecânicas e densidade mineral óssea de ratas Wistar submetidas a programas de exercícios físicos roda e piscina* (dissertação). São Paulo: Faculdade de Medicina, Universidade de São Paulo, 2008; 91p.

Introdução: Programas de exercício físico têm sido recomendados preventivamente para promover uma maior modelação óssea. A escolha da modalidade de exercício físico, assim como a manipulação de variáveis do exercício durante os programas de treinamento físico é tema ainda controverso. Incrementos de carga e presença de impacto durante o exercício físico têm sido princípios utilizados na maioria dos programas de exercício. **Objetivos:** Avaliar a eficiência de dois modelos de exercícios sem sobrecarga ou impacto e impacto mínimo. **Método e material:** Foram utilizadas 36 ratas Wistar, randomizadas em três grupos: Grupo Roda (GR), Grupo Natação (GN) e Grupo Controle (GC). Os grupos foram treinados durante 32 semanas, após as quais foram sacrificados. **Resultados:** Estudaram-se as propriedades mecânicas da tíbia e fêmur, a saber, momento de inércia, força máxima, flecha e tensão, assim como a densidade e conteúdo mineral do osso na tíbia, fêmur e coluna vertebral. Os resultados mostraram aumento da modelação óssea, principalmente na coluna vertebral e aumento do conteúdo mineral ósseo. Houve também aumento das propriedades biomecânicas das ratas treinadas comparadas com o grupo controle. O GR apresentou maior modelação óssea quando comparado com o GN. Não houve correlações entre os ensaios mecânicos e a densidade e conteúdo mineral ósseo. **Conclusões:** O modelo de exercícios empregado mostrou-se eficaz para promover maior modelação óssea.

Descritores: 1.Densidade óssea 2.Exercícios 3.Avaliação 4.Estudo comparativo 5.Ratos Wistar.

SUMMARY

Maciel RR. *Mechanical properties and Wistar female mice's bone mineral density submitted to physical exercise programs wheel and swimming pool* (dissertation). São Paulo: "Faculdade de Medicina, Universidade de São Paulo"; 2008. 91p.

Introduction: Preventive physical exercise's programs have been recommended in order to promote a bigger bone shape. Physical exercises modality selection, as well as exercises variable manipulation during physical training programming is a controversial topic yet. Weight increase and impact's presence during physical exercise have been principles used in the majority of exercise programming. **Objective:** to evaluate two models of exercise without overload and impact and minimal impact efficacy. **Method and Materials:** Thirty six female Wistar rats, at random divided in three groups, have utilized: Wheel Group (WG), Swimming Group (SG) and Control Group (CG). They trained for 32 weeks and then were sacrificed. Mechanical properties of tibia and femur such as inactivity moment, maximum strength, flexibility and tension were studied. Tibia, femur and spine density and mineral bone content were studied. **Results:** Results proved bone shape increase, mainly at the spine, as well as bone mineral density. Biochemical properties increased in trained when compared to Control Group female rats. No correlation was found among mechanical trails, density and mineral bone content. **Conclusions:** Pattern utilized exercises have shown their efficiency to promote a higher bone shape.

Descriptors: 1.Bone density 2.Exercises 3.Comparative study 4.Evaluation 5.Rats, Wistar.

INTRODUÇÃO

1 Introdução

A atividade física tem sido cada vez mais relacionada com a prevenção de doenças e a manutenção da saúde. A atividade física é definida como movimentos corporais produzidos por contração muscular, sem a necessidade de estruturação de parâmetros como intensidade, frequência e volume. O exercício físico é uma atividade física planejada, estruturada, repetitiva e intencional com objetivos específicos. O exercício também tem sido muito estudado na promoção da saúde, prevenção das doenças crônico-degenerativas e com o envelhecimento saudável. A maior vantagem da atividade física em relação ao exercício físico é a possibilidade de abranger grandes populações e ser mais fácil de ser utilizada em políticas públicas de promoção de saúde, ainda que envolva maiores riscos, exatamente pela sua maior abrangência e menor controle de parâmetros.

As políticas de saúde pública têm estimulado a prática de atividade física nas populações, sem necessidade de supervisão e monitoramento, como as caminhadas ou outras atividades com baixo gasto calórico, mas além do basal. A maioria dos estudos epidemiológicos mostra que os indivíduos ativos, que mantêm um programa de atividade física regular têm

menor prevalência de doenças crônicas degenerativas, como a doença arterial coronariana, diabetes e osteoporose.

Diversos autores demonstraram a importância do exercício físico na prevenção de doenças crônicas degenerativas, na saúde óssea, no controle do diabetes *mellitus* e na prevenção e tratamento de doenças cardiovasculares. Seus efeitos incluem:

- Melhoras das aptidões físicas: força muscular, flexibilidade, composição corporal e capacidade cardiovascular. (Poirier e Després, 2001)
- Alterações metabólicas: sensibilidade reduzida à insulina. (Stone e Schmelz, 2007).
- Mudanças na microarquitetura óssea. (Prior *et al.*, 1996).
- Aumento da resposta imune. (Nieman, 1998; Nieman e Pedersen, 1999).

McDermott (2006) mostra que há necessidade de se respeitar os princípios biológicos do treinamento físico, para se obter ganhos específicos da aptidão física. Para a aptidão cardiovascular, estímulos aeróbicos são necessários, a flexibilidade é obtida com exercícios de alongamento e a força muscular com exercícios resistidos. Identificar e prescrever o melhor exercício para cada indivíduo, ainda é um desafio e requer o conhecimento e entendimento dos efeitos dos exercícios no organismo humano.

Uma das grandes preocupações, dentro do universo de doenças crônico-degenerativas, tem sido a osteoporose, que atinge principalmente mulheres brancas e menopausadas. Pfister *et al.* (2007) encontraram uma prevalência de 26,6% de osteoporose em uma população de mulheres caucasianas nos Estados Unidos.

O exercício tem sido preconizado como um dos fatores de melhora da qualidade óssea, pelas modificações e adaptações na micro arquitetura óssea.

A literatura tem demonstrado a importância do exercício em modificar positivamente a osteogênese assim como a resistência do osso à fratura. Muitos autores apontam os exercícios contra resistência como os mais indicados, mas não existe consenso sobre o tipo e intensidade de exercício e se estes melhoram ou previnem, de fato, as perdas de massa óssea e a osteoporose. Os modelos experimentais de exercitação utilizados em piscina, na maioria dos trabalhos, recorrem ao uso de sobrecargas proporcionais ao peso corporal e não levam em consideração a composição corporal. Os exercícios em esteira recorrem a velocidades de corrida preestabelecidas e incremento na velocidade e inclinação. Não se sabe ao certo, de que forma o tecido ósseo reagiria se algumas das variáveis do exercício físico fossem modificadas. É possível que exercícios realizados em longo prazo, sem estabelecer o princípio da sobrecarga como parâmetro de treinamento e respeitando o tempo de duração e frequência possam também ser eficazes no aumento da densidade mineral óssea e das propriedades mecânicas dos ossos, levando a uma maior resistência às

fraturas. Esta hipótese pode ser particularmente importante para a prescrição de exercícios para grandes populações onde se torna complicado estabelecer parâmetros de exercício de forma individualizada e seu acompanhamento.

Os fatores genéticos e antropométricos, hábitos de vida, nutrição, aporte de vitaminas e cálcio também são apontados como fatores importantes na manutenção da qualidade dos ossos (Miller *et al.*, 1995). A falta de consenso sobre qual é a melhor prescrição de exercício para promover adaptações no tecido ósseo abre espaços para pesquisas que estudem as modificações, que os diversos tipos de exercícios causam no conteúdo e densidade mineral óssea e nas propriedades mecânicas dos ossos.

Este estudo tem como proposta principal avaliar os efeitos de treinamentos físicos na qual a manipulação da variável intensidade não seja fator determinante para a eficácia do exercício.

OBJETIVOS

2 Objetivos

- Avaliar o efeito da natação e dos exercícios terrestres sem incremento de sobrecargas de resistência, volume, frequência e intensidade no conteúdo e densidade mineral óssea e nas propriedades mecânicas dos ossos.

- Avaliar o comportamento do osso cortical e trabecular.

- Correlacionar os resultados de massa e conteúdo ósseo com as propriedades mecânicas.

REVISÃO DA LITERATURA

3 Revisão da Literatura

3.1 Osso

A dinâmica do tecido ósseo mantém a higidez do biomaterial, proporciona cálcio e fósforo e mantém a homeostase mineral e reorganiza o tecido ósseo fraturado nos estresses diários e é o mecanismo de adaptação aos novos estímulos. (Lane, 2006). Este é o processo de modelação e remodelação óssea. Na fase de crescimento ósseo, o processo de deposição óssea é superior à fase de absorção. No adulto jovem (30 - 40 anos), o balanço ósseo, é igual a zero. (Suominen, 2006). A partir dos 40 anos, o balanço ósseo é negativo. (Lamichhane, 2005). Wlodarski *et al.* (2007) afirmam que este processo de perda de massa óssea é decorrente de uma menor atividade osteoblástica.

A perda óssea não é uniforme em todo o tecido ósseo. No perióstio, há maior deposição óssea e no endóstio cortical e trabeculado, há maior absorção. O processo de remodelação do osso trabecular é mais acelerado que o do tecido cortical, resultando num balanço ósseo negativo com o envelhecimento. (Carvalho e Collares-Buzato, 2005).

3.2 Exercícios

O processo de perda óssea é inevitável com o envelhecimento (Kelley e Kelley, 2006). Porém, é possível se utilizar algumas estratégias durante a fase de modelação óssea, para que o pico de massa óssea seja atingido durante a fase de crescimento e a partir daí se mantenha um balanço ósseo equilibrado. A formação e remodelação óssea dependem de um aporte nutricional adequado e da produção de hormônios sexuais (Murphy e Carroll, 2003; Raisz, 2005; Lombardi *et al.*, 2005).

Uma das principais manifestações da perda óssea e que provoca alta mortalidade e morbidade, são as fraturas (Ensrud *et al.*, 2007). Está bem documentado por Gemalmaz *et al.* (2007) que hábitos saudáveis de vida, como atividade física regular estão associados a um risco menor de fraturas evidenciados através da medida da massa óssea. Cauley *et al.* (2005) sugere que o baixo conteúdo de massa óssea é o maior determinante de fraturas e seu incremento está associado à prática de atividades físicas. Albrand *et al.* (2003) em um estudo prospectivo, correlacionou um risco de fraturas aumentado em mulheres com idade média de 65 anos com baixos níveis de atividade física.

Daly (2007) sugere que a puberdade é o melhor período para o ganho de massa óssea e a prática regular de atividades físicas nesse período é altamente recomendada. Karlsson (2007), entretanto, ressalta que apesar de que alguns efeitos benéficos do exercício físico sejam preservados após a cessação da prática do exercício, a melhor estratégia é

que a prática de exercício iniciada precocemente deva se estender até a idade avançada.

O exercício físico, contudo, pode ser feito de maneira distinta e a depender da modalidade executada, seus efeitos serão específicos (Leveritt *et al.*, 1999; Häkkinen *et al.*, 2003).

Os exercícios podem ser classificados de acordo com o substrato energético predominante e com a sua forma de execução. Exercícios que visam ganhos de força muscular são normalmente executados em aparelhos contra resistência, com um número baixo de repetições e de forma intervalada utilizando preponderantemente a via anaeróbica como principal substrato energético (De Feo *et al.*, 2003). Exercícios ditos aeróbicos são realizados geralmente de forma contínua e a maioria dos estudos tem avaliado nesses estudos principalmente a resposta cardiovascular como um efeito do exercício (Carvalho *et al.*, 2003; Haskell *et al.*, 2007).

Os exercícios resistidos são feitos principalmente para aumentar a força muscular. Estudos associam o incremento de força muscular à maior densidade mineral óssea (Ryan *et al.*, 2004). Nos últimos anos aumentou a indicação dos exercícios de força em reabilitação geriátrica. (Hagerman *et al.*, 2000; Hazell *et al.*, 2007).

No que diz respeito à quantidade de exercício a ser realizado, ou seja o volume de exercício, Shipp (2006) ressalta que altos volumes de exercício acabam exercendo efeito contrário no que diz respeito ao aumento do tecido ósseo. Incluindo risco aumentado de osteoporose em algumas

mulheres atletas (Reinking e Alexander, 2005). Essa perda óssea seria decorrente de uma deficiência hormonal secundária a altos níveis de exigência física (Brunet, 2005).

Do ponto de vista da prescrição do exercício, existem diversos trabalhos que preconizam o exercício realizado com cargas para a aquisição e manutenção da massa óssea (Klentrou *et al.*, 2007; Keen, 2007).

Martin (2007) demonstra que a remodelação óssea é determinada pela solicitação a que os ossos são impostos. Sendo assim, ossos que sofrem maiores deformações, seja por impacto ou compressão, teriam uma maior adaptação. Adquirindo maior massa óssea tornando-se mais resistentes às fraturas.

Outra linha de prescrição de exercícios físicos por sua vez, preconiza a prática de atividades consideradas de baixa a moderada intensidade. Palombaro (2005), em revisão sistemática, demonstrou os efeitos benéficos da caminhada na densidade mineral óssea em coluna lombar de mulheres e homens acima de 50 anos. Refere, porém, que o estímulo não foi suficiente para modificar a densidade mineral óssea no fêmur e calcâneo.

Delaney (2006) sugere como uma importante estratégia não farmacológica para prevenção da osteoporose; manutenção e incremento da massa óssea a prática da atividade física regular não sugerindo um estímulo específico de exercício. Duque *et al.* (2007) também recomendam e não especificam a modalidade de exercício para tratamento de pacientes osteoporóticos. Beitz e Dören (2004) por sua vez sugerem que o melhor

estímulo físico é o exercício de alta intensidade, sem descartar, no entanto, atividades moderadas.

Frost (1994) refere que o impacto e compressão decorrentes das contrações musculares são a sinalização bioquímica para os osteoblastos e osteócitos, aumentam a síntese protéica e a massa óssea durante a fase de crescimento e mantém o balanço ósseo próximo a zero na idade adulta.

De acordo com Menkes *et al.* (1993) o efeito piezelétrico favorece o processo de remodelação óssea e segundo O'Brien (2001) baixos níveis de tensão em um segmento corporal impedem a osteogênese.

Dada a dificuldade de avaliar os efeitos do exercício físico na modelação e remodelação óssea em humanos durante longos períodos, diversos autores têm utilizado como modelo experimental o rato, em estudos que analisam a prática de exercícios físicos como agente indutor de modificações do tecido ósseo.

Hoshi *et al.* (1998) avaliaram camundongos nadando 40 minutos diários, cinco dias por semana, durante seis semanas consecutivas e mostrou aumento da densidade mineral óssea e das propriedades mecânicas no fêmur. Neste estudo, as fêmeas tiveram maior adaptação ao exercício que os machos.

Hart *et al.* (2001) avaliaram ratas ovariectomizadas, submetidas a um programa de natação cinco dias por semana, 60 minutos, durante 12 semanas e mostrou aumento da densidade mineral óssea e das propriedades mecânicas do fêmur.

Honda *et al.* (2003) demonstraram que exercícios de alto impacto como saltos realizados dez vezes ao dia, cinco dias por semana por oito semanas aumentaram a massa óssea de ratas ovariectomizadas.

Verhaeghe *et al.* (2000) submeteram ratas diabéticas a um treino de corrida por oito semanas e não encontrou diferenças na densidade mineral óssea em relação ao grupo controle.

Snyder *et al.* (1992) ao estudarem os efeitos da natação no tecido ósseo utilizou uma carga equivalente a 2% do peso corporal do animal preso à cauda. As outras variáveis do estudo foram mantidas como tempo de exercitação e freqüência. A resposta do exercício nestes animais foi comparada a um grupo de ratos que corriam em esteira com inclinação. Constatou-se que os animais treinados na piscina tiveram um incremento maior no conteúdo mineral ósseo.

Gomes *et al.* (2006) ao estudarem os efeitos do exercício de natação em ratas diabéticas propôs um programa de treinamento que consistia em exercitar os animais por uma hora ao dia, cinco vezes na semana durante 6 semanas. A sobrecarga imposta foi proporcional ao peso de cada animal.

Melton *et al.* (2004) ao estudar a densidade mineral óssea de ratas ovariectomizadas, realizaram um protocolo de treinamento em piscina 5 dias na semana por 6 semanas. Eles propuseram incrementar a sobrecarga, aumentando progressivamente o tempo de exercitação iniciando com 5 minutos diários e ao termino do exercício as ratas nadavam por 75 minutos. Com esse protocolo de exercício, foi possível reverter a perda óssea decorrente da hiperreatividade osteoclástica proveniente da ovariectomia.

A duração do programa de exercício é uma variável que deve ser sempre considerada para o entendimento do processo de adaptação do tecido ósseo. Diversos autores têm realizados estudos de exercitação em períodos que variam de 3 a 20 semanas tais como: 20 semanas (Simkin *et al.*, 1989), 10 semanas (Snyder, 1992), 6 semanas (Hoshi *et al.*, 1998), 8 semanas (Huang *et al.*, 2003), 8 semanas (Niehoff *et al.*, 2004).

Huang *et al.* (2003) constataram que a exercitação de ratos cinco dias na semana com sobrecarga de volume de treinamento de 20 minutos diários para 60 minutos diários, por oito semanas, em piscina é eficaz no aumento da resistência óssea avaliada através de ensaios mecânicos destrutivos. Porém ratos treinados com os mesmos parâmetros de tempo de exercitação e duração de treinamento, entretanto submetidos à corrida em esteira e com incrementos de velocidade de 12 m/min no início do treinamento a 22 m/min ao fim da 8ª semana apresentaram densidade mineral óssea em tíbia proximal superior ao grupo natação. Esses achados corroboram outros estudos em humanos que relatam que o impacto proporciona efeito benéfico na remodelação óssea como o estudo realizado por Taaffe *et al.* (1995) que constatou que mulheres Ginastas possuem densidade mineral óssea em coluna lombar superior às atletas nadadoras. Courteix *et al.* (1998) em estudo com nadadoras e ginastas com idade média de 10.5 (+/- 1,4anos) constataram que a ginástica olímpica foi eficaz no ganho de densidade mineral óssea, dado não encontrado por sua vez nas nadadoras.

MÉTODO E MATERIAL

4 Método e material

Foram utilizadas 36 ratas *Wistar*, isogênicas, com idade de 2 meses, peso médio de 90 gramas, procedentes do Biotério da Faculdade de Fisioterapia do Instituto Adventista do Nordeste – IAENE. Os animais foram mantidos individualmente em gaiolas de 15 x 30 x 45 cm de polietileno, em um regime de 12 horas/ luz e 12 horas /escuridão. A temperatura foi mantida continuamente a 21° C e tiveram a dieta padronizada com ração *Nuvilab-Mantença*[®] e água, ambos à vontade.

Os animais foram randomizados e divididos em três grupos assim denominados:

- a) Grupo Controle (GC) – constituído de 12 ratas mantidas individualmente em suas gaiolas e não submetidas a nenhum programa de exercício físico.

- b) Grupo Roda (GR) – constituído de 12 ratas mantidas individualmente em suas gaiolas e retiradas uma vez ao dia, cinco vezes por semana

para a realização do exercício em uma roda de exercitação (Figura 1).

- c) Grupo Natação (GN) – constituído de 12 ratas mantidas individualmente em suas gaiolas e retiradas uma vez ao dia, cinco vezes por semana para a realização do exercício em piscina (Figura 2).

O treinamento físico foi realizado no núcleo de pesquisa experimental da Faculdade de Fisioterapia do Instituto Adventista do Nordeste – IAENE. O programa durou 32 semanas.

4.1 Semana 1

- Aclimação dos animais aos programas de exercício;
- Aumento do tempo de exercitação de cinco em cinco minutos durante os cinco primeiros dias até chegar aos 25 minutos.

4.2 Semana 2 a semana 32

- Programa de exercício propriamente dito.

- **Grupo Roda (GR)** - foi projetada uma roda de exercício motorizada (Singer CAT.WAC78, 120v-50-60Hz, 85W6300RPM) com diâmetro de 126 cm. Os animais faziam exercício cinco vezes por semana, durante uma hora e percorriam 0,378 quilômetros / hora (máximo). Este programa não se modificou até o fim do experimento. O assoalho da roda permitia que o animal prendesse as garras, quando desejasse, e girasse sobre o eixo da roda, não realizando o exercício. Foi observado, que os animais passavam a maior parte do tempo deambulando, com pequenas paradas e logo retomavam o exercício. Não foram utilizados estímulos para que os animais se exercitassem ou parassem em intervalos programados (Figura 1).

Figura 1 – Rata em roda de exercício (GR).



- **Grupo Natação (GN)** - O treinamento foi realizado numa piscina projetada para pequenos animais, com 100 cm de comprimento, 59 cm de largura e 40 cm de profundidade, construída em acrílico,

aquecida através de um aquecedor de aquário. Os animais nadavam durante uma hora e havia a possibilidade de flutuação. Ocasionalmente, quando um animal aproximava-se muito de outro, era feita a separação através de uma espátula (Figura 2).

Figura 2 – Ratas sendo exercitadas em piscina (GN).



4.3 Avaliação

Os dois grupos treinaram durante 32 semanas, sendo posteriormente sacrificados em câmara de CO₂ e retirados os fêmures e tíbias direito e esquerdo e coluna lombar (L4-L5). As peças foram imersas em solução salina e congeladas a -22° C.

4.3.1 Ensaio mecânico

A tíbia e fêmur direito foram encaminhados para o Laboratório de Biomecânica do Instituto de Ortopedia e Traumatologia da Faculdade de Medicina da Universidade de São Paulo, LIM-41, para a realização dos ensaios mecânicos.

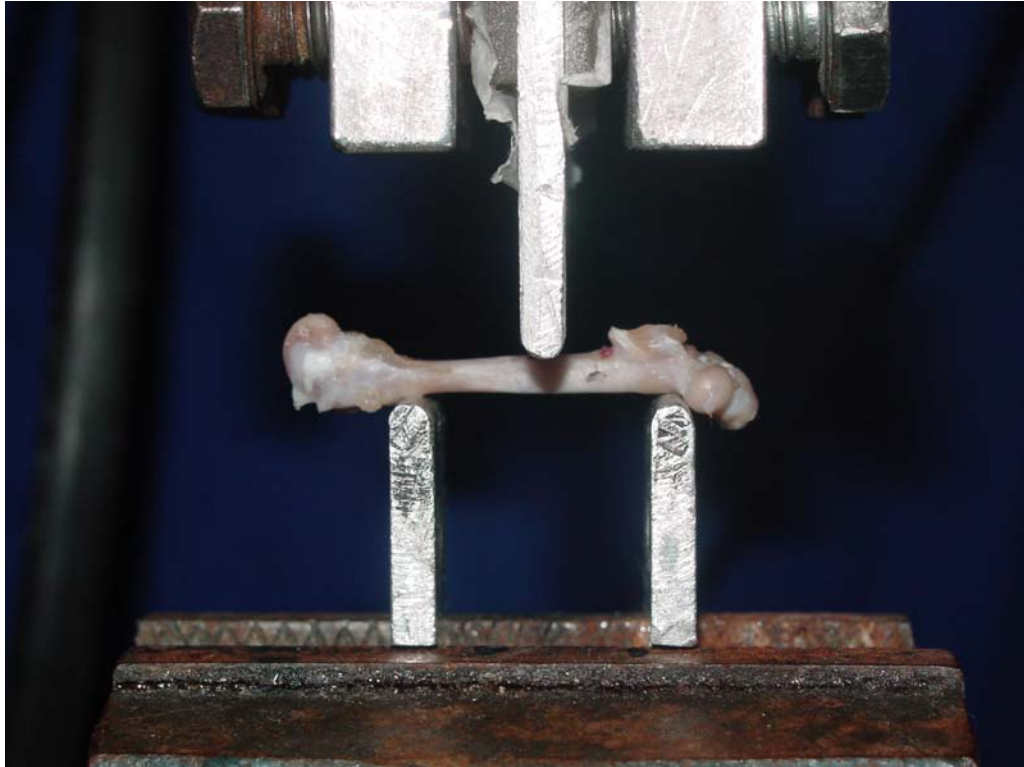
4.3.2 Método Biomecânico

Foram realizados ensaios mecânicos de flexão a três pontos em cada fêmur e tíbia, através de uma máquina universal de ensaios mecânicos Kratos[®] 5002, dotada de célula de carga de 100 kgf ajustada para a escala de 20 kgf. A máquina possuía uma interface computadorizada que permitia registrar os parâmetros força e deformação em tempo real com resolução de 0,196 N (20 gf) e 0,01 mm, respectivamente.

O dispositivo para ensaio de flexão a três pontos é constituído de dois apoios com perfil circular de 3,5 mm de diâmetro situados na base da máquina e equidistantes 20 mm e um atuador ou cutelo posicionado entre os apoios, com a mesma forma e dimensão dos apoios, acoplado à parte móvel da máquina de ensaio através da célula de carga.

O fêmur era posicionado junto ao dispositivo, de maneira que o colo do fêmur encostava-se em um dos apoios, e sua face anterior ficava voltada para a base da máquina (Figura 3).

Figura 3 – Fêmur submetido a ensaio de flexão a três pontos.



A tibia era posicionada de forma que um ponto de referência medido na tibia ficasse alinhado com o atuador, para a determinação desse ponto foi utilizado um paquímetro digital marca Mitutoyo com resolução de 0,01 (mm) para medir o comprimento total da tibia. O ponto situava-se a uma distância de 40% do comprimento total em relação à região proximal da tibia.

Os parâmetros analisados foram a força e a tensão máxima necessária para provocar a deflexão ou deformação medida na região do atuador e provocar a fratura óssea (Figura 4).

Figura 4 – Tíbia submetida a ensaio de flexão a três pontos.

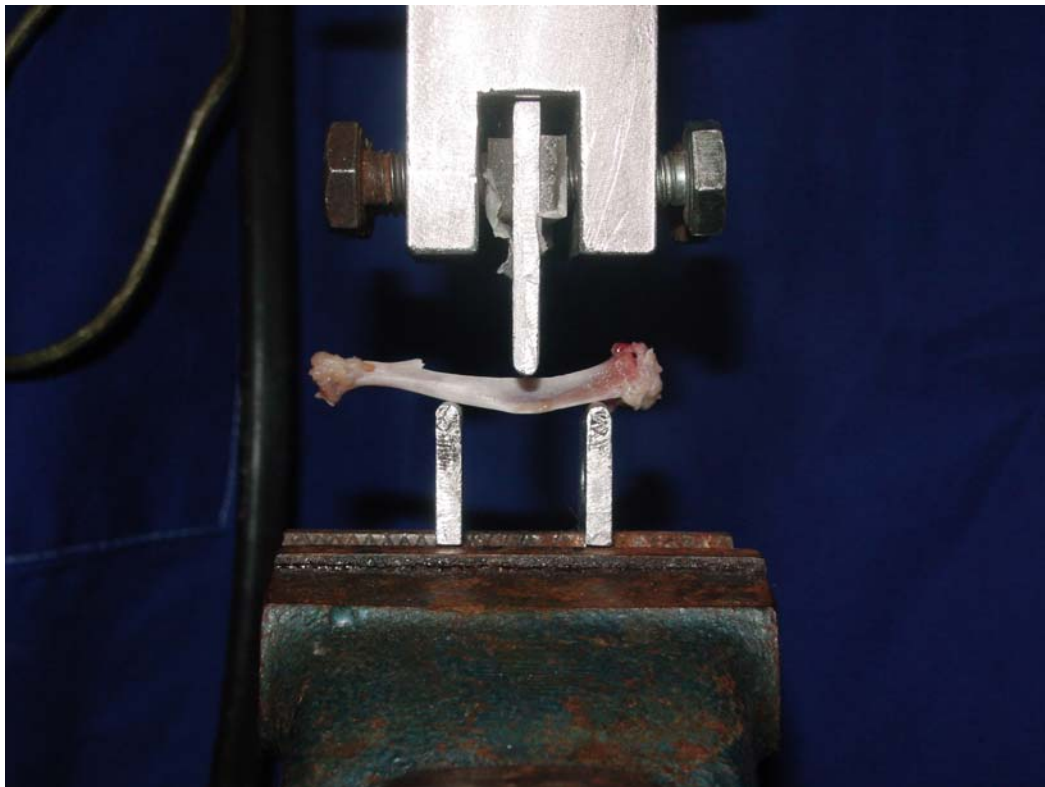
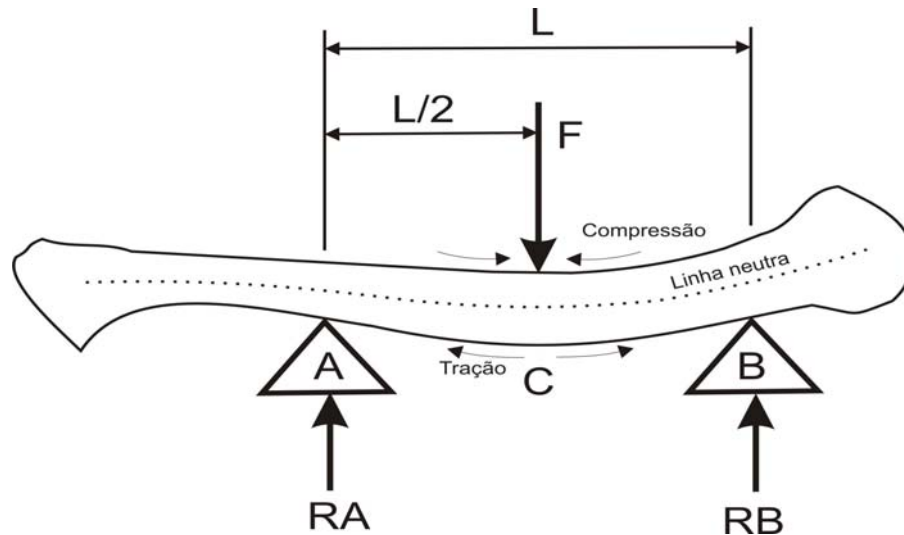


Figura 5 – Representação esquemática do ensaio de flexão.



Quando uma viga é submetida a flexão e aos esforços de tração e compressão, agem com maior intensidade nas fibras mais externas e se anulam em uma região conhecida como superfície neutra (Figura 5). A tensão máxima atuante no material depende da distância entre as fibras mais afastadas em relação à superfície neutra, do momento de flexão e do momento de inércia e é determinada através da expressão:

$$\sigma_{\max} = \frac{M \cdot y_{\max}}{J}$$

Onde:

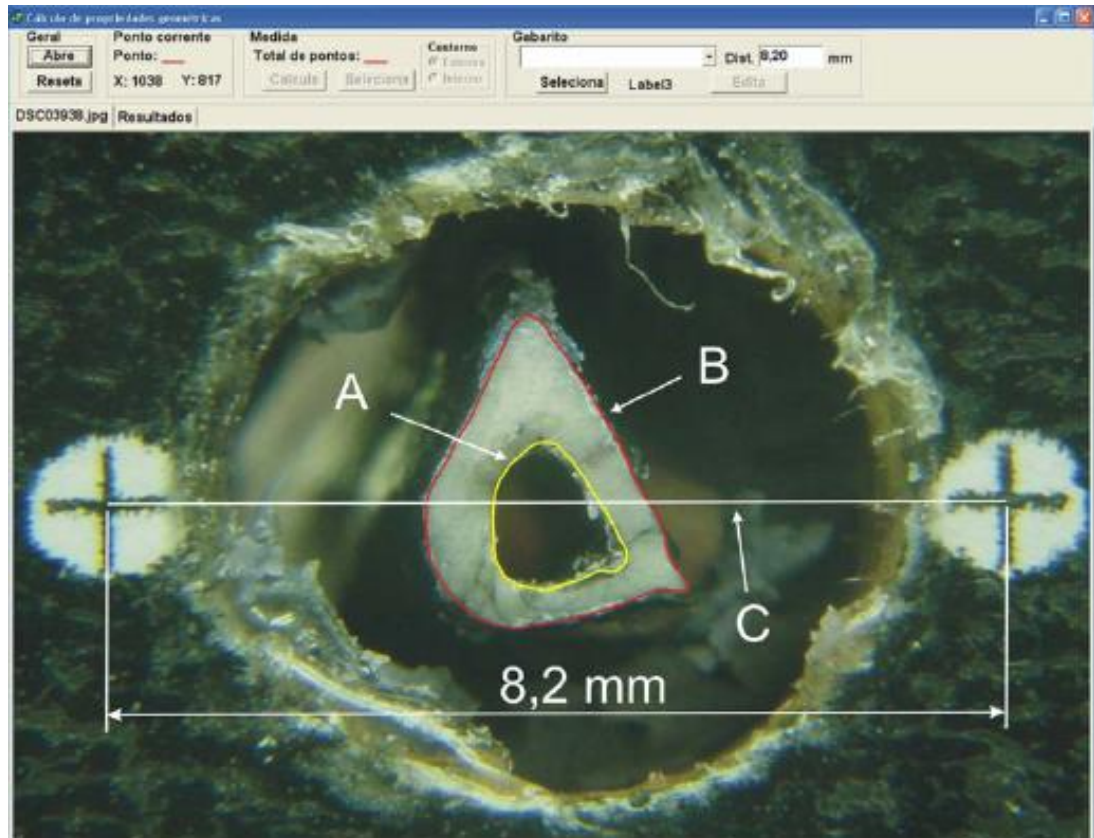
σ_{\max}	Tensão máxima medida em MPa
y_{\max}	Distância entre as fibras mais afastadas e a superfície neutra, medida em milímetros
J	Momento de inércia medido em mm ⁴

O momento de inércia é uma propriedade geométrica que expressa a distribuição de área em relação à superfície neutra e é definido como a soma dos produtos dos infinitésimos de área que compõe a superfície e suas respectivas distâncias elevadas ao quadrado em relação à superfície neutra (Melconian,1988).

A mensuração do momento de inércia foi feita após a fratura do osso submetido ao ensaio de flexão e consistia em tirar fotografia com máquina digital Sony[®] modelo *Mavica* CD-300 com resolução de 3,3 Mpixel da região fraturada que podia ser o fragmento distal ou proximal. O fragmento ósseo era posicionado e fixado com massa de modelar dentro de um furo de uma mesa que continha duas marcas em cruz equidistantes 8,20 mm.

Foi desenvolvido um programa de computador que permitia abrir a imagem digital e de forma manual, circundar o contorno externo e interno da cortical do osso. A direção para o cálculo do momento de inércia que era definido como o mesmo ângulo formado pela força do atuador com o osso no momento do ensaio era definida manualmente.

Figura 6 – Imagem representativa do programa de computador utilizado para determinar o momento de inércia. “A” e “B” correspondem aos contornos interno e externo respectivamente e “C” a escala correta.

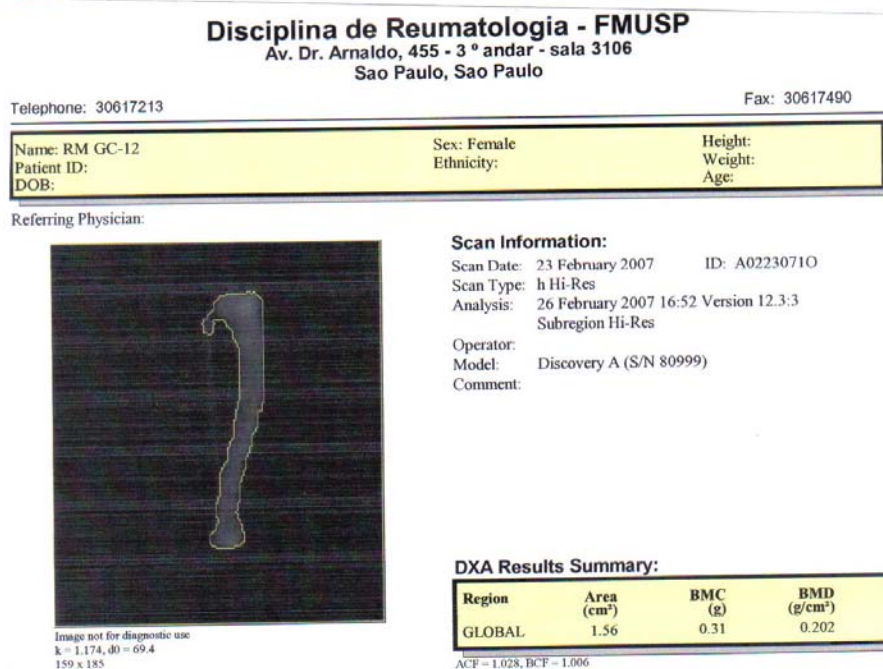


As duas marcas em forma de cruz também eram identificadas para que o programa calculasse o momento de inércia na escala correta. O algoritmo para o cálculo do momento de inércia foi baseado em Heiborn (1981) e foi validado através de fotos de objetos com momento de inércia conhecidos. O erro encontrado foi de 3,15% (Figura 6).

➤ Densitometria - foram encaminhados para o Laboratório do Metabolismo Ósseo da Disciplina de Reumatologia da Faculdade de Medicina da Universidade de São Paulo o fêmur e a tíbia esquerdos e a coluna vertebral, para a realização do exame de densitometria óssea.

➤ Foi utilizado o densitômetro Discovery 4500 (Hologic) e o programa "Small Animal", no modo de alta resolução, pela técnica de dupla emissão de Raio-X (DXA). Os resultados foram expressos em g/cm^2 . A precisão do DXA na determinação da densidade mineral óssea (DMO) foi verificada pelo coeficiente de variação (CV), expresso como porcentagem da média. Foram realizadas cinco medidas consecutivas de cada região anatômica de uma mesma amostra.

Figura 7 – Ilustração do relatório do exame de densitometria óssea através do densitômetro Discovery 4500 (Hologic).



4.4 Análise estatística

Realizou-se a estatística descritiva dos parâmetros estudados: conteúdo mineral ósseo (BMC), densidade mineral óssea (BMD), força máxima (Fmax), flecha, momento de inércia e tensão.

A correlação entre os grupos foi realizada utilizando-se a Correlação de Pearson para variáveis quantitativas.

A comparação entre os grupos foi realizada utilizando-se a análise de variância *one-way* (ANOVA).

Para se detectar o sítio das diferenças entre os grupos, foi realizado o teste de comparações múltiplas de Tukey (programa *GraphPad Prism*, versão 4.00 - *GraphPad Software Incorporated*).

As diferenças foram consideradas estatisticamente significativas quando o valor de $p < 0,05$.

RESULTADOS

5 Resultados

Tabela 1 – Densidade e conteúdo mineral ósseo dos grupos: Roda, Controle e Natação após 32 semanas de experimento. Comparação pelo teste de Análise de Variância com teste de comparações múltiplas de Tukey.

Parâmetros	Roda M ± DP	Natação M ± DP	Controle M ± DP	ANOVA	Tukey
Tíbia BMC	0,34±0,018	0,33 ± 0,041	0,30 ± 0,033	p = 0,046*	R x N p=0,750 R x C p=0,043* N x C p=0,186
Tíbia BMD	0,20±0,036	0,20 ± 0,012	0,19 ± 0,010	p = 0,040*	R x N p=0,969 R x C p=0,056 N x C p=0,092
Fêmur BMC	0,45±0,018	0,453 ± 0,057	0,420 ± 0,045	p = 0,429	
Fêmur BMD	0,24±0,055	0,245 ± 0,017	0,230 ± 0,016	p = 0,249	
Coluna BMC	0,1389±0,01	0,12 ± 0,017	0,11 ± 0,014	p = 0,01*	R x N p=0,05* R x C p<0,0001* N x C p=0,168

(continua)

(conclusão)

Coluna BMD	0,25±0,0119	0,24 ± 0,019	0,22 ± 0,010	p = 0,01*	R x N p=0,409 R x C p=0,001* N x C p=0,028*
---------------	-------------	-----------------	--------------	-----------	---

Legendas:

M – Média
 DP – Desvio Padrão
 ANOVA – Análise de Variância
 R – Roda
 N – Natação
 C – Controle
 BMD – Densidade mineral óssea
 BMC – Conteúdo mineral ósseo

Tabela 2 – Propriedades mecânicas das tíbias de ratas submetidas ao ensaio de flexão. Comparação dos grupos roda, natação e controle pelo teste de Análise de Variância com teste de comparações múltiplas de Tukey.

	Tensão (MPa) M ± DP	Flecha (mm) M ± DP	Momento de inércia (mm ⁴) M ± DP	Força (N) M ± DP
Roda	190,39 ± 29,04	0,7 ± 0,11	4,53 ± 0,97	110,4 ± 14,98
Natação	178,05 ± 30,06	0,64 ± 0,11	5,14 ± 0,72	118,02 ± 17,43
Controle	135,48 ± 24,41	0,62 ± 0,11	6,27 ± 1,64	100,38 ± 17,79
ANOVA:				
R x N x C	p < 0,0001 *	p = 0,195	p = 0,03 *	p = 0,048 *
Tukey:				
	R x N p=0,532 R x C p<0,0001* N x C p=0,002*		R x N p=0,416 R x C p=0,003* N x C p=0,063	R x N p=0,514 R x C p=0,322 N x C p=0,038*

Legendas:

M – Média
 DP – Desvio Padrão
 ANOVA – Análise de Variância
 R – Roda
 N – Natação
 C – Controle

Tabela 3 – Propriedades mecânicas dos fêmures de ratas submetidas ao ensaio de flexão. Comparação dos grupos roda, natação pelo teste de Análise de Variância com teste de comparações múltiplas de Tukey.

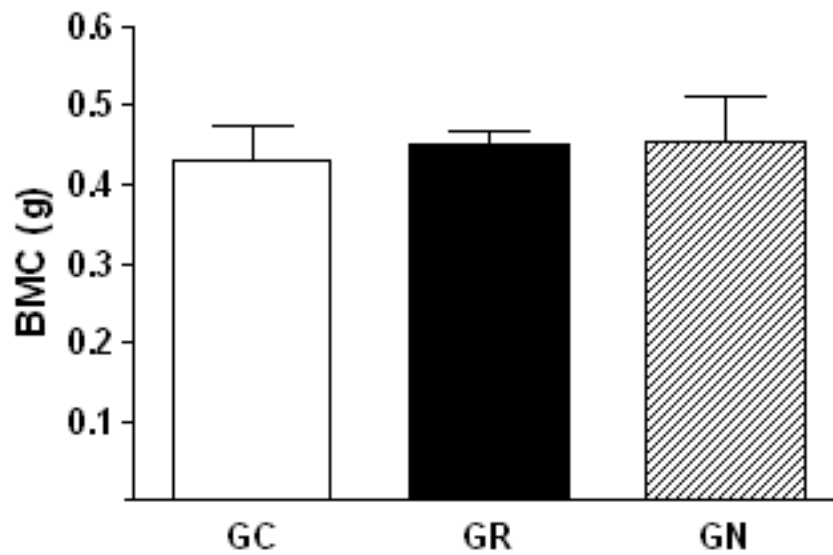
	Tensão (MPa) M ± DP	Flecha (mm) M ± DP	Momento de inércia (mm ⁴) M ± DP	Força (N) M ± DP
Roda	223,52 ± 17,61	0,75 ± 0,21	5,12 ± 0,98	133,44 ± 10,84
Natação	200,73 ± 21,3	0,62 ± 0,14	5,68 ± 1,07	130,63 ± 18,3
Controle	183,15 ± 15,78	0,78 ± 0,20	6,43 ± 1,08	131,29 ± 13,61
ANOVA:				
R x N x C	P<0,0001*	p=0,115	p=0,016*	p=0,886
Tukey	R x N p=0,012* R x C p<0,0001* N x C p=0,064		R x N p=0,394 R x C p=0,012* N x C p=0,206	

Legenda:

M – Média
 DP – Desvio Padrão
 ANOVA – Análise de Variância
 R – Roda
 N – Natação
 C – Controle

O treinamento em roda de exercício e piscina não alteraram o conteúdo mineral ósseo nos fêmures de ratas.

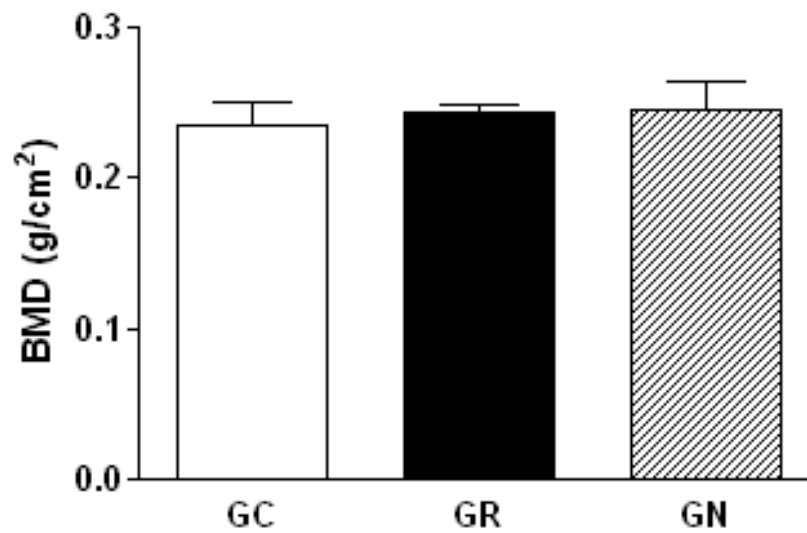
Gráfico 1 – Média e desvio padrão do conteúdo mineral ósseo (G) do fêmur de ratas dos grupos roda (GR), natação (GN) e controle (GC) após 32 semanas de experiência.



ANOVA – n.s. $p > 0,05$.

O treinamento em roda de exercitação e piscina não altera a densidade mineral óssea em fêmures de ratas.

Gráfico 2 – Média e desvio padrão dos valores de densitometria do fêmur (g/cm^2) de ratas dos grupos roda (GR), natação (GN) e controle (GC) após 32 semanas de experimento.

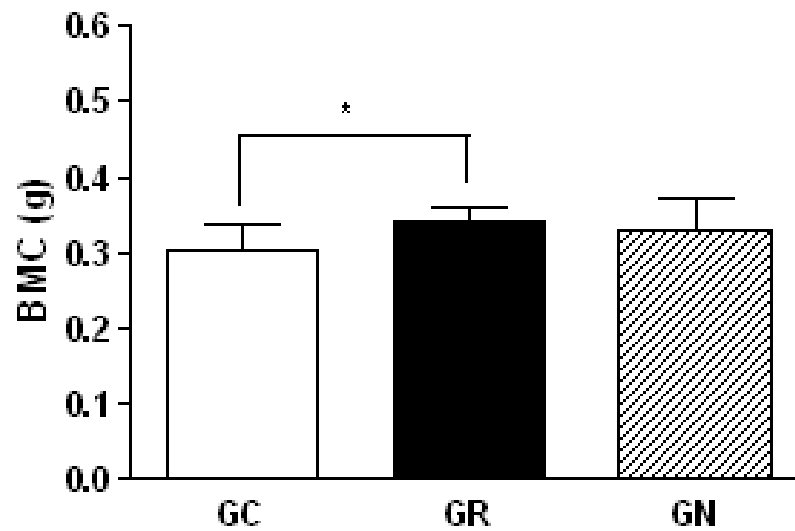


ANOVA n.s. $p > 0,05$

O treinamento em roda de exercitação altera o conteúdo mineral ósseo em tíbias de ratas.

O treinamento em roda de exercitação induziu um aumento do conteúdo mineral ósseo em tíbias de ratas

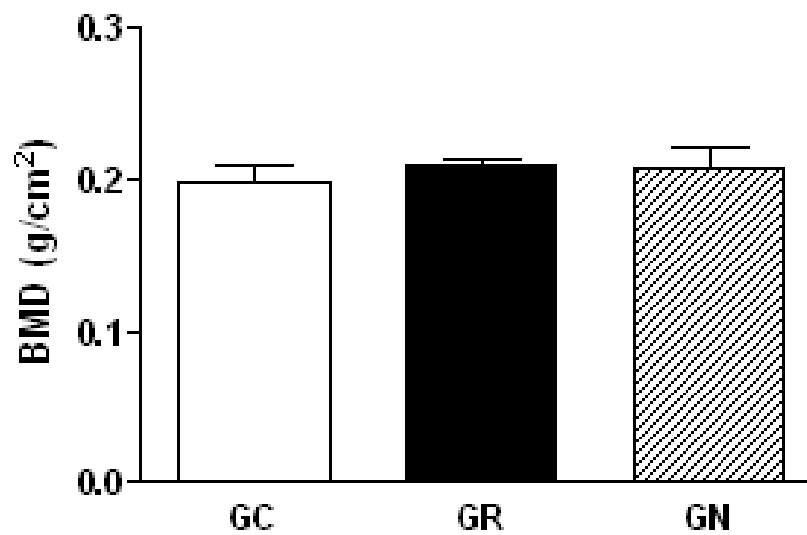
Gráfico 3 – Média e desvio padrão do conteúdo mineral ósseo da tíbia (G) de ratas dos grupos roda (GR), natação (GN) e controle (GC) após 32 semanas de experimento.



ANOVA* $p < 0,05$.

O treinamento em roda de exercício e piscina não alteraram a densidade mineral óssea nas tíbias de ratas.

Gráfico 4 – Média e desvio padrão dos valores de densitometria da tíbia (g/cm²) dos grupos roda (GR), natação (GN) e controle (GC) após 32 semanas de experimento.

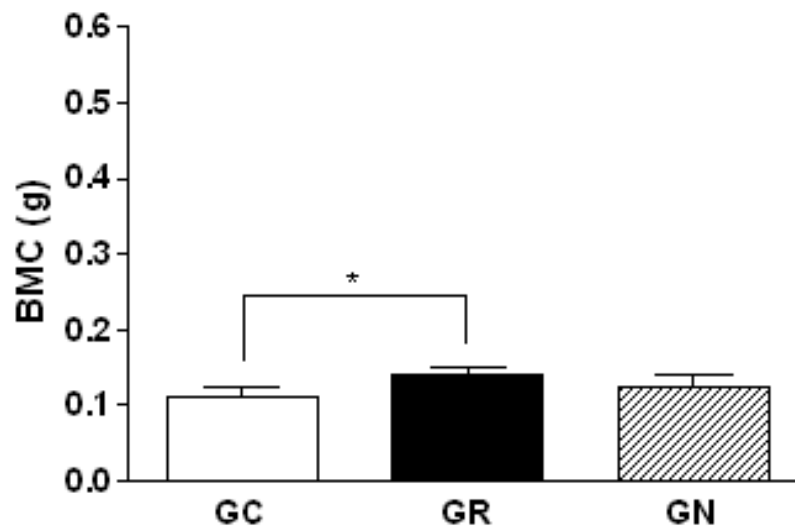


ANOVA n.s. $p > 0,05$.

O treinamento em roda de exercitação altera o conteúdo mineral ósseo em coluna de ratas.

O treinamento em roda de exercitação induziu um aumento do conteúdo mineral ósseo em coluna de ratas

Gráfico 5 – Média e desvio padrão do conteúdo mineral ósseo da coluna (G) dos grupos roda (GR), natação (GN) e controle (GC) após 32 semanas de experimento.

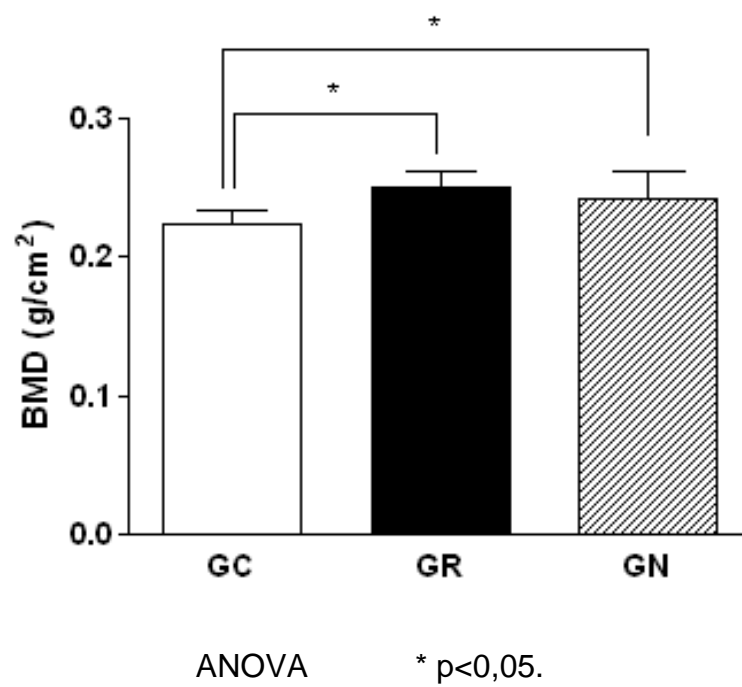


ANOVA * $p < 0,05$.

O exercício altera a densidade mineral óssea em coluna de ratas.

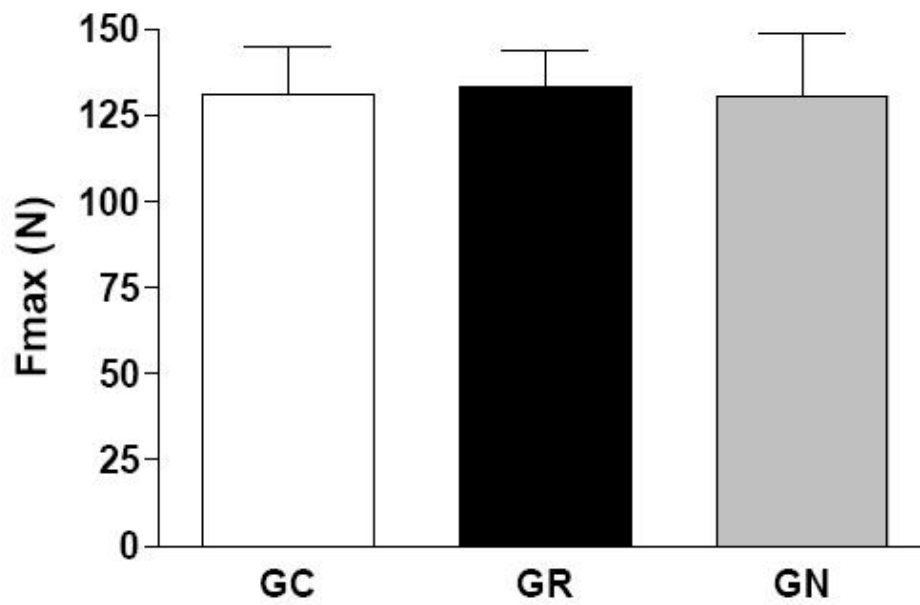
O exercício induziu um aumento da densidade mineral óssea em coluna de ratas

Gráfico 6 – Média e desvio padrão dos valores de densitometria da coluna (g/cm²) dos grupos roda (GR), natação (GN) e controle (GC) após 32 semanas de experimento.



O treinamento em roda de exercitação e piscina não alteraram a força máxima (N) dos fêmures de ratas.

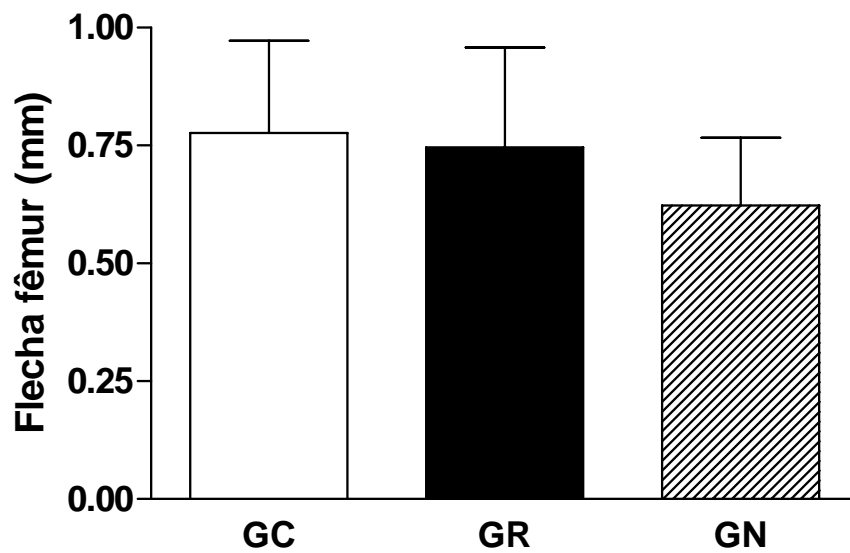
Gráfico 7 – Média e desvio padrão dos valores de força máxima (N) dos fêmures dos grupos roda (GR), natação (GN) e controle (GC) após 32 semanas de experimento.



ANOVA n.s. $p > 0,05$.

O treinamento em roda de exercitação e piscina não alteraram os valores de flecha (mm) dos fêmures de ratas.

Gráfico 8 – Média e desvio padrão dos valores de flecha (mm) dos fêmures dos grupos roda (GR), natação (GN) e controle (GC) após 32 semanas de experimento.

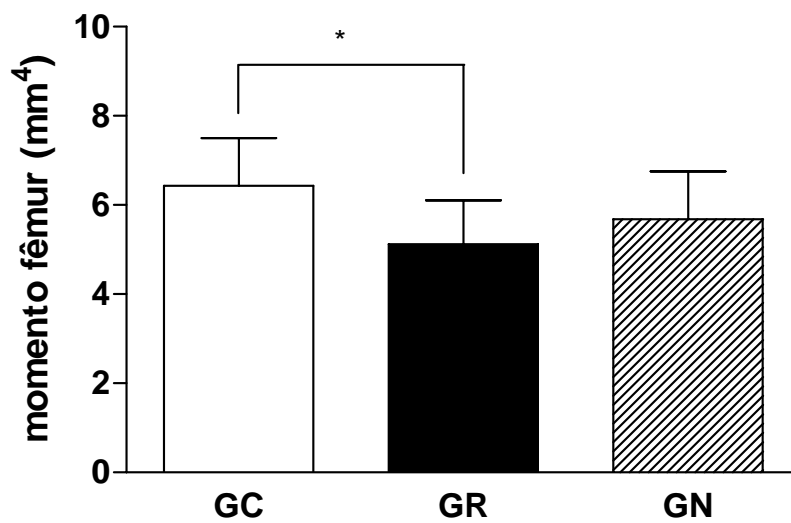


ANOVA n.s. $p > 0,05$.

O treinamento em roda de exercitação altera o momento de inércia (mm^4) dos fêmures de ratas.

O treinamento em roda de exercitação induziu uma diminuição do momento de inércia (mm^4) dos fêmures de ratas.

Gráfico 9 – Média e desvio padrão dos valores de momento de inércia (mm^4) dos fêmures dos grupos roda (GR), natação (GN) e controle (GC) após 32 semanas de experimento.

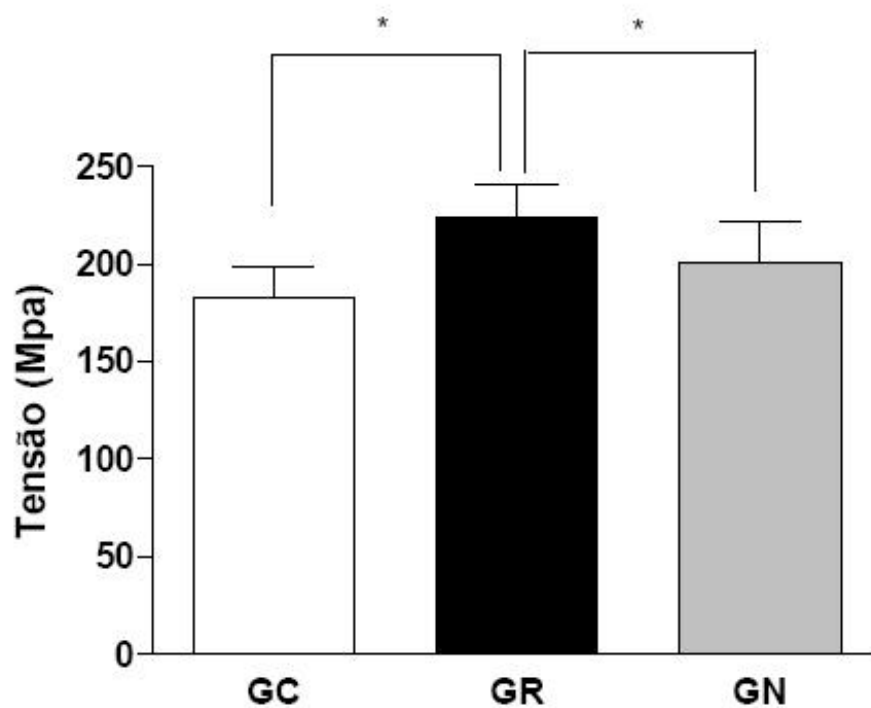


ANOVA * $p < 0,05$

O treinamento em roda de exercitação altera a tensão (Mpa) dos fêmures de ratas.

O treinamento em roda de exercitação induziu um aumento da tensão (Mpa) dos fêmures de ratas.

Gráfico 10 – Média e desvio padrão dos valores de tensão (mpa) dos fêmures dos grupos roda (GR), natação (GN) e controle (GC) após 32 semanas de experimento.

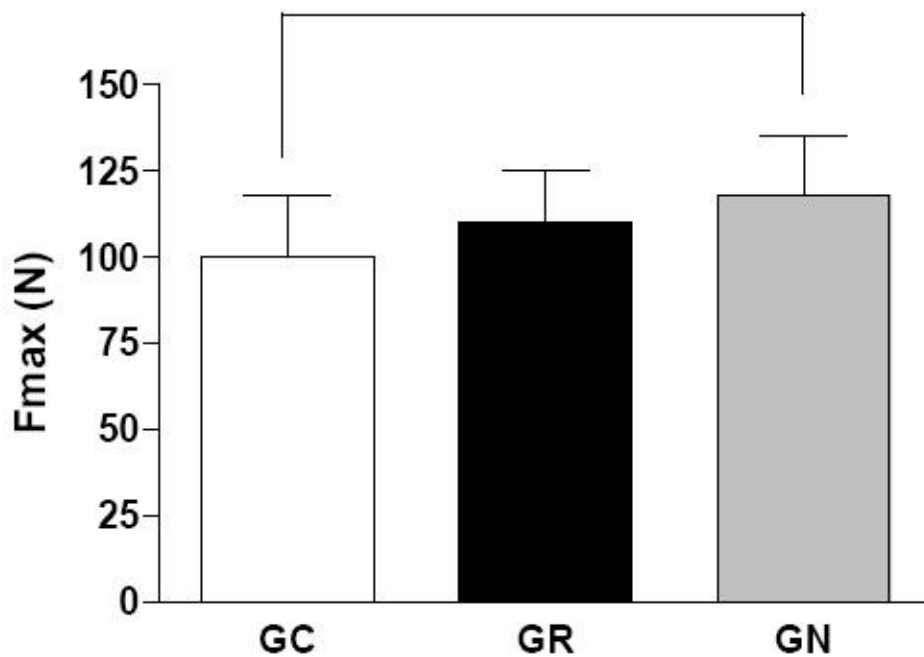


ANOVA * $p < 0,05$

O treinamento em piscina altera a força máxima (N) das tíbias de ratas.

O treinamento em piscina induziu um aumento da força máxima (N) das tíbias de ratas.

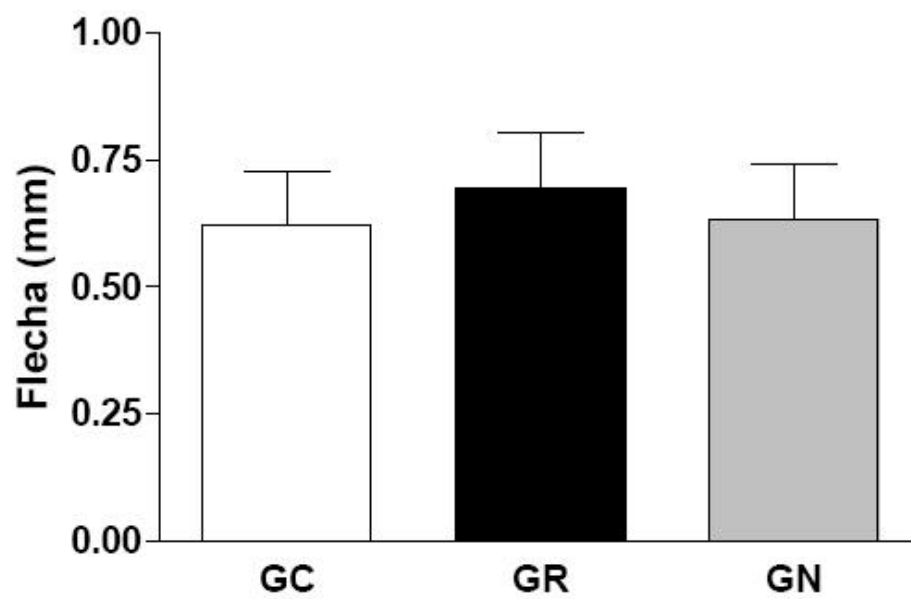
Gráfico 11 – Média e desvio padrão dos valores de força máxima (N) das tíbias dos grupos roda (GR), natação (GN) e controle (GC) após 32 semanas de experimento.



ANOVA * $p < 0,05$

O treinamento em roda de exercitação e piscina não alterou os valores de Flecha (mm) das tíbias de ratas.

Gráfico 12 – Média e desvio padrão dos valores de flecha (mm) das tíbias dos grupos roda (GR), natação (GN) e controle (GC) após 32 semanas de experimento.

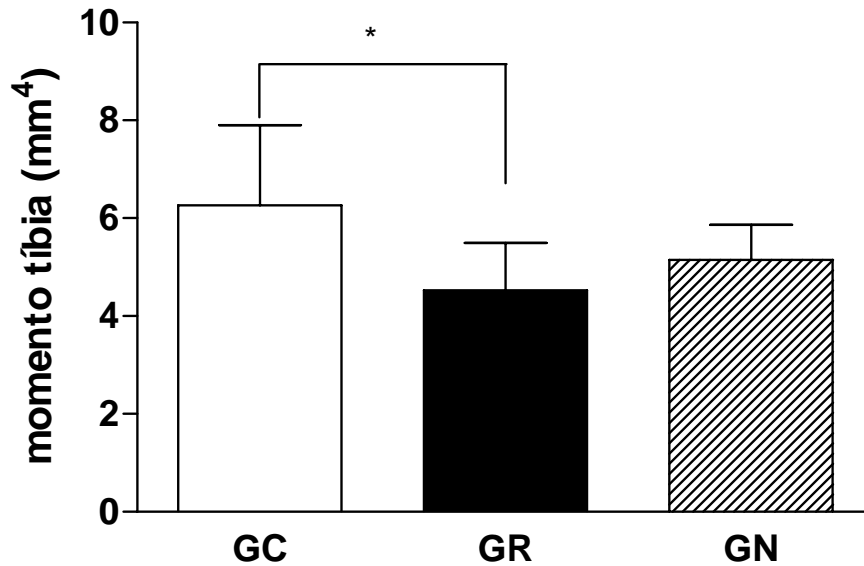


ANOVA n. s. $p < 0,05$

O treinamento em roda de exercitação altera o momento de inércia (mm^4) das tíbias de ratas.

O treinamento em roda de exercitação induziu uma diminuição do momento de inércia (mm^4) das tíbias de ratas.

Gráfico 13 – Média e desvio padrão dos valores de momento de inércia (mm^4) das tíbias dos grupos roda (GR), natação (GN) e controle (GC) após 32 semanas de experimento.

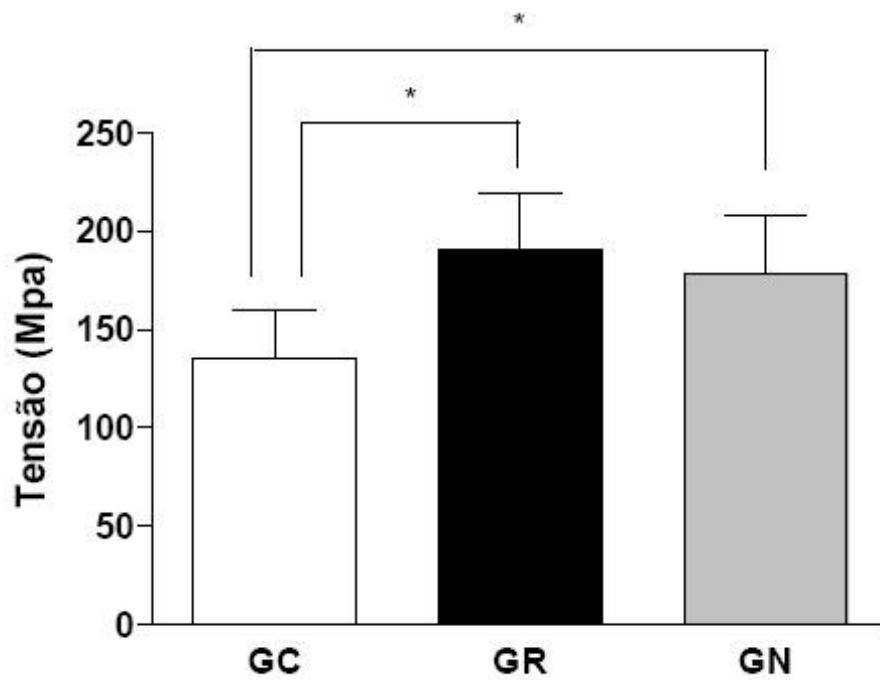


ANOVA * $p < 0,05$

O exercício altera a tensão (Mpa) das tíbias de ratas.

O exercício induziu um aumento da tensão (Mpa) das tíbias de ratas.

Gráfico 14 – Média e desvio padrão dos valores de tensão (Mpa) das tíbias dos grupos roda (GR), natação (GN) e controle (GC) após 32 semanas de experimento.

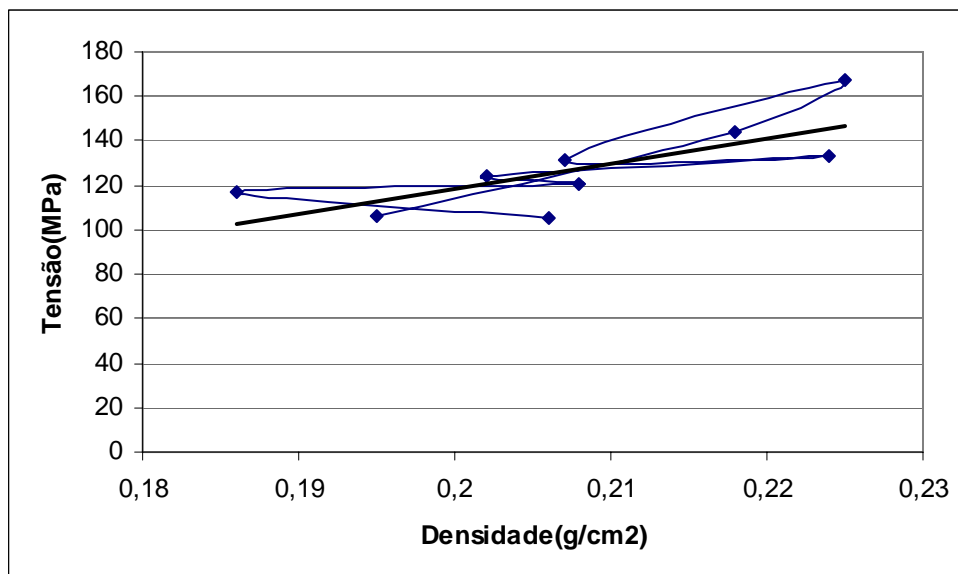


ANOVA * $p < 0,05$

Tabela 4 – Coeficiente de correlação (R) entre a tensão e a densidade mineral óssea (g/cm²) de tíbias de ratas exercitadas em piscina (GN) após 32 semanas de experimento.

	Coeficiente de correlação (R) calculado		
	Fêmur	Tíbia	Rtabelado
Controle	0,263333097	0,454673108	0,6319
Natação	-0,104390587	0,750127475*	0,6664
Roda	0,644712702	0,318487022	0,6664

Gráfico 15 – O treinamento em piscina apresenta alta correlação (0,750127475) da tensão (Mpa) com a densidade mineral óssea (g/cm²) em tíbias de ratas exercitadas em piscina.



DISCUSSÃO

6 Discussão

Há consenso sobre a importância da atividade física para a manutenção da qualidade do tecido ósseo, pois são muitos os autores que demonstram este fato (Cooper *et al.*, 2006; Beaudreuil, 2006). Bagi *et al.* (1992), por outro lado, mostraram que o sedentarismo promove uma maior perda de tecido ósseo, principalmente quando associado às mudanças hormonais. A maior parte das intervenções feitas recomenda exercícios resistidos com sobrecargas progressivas e exercícios com impacto que seriam as mais eficazes para melhora e manutenção do tecido ósseo (Lewiecki e Borges, 2006).

Este estudo, baseado em trabalhos anteriores, utilizou ratas isogênicas, como modelo experimental, para avaliar o efeito de dois programas de treinamento físico, que se caracterizaram pela intensidade de baixa a moderada. A atividade baixa a moderada e não incremental, em matéria de carga e progressão utilizada neste estudo, procurou mimetizar as condições mais comuns de prática de atividade física de uma população de indivíduos sedentários. Os programas de treinamento físico de intensidade baixa ou moderada, que foram aplicados nesta amostra

experimental têm algum efeito na densidade mineral óssea e conteúdo mineral ósseo do fêmur, da tíbia e da coluna vertebral? As propriedades mecânicas do fêmur e tíbia das ratas treinadas se modificam com este tipo mais leve de exercício ou apenas os exercícios mais intensos e aumento progressivo de carga são efetivos para manutenção ou melhora da qualidade do osso? Estas perguntas, com relação à intensidade dos exercícios, não têm resposta definitiva na literatura disponível, ainda que o exercício físico tenha sido bem documentado, tanto em estudos experimentais quanto clínicos, como sendo eficaz para manutenção e incremento do tecido ósseo. Este trabalho avaliou o efeito de programas de exercícios físicos realizados por períodos prolongados, sem modificações na intensidade, frequência e duração do exercício no conteúdo, densidade e propriedades mecânicas dos ossos. Estas respostas são essenciais para uma prescrição qualificada e quantificada de exercícios adequados, que promovam de fato a melhora da massa óssea, prevenindo a osteoporose e suas complicações.

Um estudo piloto (Maciel e Greve, 2006) permitiu analisar a qualidade e viabilidade da roda de exercitação com relação ao tempo de atividade e repouso. Em relação ao grupo natação, o mesmo estudo piloto demonstrou a viabilidade da natação em grupo, sem necessidade de isolar os animais durante a execução da atividade física, tendo-se apenas o cuidado de separar os animais. Ocasionalmente, para evitar possibilidade de afogamento. Neste estudo piloto, com trinta dias, não se observou diferenças na densidade e conteúdo mineral ósseo entre os dois grupos.

Não foi possível estabelecer valores de força e resistência óssea pela falta de padronização de uma técnica de ensaio mecânico. É possível que o curto período de exercitação associado à baixa intensidade do exercício foi determinante para a ausência de adaptações no tecido ósseo.

No presente estudo, assegurou-se de se ter um período mais longo de treinamento (32 semanas) e a padronização dos sistemas de avaliação: densitometria óssea e ensaios mecânicos, para que se tivesse maior acurácia na comparação dos resultados. Não houve perda de animais durante o período de estudo, mostrando que o modelo de exercitação adotado não foi agressivo ou estressante e pode servir como modelo de exercitação em estudos futuros.

A análise da densidade e conteúdo mineral ósseo mostrou que os exercícios físicos, tais como executados (carga e tempo) foram capazes de modificar e promover adaptações no tecido ósseo. Houve ganho de conteúdo e aumento da densidade mineral óssea na coluna vertebral dos dois grupos de exercícios testados, quando comparados com o grupo controle. Esta informação é relevante para direcionamentos de futuros estudos clínicos: avaliar o efeito das atividades aquáticas, especificamente na osteoporose da coluna vertebral, onde o risco de fratura possa ser uma contra-indicação relativa de exercícios terrestres. Huang *et al.* (2003) constatou a eficácia da natação na melhora das propriedades biomecânicas de tíbia e fêmur de ratos, porém a via para essa adaptação permanece inconclusiva. No presente estudo esta modificação não foi observada nos grupos estudados.

Não houve diferença no conteúdo e densidade mineral óssea do fêmur na comparação entre os três grupos avaliados. Há uma tendência de aumento da densidade e conteúdo mineral nos grupos ativos quando comparados com o grupo controle. Este fato pode ser sugestivo de uma amostra maior ou tempo mais longo de exercício, visto que há uma demora na resposta do tecido ósseo aos estímulos mecânicos.

Na tíbia, os resultados mostraram aumentos no conteúdo ósseo do grupo que se exercitou na roda quando comparado ao grupo controle. O grupo exercitado em piscina mostrou valores maiores, mas sem significância estatística em relação ao grupo controle.

O fato de se encontrar maior ganho de densidade e conteúdo mineral ósseo na coluna vertebral, quando comparada com a tíbia e fêmur, pode estar relacionado à maior quantidade de osso trabecular da coluna vertebral, mais sujeito às modificações com os estímulos mecânicos dos exercícios. A diferença na constituição do tecido ósseo pode ser determinante quanto ao efeito dos exercícios em regiões específicas, não havendo, desta forma, garantia de que os efeitos possam ser sentidos em todos os ossos do corpo.

As causas exatas da maior resposta da tíbia em relação ao fêmur, ao programa de exercícios não ficaram claras. É possível, que tenha ocorrido maior ação piezelétrica na tíbia pelo movimento ascendente da pata na roda é possível também que o fato de prender as garras nos trilhos da roda possa ter possibilitado uma maior contração muscular dos músculos das pernas dos animais. Na piscina, no entanto, não se observa este fenômeno.

O efeito causado pela contração muscular no osso pode ser mais efetivo na deformação óssea, causando uma maior sinalização bioquímica para a atividade osteoblástica. Pode se esperar que ocorra maior adaptação óssea nos ossos sob a ação de músculos mais potentes ou mais solicitados em determinados esforços físicos, de acordo com os achados de Simkin *et al.* (1989). Também, é possível que a tíbia das ratas estudadas apresentasse uma arquitetura óssea mais adequada para que ocorresse maior adaptação. Estas dificuldades, no entendimento do processo de adaptação óssea, sugerem a necessidade de se analisar de forma separada o efeito dos exercícios no osso cortical e esponjoso, que pode ser determinante na indicação do tipo e intensidade de atividade física a ser prescrita.

Os resultados mostraram que os exercícios aumentaram a resistência do osso às fraturas induzidas dos ensaios mecânicos. A tíbia foi mais resistente que o fêmur nos dois grupos de exercícios na comparação com o grupo controle. No fêmur, observa-se uma tendência de aumento nos valores absolutos do grupo exercitado na piscina em relação ao grupo controle, porém sem significância estatística. Os fêmures dos animais submetidos aos exercícios na roda de exercitação apresentaram maior resistência à ruptura em relação ao GC e GN. É importante, ressaltar que os ensaios mecânicos realizados com materiais biológicos irregulares com variações anatômicas e tamanhos diferentes podem causar alguns vieses, que foram minimizados pelo uso de animais isogênicos com peso e idade semelhantes.

O modelo aquático, ainda que se observasse uma tendência ao aumento nos parâmetros ósseos estudados da amostra, não foi tão efetivo em promover uma adaptação óssea. Novos estudos de exercitação na piscina com modificações de parâmetros de tempo de treinamento e duração do programa podem ajudar a avaliar melhor esta tendência de aumento encontrada e sua relação com a resistência às fraturas.

Não se encontrou correlação, na maioria das variáveis, entre os resultados dos ensaios mecânicos e da densitometria óssea. Nas tíbias do GN houve correlação entre a tensão (Mpa) e a densidade mineral óssea (g/cm²) e não há uma explicação adequada para esta correlação, parecendo ser uma ocorrência aleatória.

Este estudo aponta para as atividades com maior carga e demanda (terrestre) como mais indicadas na melhora do tecido ósseo: conteúdo mineral e densidade e maior resistência aos ensaios mecânicos, ainda que algumas outras variáveis, não controladas neste estudo, possam ainda interferir nos resultados: como o tipo de osso e pequenas modificações na técnica de exercícios. Outras variáveis, como as temporais (duração do programa e tempo de exercício) de evidente repercussão clínica, especificamente em relação ao GN, poderiam ser estudadas de forma comparativa e progressiva, para avaliar possíveis efeitos no tecido ósseo.

CONCLUSÕES

7 Conclusões

No modelo experimental estudado,

1. O exercício em roda de exercitação foi mais eficaz que a natação para incremento do conteúdo mineral ósseo, densidade mineral óssea e resistência às fraturas.
2. A coluna vertebral apresentou maiores aumentos da densidade mineral óssea e conteúdo mineral ósseo ao treinamento com roda de exercícios e piscina que a tíbia e o fêmur.
3. A tíbia apresentou maior adaptação óssea ao treinamento físico com roda de exercitação que o fêmur.

O exercício de baixa intensidade foi eficaz para o aumento da resistência do osso às fraturas.

ANEXOS

ANEXO 1**Peso dos animais**

Peso corpóreo no dia um da primeira semana de experimento

Tabela 1 – Peso dos animais utilizados

Animal	Controle	Roda	Natação
	Peso (g)		
1	90	85	90
2	90	90	90
3	90	90	90
4	95	90	85
5	85	95	90
6	90	95	90
7	95	90	95
8	95	90	90
9	90	85	90
10	90	95	95
11	85	85	85
12	90	90	90

ANOVA PESO INICIAL

ANOVA

Peso	Soma dos Quadrados	df	Quadrado Médio	F	Sig.
Entre os Grupos	0,173	2	0,86	0,120	0,888
Nos mesmos Grupos	23,827	33	0,722	---	---
Total	24,000	35	---	---	---

Comparações Múltiplas

(I) VAR00002	(J) AR00002	Diferença Média (I-J)	Desvio Padrão	Sig.	Intervalo de Confiança 95%	
					Cota Inferior	Cota Maior
85,00	90,00	-0,04762	0,37085	0,991	-0,9576	0,8624
	95,00	0,12500	0,43978	0,957	-0,9541	1,2041
95,00	85,00	-0,04762	0,37085	0,991	-0,8624	0,9576
	95,00	0,17262	0,35304	0,877	-0,6937	1,0389
95,00	85,00	-0,12500	0,43978	0,957	-1,2041	0,9541
	90,00	-0,17262	0,35304	0,877	-1,0389	0,6837

Peso corpóreo no dia do sacrifício

Tabela 2 – Peso dos animais utilizados

Animal	Controle	Roda	Natação
	Peso (g)		
1	320	285	265
2	325	310	265
3	320	275	255
4	320	295	285
5	325	275	265
6	325	275	280
7	325	285	275
8	325	300	270
9	320	295	280
10	320	285	275
11	320	285	280
12	325	305	285

ANOVA PESO FINAL

ANOVA

VAR00001	Soma dos Quadrados	df	Quadrado Médio	F	Sig.
Entre os Grupos	15.116,667	2	7.558,333	96,552	0,000
Nos mesmos Grupos	2.583,333	33	78,283	---	---
Total	17.700,000	35	---	---	---

Comparações Múltiplas

Dependent Variable: VAR00001

Tukey HSD

(I) Peso	(J) Peso	Diferença Média (I-J)	Desvio Padrão	Sig.	Intervalo de Confiança 95%	
					Cota Inferior	Cota Maior
CONTROLE	RODA	33,33333*	3,61208	0,000	24,4700	42,1966
	NATAÇÃO	49,16667*	3,61208	0,000	40,3034	58,0300
RODA	CONTROLE	-33,33333*	3,61208	0,000	-42,1966	-24,4700
	NATAÇÃO	15,83333*	3,61208	0,000	6,9700	24,6966
NATAÇÃO	CONTROLE	-49,16667*	3,61208	0,000	-58,0300	-40,3034
	RODA	-15,83333*	3,61208	0,000	-24,6966	-6,9700

* A diferença média é significativa no nível de 0,05

ANEXO 2

Dados Descritivos da Avaliação por densitômetro Discovery 4500 (Hologic), utilizando-se técnica de dupla emissão de Raio-X (DXA) - Fêmur

ANOVA

		Soma dos Quadrados	df	Quadrado Médio	F	Sig.
BMC	Entre os Grupos	0,003	2	0,002	0,875	0,429
	Nos mesmos Grupos	0,048	25	0,002	---	---
	Total	0,051	27	---	---	---
BMD	Entre os Grupos	0,001	2	0,000	1,469	0,249
	Nos mesmos Grupos	0,005	25	0,000	---	---
	Total	0,006	27	---	---	---

ANEXO 3

Análise do Conteúdo Mineral ósseo e densidade Mineral óssea do Fêmur entre os grupos GR,GN e GC utilizando-se a análise de variância *one-way* (ANOVA).

ANOVA

		Soma dos Quadrados	df	Quadrado Médio	F	Sig.
BMC	Entre os Grupos	0,003	2	0,002	0,875	0,429
	Nos mesmos Grupos	0,048	25	0,002	---	---
	Total	0,051	27	---	---	---
BMD	Entre os Grupos	0,001	2	0,000	1,469	0,249
	Nos mesmos Grupos	0,005	25	0,000	---	---
	Total	0,006	27	---	---	---

ANEXO 4

Teste de comparações múltiplas de Tukey para se detectar o sítio das diferenças dos dados: Conteúdo Mineral ósseo e densidade Mineral óssea de Fêmures entre os grupos GR, GC e GN.

Comparações Múltiplas

Tukey HSD							
Variável Dependente							
(I) Grupo	(J) Grupo	Diferença Média (I-J)	Desvio Padrão	Sig.	Intervalo de Confiança 95%		
					Cota Inferior	Cota Maior	
BMC	NATAÇÃO	RODA	0,00333	0,2063	0,986	-0,0481	0,0547
		CONTROLE	0,02433	0,02011	0,458	-0,258	0,0744
	RODA	NATAÇÃO	0,00333	0,2063	0,986	0,0547	0,0481
		CONTROLE	0,02100	0,02011	0,557	-0,0291	0,0711
	CONTROLE	NATAÇÃO	0,02433	0,02011	0,458	-0,0744	0,258
		RODA	0,02100	0,02011	0,557	-0,0711	0,0291
BMD	NATAÇÃO	RODA	0,00256	0,00675	0,924	-0,0143	0,0194
		CONTROLE	0,01072	0,00658	0,252	-0,0057	0,0271
	RODA	NATAÇÃO	-0,00256	0,00675	0,924	-0,0194	0,0143
		CONTROLE	0,00817	0,0658	0,441	-0,0082	0,0246
	CONTROLE	NATAÇÃO	-0,01072	0,0658	0,252	-0,0271	0,0057
		RODA	-0,00817	0,0658	0,441	-0,0246	0,0082

ANEXO 5

Dados Descritivos da Avaliação por densitômetro Discovery 4500 (Hologic), utilizando-se técnica de dupla emissão de Raio-X (DXA) – Tíbia.

		Descritivos							
	N	Média	Desvio padrão	Erro padrão	Intervalo de confiança para a média 95%		Mínimo	Máximo	
					Cota menor	Cota maior			
BMC	Natação	9	0,3300	0,04153	0,01384	0,2981	0,3619	0,26	0,39
	Roda	9	0,3411	0,01833	0,00611	0,3270	0,3552	0,32	0,37
	Controle	10	0,3030	0,03302	0,01044	0,2794	0,3266	0,24	0,34
	Total	28	0,3239	0,03531	0,00667	0,3102	0,3376	0,24	0,39
BMD	Natação	9	0,2079	0,01294	0,00431	0,1979	0,2178	0,19	0,23
	Roda	9	0,2090	0,00361	0,00120	0,2062	0,2118	0,20	0,22
	Controle	10	0,1980	0,01036	0,00328	0,1906	0,2054	0,18	0,22
	Total	28	0,2047	0,01074	0,00203	0,2005	0,2089	0,18	0,23

ANEXO 6

Análise do Conteúdo Mineral ósseo e densidade Mineral óssea da Tíbia entre os grupos GR,GN e GC utilizando-se a análise de variância *one-way* (ANOVA).

ANOVA

		Soma dos Quadrados	df	Quadrado Médio	F	Sig.
BMC	Entre os Grupos	0,007	2	0,004	3,503	0,046
	Nos mesmos Grupos	0,026	25	0,001	---	---
	Total	0,034	27	---	---	---
BMD	Entre os Grupos	0,001	2	0,000	3,668	0.040
	Nos mesmos Grupos	0,002	25	0,000	---	---
	Total	0,003	27	---	---	---

ANEXO 7

Teste de comparações múltiplas de Tukey para se detectar o sítio das diferenças dos dados: Conteúdo Mineral ósseo e densidade Mineral óssea de Tíbias entre os grupos GR, GC e GN.

Comparações Múltiplas

Tukey HSD							
Variável Dependente	(I) Grupo	(J) Grupo	Diferença Média (I-J)	Desvio Padrão	Sig.	Intervalo de Confiança 95%	
						Cota Inferior	Cota Maior
BMC	NATAÇÃO	RODA	-0,01111	0,01529	0,750	-0,0492	0,0270
		CONTROLE	0,02700	0,01490	0,186	-0,0101	0,0641
	RODA	NATAÇÃO	0,01111	0,01529	0,750	-0,0270	0,0492
		CONTROLE	0,03811*	0,01490	0,043	0,0010	-0,0752
	CONTROLE	NATAÇÃO	-0,02700	0,01490	0,186	0,0641	0,0101
		RODA	-0,03811*	0,01490	0,043	-0,0752	-0,0010
BMD	NATAÇÃO	RODA	-0,00111	0,00463	0,969	-0,0126	0,0104
		CONTROLE	0,00989	0,00451	0,092	-0,0013	0,0211
	RODA	NATAÇÃO	0,00111	0,00463	0,969	-0,0104	0,0126
		CONTROLE	0,01100	0,00451	0,056	-0,0002	0,0222
	CONTROLE	NATAÇÃO	-0,00989	0,00451	0,092	0,0211	0,0013
		RODA	-0,01100	0,00451	0,056	-0,0222	0,0002

* A diferença média é significativa no nível de 0,05

ANEXO 8

Dados Descritivos da Avaliação por densitômetro Discovery 4500 (Hologic), utilizando-se técnica de dupla emissão de Raio-X (DXA) - Coluna

		Descritivos							
		N	Média	Desvio padrão	Erro padrão	Intervalo de confiança para a média 95%		Mínimo	Máximo
						Cota menor	Cota maior		
BMC	Natação	9	0,1222	0,01716	0,00572	0,1090	0,1354	0,09	0,15
	Roda	9	0,1389	0,01054	0,00351	0,1308	0,1470	0,13	0,15
	Controle	10	0,1100	0,01414	0,00447	0,0999	0,1201	0,09	0,13
	Total	28	0,1232	0,01827	0,00345	0,1161	0,1303	0,09	0,15
BMD	Natação	9	0,2414	0,01984	0,00661	0,2262	0,2567	0,21	0,28
	Roda	9	0,2503	0,01195	0,00398	0,2411	0,2595	0,23	0,27
	Controle	10	0,2231	0,01042	0,00329	0,2156	0,2306	0,21	0,24
	Total	28	0,2378	0,01822	0,00344	0,2307	0,2448	0,21	0,28

ANEXO 9

Análise do Conteúdo Mineral ósseo e densidade Mineral óssea da coluna Vertebral entre os grupos GR,GN e GC utilizando-se a análise de variância *one-way* (ANOVA).

ANOVA

		Soma dos Quadrados	df	Quadrado Médio	F	Sig.
BMC	Entre os Grupos	0,004	2	0,002	9,828	0,001
	Nos mesmos Grupos	0,005	25	0,000	---	---
	Total	0,009	27	---	---	---
BMD	Entre os Grupos	0,004	2	0,002	8,767	0,001
	Nos mesmos Grupos	0,005	25	0,000	---	---
	Total	0,009	27	---	---	---

ANEXO 10

Teste de comparações múltiplas de Tukey para se detectar o sítio das diferenças dos dados: Conteúdo Mineral ósseo e densidade Mineral óssea de Coluna Vertebral entre os grupos GR, GC e GN.

Comparações Múltiplas

Tukey HSD							
Variável Dependente	(I) Grupo	(J) Grupo	Diferença Média (I-J)	Desvio Padrão	Sig.	Intervalo de Confiança 95%	
						Cota Inferior	Cota Maior
BMC	NATAÇÃO	RODA	-0,1667	0,00670	0,50	-0,0333	0,0000
		CONTROLE	0,01222	0,00653	0,168	-0,0040	0,0285
	RODA	NATAÇÃO	0,01667	0,00670	0,050	0,0000	0,0333
		CONTROLE	0,02889*	0,00653	0,000	0,0126	0,0451
	CONTROLE	NATAÇÃO	-0,01222	0,00653	0,168	-0,0285	0,0040
		RODA	-0,02889	0,00653	0,000	-0,0451	-0,0126
BMD	NATAÇÃO	RODA	-0,00889	0,00684	0,409	-0,0259	0,0082
		CONTROLE	0,01834*	0,00667	0,028	0,0017	0,0350
	RODA	NATAÇÃO	0,00889	0,00684	0,409	-0,0082	0,0259
		CONTROLE	0,02723*	0,00667	0,001	0,0106	0,0438
	CONTROLE	NATAÇÃO	-0,01834*	0,00667	0,028	-0,0350	-0,0017
		RODA	-0,02723*	0,00667	0,001	-0,0438	-0,0106

*A diferença média é significativa no nível de 0,05

ANEXO 11

**Dados Descritivos da Avaliação por Ensaio Mecânico utilizando-se a
Máquina Universal de Ensaios mecânicos Kratos[®] 5002 – Fêmur.**

		Descritivos							
		N	Média	Desvio padrão	Erro padrão	Intervalo de confiança para a média 95%		Mínimo	Máximo
						Cota menor	Cota maior		
MOM	Natação	12	5,6833	1,07423	0,31010	5,0008	6,3658	3,64	7,27
	Roda	12	5,1203	0,98207	0,28350	4,4963	5,7443	3,91	7,56
	Controle	12	6,4258	1,07561	0,31050	5,7424	7,1092	5,25	8,48
	Total	36	5,7431	1,15040	0,19173	5,3539	6,1324	3,64	8,48
FMAX	Natação	12	130,6300	18,30475	5,28413	118,9997	142,2603	110,66	166,50
	Roda	12	133,4392	10,84289	3,13007	126,5499	140,3284	117,49	152,08
	Controle	12	131,2850	13,61496	3,93030	122,6345	139,9355	111,62	157,27
	Total	36	131,7847	14,21250	2,36875	126,9759	136,5935	110,66	166,50
FLECHA	Natação	12	0,6225	0,14404	0,04158	0,5310	0,7140	0,50	1,00
	Roda	12	0,7458	0,21177	0,06113	0,6113	0,8804	0,52	1,09
	Controle	12	0,7767	0,19546	0,05643	0,6525	0,9009	0,52	1,14
	Total	36	0,7150	0,19284	0,03214	0,6498	0,7802	0,50	1,14
TENSÃO	Natação	12	200,7258	21,29810	6,14823	187,1937	214,2580	161,62	234,04
	Roda	12	223,5233	17,61429	5,08481	212,3317	234,7149	183,00	243,07
	Controle	12	183,1500	15,77604	4,55415	173,1264	193,1736	159,16	214,12
	Total	36	202,4664	24,48024	4,08004	194,1835	210,7493	159,16	243,07

ANEXO 12

Análise do Momento de Inércia (MOM); Força Máxima (FMÁX); Flecha e Tensão do Fêmur entre os grupos GR,GN e GC utilizando-se a análise de variância *one-way* (ANOVA).

		A N O V A				
		Soma dos Quadrados	df	Quadrado Médio	F	Sig.
MOM	Entre os Grupos	10,291	2	5,145	4,713	0,016
	Nos mesmos Grupos	36,029	33	1,092	---	---
	Total	46,320	35	---	---	---
FMAX	Entre os Grupos	51,844	2	25,922	0,122	0,886
	Nos mesmos Grupos	7017,989	33	212,666	---	---
	Total	7069,832	35	---	---	---
FLECHA	Entre os Grupos	0,160	2	0,080	2,308	0,115
	Nos mesmos Grupos	1,142	33	0,035	---	---
	Total	1,302	35	---	---	---
TENSÃO	Entre os Grupos	9834,568	2	4917,284	14,566	0,000
	Nos mesmos Grupos	11140,314	33	337,585	---	---
	Total	20974,882	35	---	---	---

ANEXO 13

Teste de comparações múltiplas de Tukey para se detectar o sítio das diferenças dos dados: Momento de Inércia (MOM); Força Máxima (FMÁX); Flecha e Tensão de Fêmures entre os grupos GR, GC e GN.

Comparações Múltiplas

Tukey HSD							
Variável Dependente	(I) Grupo	(J) Grupo	Diferença Média (I-J)	Desvio Padrão	Sig.	Intervalo de Confiança 95%	
						Cota Inferior	Cota Maior
MOM	NATAÇÃO	RODA	0,56301	0,42657	0,394	-0,4837	1,6097
		CONTROLE	-0,74252	0,42657	0,206	-1,7892	0,3042
	RODA	NATAÇÃO	-0,56301	0,42657	0,394	-1,6097	0,4837
		CONTROLE	-1,30553*	0,42657	0,012	-2,3522	-0,2588
	CONTROLE	NATAÇÃO	0,74252	0,42657	0,206	-0,3042	1,7892
		RODA	-1,30553*	0,42657	0,012	0,2588	2,3522
FMAX	NATAÇÃO	RODA	-2,80917	5,95352	0,885	-17,4179	11,7995
		CONTROLE	-0,65500	5,95352	0,993	-15,2637	13,9537
	RODA	NATAÇÃO	2,80917	5,95352	0,885	-11,7995	17,4179
		CONTROLE	2,15417	5,95352	0,931	-12,4545	16,7629
	CONTROLE	NATAÇÃO	0,65500	5,95352	0,993	-13,9537	15,2637
		RODA	-2,15417	5,95352	0,931	-16,7629	12,4545

(continua)

(conclusão)

Variável Dependente	(I) Grupo	(J) Grupo	Diferença Média (I-J)	Desvio Padrão	Sig.	Intervalo de Confiança 95%		
						Cota Inferior	Cota Maior	
FLECHA	NATAÇÃO	RODA	-0,12333	0,07594	0,250	-0,3097	0,0630	
		CONTROLE	-0,15417	0,07594	0,121	-0,3405	0,322	
	RODA	NATAÇÃO	0,12333	0,07594	0,250	-0,0630	0,3097	
		CONTROLE	0,03083	0,07594	0,913	-0,2172	0,1555	
	CONTROLE	NATAÇÃO	0,15417	0,07594	0,121	-0,0322	0,3405	
		RODA	0,03083	0,07594	0,913	-0,1555	0,2172	
	TENSÃO	NATAÇÃO	RODA	-22,7975*	7,50095	0,012	-41,2033	-4,3917
			CONTROLE	17,57583	7,50095	0,064	-0,8300	35,9816
RODA		NATAÇÃO	22,7975*	7,50095	0,012	4,3917	41,2033	
		CONTROLE	40,37333*	7,50095	0,000	21,9675	58,7791	
CONTROLE		NATAÇÃO	-17,57583	7,50095	0,064	-35,9816	0,8300	
		RODA	40,37333*	7,50095	0,000	-58,7791	-21,9675	

* A diferença média é significativa no nível de 0,05

ANEXO 14

**Dados Descritivos da Avaliação por Ensaio Mecânico utilizando-se a
Máquina Universal de Ensaios mecânicos Kratos[®] 5002 - Tíbia.**

		Descritivos							
		N	Média	Desvio padrão	Erro padrão	Intervalo de confiança para a média 95%		Mínimo	Máximo
						Cota menor	Cota maior		
MOM	Natação	12	5,1433	0,71917	0,20761	4,6864	5,6003	4,21	6,58
	Roda	12	4,5300	0,96725	0,27922	3,9154	5,1446	2,23	5,79
	Controle	12	6,2667	1,63691	0,47253	5,2266	7,3067	3,64	9,08
	Total	36	5,3133	1,35299	0,22550	4,8555	5,7711	2,23	9,08
FMAX	Natação	12	118,0150	17,43034	5,03171	106,9403	129,0897	91,54	141,80
	Roda	12	110,3983	14,97859	4,32395	100,8814	119,9153	87,31	128,73
	Controle	12	100,3775	17,79095	5,13580	89,0737	111,6813	76,55	123,92
	Total	36	109,5969	17,86431	2,97738	103,5525	115,6414	76,55	141,80
FLECHA	Natação	12	0,6350	0,10892	0,03144	0,5658	0,7042	0,50	0,90
	Roda	12	0,6967	0,10680	0,03083	0,6288	0,7645	0,55	0,87
	Controle	12	0,6200	0,10626	0,03067	0,5525	0,6875	0,48	0,89
	Total	36	0,6506	0,10952	0,01825	0,6135	0,6876	0,48	0,90

(continua)

(conclusão)

	N	Média	Desvio padrão	Erro padrão	Intervalo de confiança para a média 95%		Mínimo	Máximo	
					Cota menor	Cota maior			
TENSÃO	Natação	12	178,0450	30,05937	8,67739	158,9462	197,1438	136,96	251,02
	Roda	12	190,3842	29,03665	8,38216	171,9352	208,8332	148,31	246,76
	Controle	12	135,4808	24,40672	7,04561	119,9735	150,9881	105,52	187,00
	Total	36	167,9700	36,12658	6,02110	155,7465	180,1935	105,52	251,02

ANEXO 15

Análise do Momento de Inércia (MOM); Força Máxima (FMÁX); Flecha e Tensão da Tíbia entre os grupos GR,GN e GC utilizando-se a análise de variância *one-way* (ANOVA).

		ANOVA				
		Soma dos Quadrados	df	Quadrado Médio	F	Sig.
MOM	Entre os Grupos	18,616	2	9,308	6,758	0,003
	Nos mesmos Grupos	45,455	33	1,377	---	---
	Total	64,071	35	---	---	---
FMAX	Entre os Grupos	1878,048	2	939,024	3,335	0,048
	Nos mesmos Grupos	9291,621	33	281,564	---	---
	Total	11169,669	35	---	---	---
FLECHA	Entre os Grupos	0,040	2	0,020	1,720	0,195
	Nos mesmos Grupos	0,380	33	0,012	---	---
	Total	0,420	35	---	---	---
TENSÃO	Entre os Grupos	19913,357	2	9956,679	12,752	0,000
	Nos mesmos Grupos	25766,192	33	780,794	---	---
	Total	45679,549	35	---	---	---

ANEXO 16

Teste de comparações múltiplas de Tukey para se detectar o sítio das diferenças dos dados: Momento de Inércia (MOM); Força Máxima (FMÁX); Flecha e Tensão de Tíbias entre os grupos GR, GC e GN.

Comparações Múltiplas

Tukey HSD							
Variável Dependente	(I) Grupo	(J) Grupo	Diferença Média (I-J)	Desvio Padrão	Sig.	Intervalo de Confiança 95%	
						Cota Inferior	Cota Maior
MOM	NATAÇÃO	RODA	0,61333	0,47913	0,416	-0,5624	1,7890
		CONTROLE	-1,12333	0,47913	0,063	-2,2990	0,524
	RODA	NATAÇÃO	-0,61333	0,47913	0,416	-1,7890	0,5624
		CONTROLE	-1,73667	0,47913	0,003	-2,9124	0,5610
	CONTROLE	NATAÇÃO	1,12333	0,47913	0,063	-0,0524	2,2990
		RODA	1,73667*	0,47913	0,003	0,5610	2,9124
FMAX	NATAÇÃO	RODA	7,61667	6,85036	0,514	-9,1927	24,4260
		CONTROLE	17,63750*	6,85036	0,038	0,8281	34,4469
	RODA	NATAÇÃO	-7,61667	6,85036	0,514	-24,4260	9,1927
		CONTROLE	10,02083	6,85036	0,322	-6,7885	26,8302
	CONTROLE	NATAÇÃO	-17,63750*	6,85036	0,038	-34,4469	-0,8281
		RODA	-10,02083	6,85036	0,322	-26,8302	6,7885

(continua)

(conclusão)

Variável Dependente	(I) Grupo	(J) Grupo	Diferença Média (I-J)	Desvio Padrão	Sig.	Intervalo de Confiança 95%		
						Cota Inferior	Cota Maior	
FLECHA	NATAÇÃO	RODA	-0,06167	0,04382	0,349	-0,1692	0,0459	
		CONTROLE	0,1500	0,04382	0,938	-0,0925	0,1225	
	RODA	NATAÇÃO	0,06167	0,04382	0,349	-0,0459	0,1692	
		CONTROLE	0,07667	0,04382	0,202	-0,0309	0,1842	
	CONTROLE	NATAÇÃO	-0,01500	0,04382	0,930	-0,1225	0,0925	
		RODA	-0,07667	0,04382	0,202	-0,184	0,0309	
	TENSÃO	NATAÇÃO	RODA	-12,33917	11,40755	0,532	-40,3310	15,6526
			CONTROLE	42,56417*	11,40755	0,002	14,5724	70,5560
RODA		NATAÇÃO	12,33917	11,40755	0,532	-15,6526	40,3310	
		CONTROLE	54,90333*	11,40755	0,000	26,9115	82,8951	
CONTROLE		NATAÇÃO	-42,56417	11,40755	0,002	-70,5560	-14,5724	
		RODA	-54,90333	11,40755	0,000	-82,8951	-26,9115	

* A diferença média é significativa no nível de 0,05

ANEXO 17

**Correlação de Pearson para variáveis Quantitativas dos dados:
 Conteúdo Mineral ósseo (BMC); Densidade Mineral óssea (BMD);Área;
 Momento de Inércia (MOM);Distância entre fibras(DIST); Força Máxima
 (FMÁX);Rigidez(RIG); Flecha e Tensão.**

Correlações

		BMC	BMD	AREA	MOM	DIST	FMAX	RIG	FLECHA	TENSÃO
BMC	Pearson	1	0,826**	0,482**	0,416*	0,241	0,705*	0,553**	-0,187	0,65
	Sig. (2-tailed)	--	0,000	0,009	0,028	0,216	0,000	0,002	0,341	0,743
	N	28	28	28	28	28	28	28	28	28
BMD	Pearson	0,826**	1	0,221	0,081	-0,004	0,468*	0,427*	-0,266	0,247
	Sig. (2-tailed)	0,000	---	0,259	0,681	0,984	0,012	0,024	0,171	0,205
	N	28	28	28	28	28	28	28	28	28
ÁREA	Pearson	0,482**	0,221	1	0,848**	0,642**	0,425*	0,388*	0,244	-0,644**
	Sig. (2-tailed)	0,009	0,259	---	0,000	0,000	0,24	0,041	0,211	0,000
	N	28	28	28	28	28	28	28	28	28

(continua)

(continuação)

		BMC	BMD	AREA	MOM	DIST	FMAX	RIG	FLECHA	TENSÃO
MOM	Pearson	0,416*	0,081	0,848**	1	0,652**	0,484*	0,460*	0,053	-0,700**
	Sig. (2-tailed)	0,028	0,681	0,000	---	0,000	0,009	0,014	0,788	0,000
	N	28	28	28	28	28	28	28	28	28
DIST	Pearson	0,241	-0,0004	0,642**	0,852**	1	0,255	0,331	0,071	-0,631**
	Sig. (2-tailed)	0,216	0,984	0,000	0,000	---	0,190	0,085	0,719	0,000
	N	28	28	28	28	28	28	28	28	28
FMAX	Pearson	0,705**	0,468*	0,425*	0,484**	0,255	1	0,869**	-0,115	0,249
	Sig. (2-tailed)	0,000	0,012	0,024	0,009	0,190	---	0,000	0,561	0,202
	N	28	28	28	28	28	28	28	28	28

(continua)

(conclusão)

		BMC	BMD	AREA	MOM	DIST	FMAX	RIG	FLECHA	TENSÃO
RIG	Pearson	0,553**	0,427*	0,388*	0,460*	0,331	0,869**	1	-0,182	0,232
	Sig. (2-tailed)	0,002	0,24	0,041	0,014	0,085	0,000	---	0,355	0,234
	N	28	28	28	28	28	28	28	28	28
FLECHA	Pearson	-0,187	-0,266	0,244	0,053	0,071	-0,115	0,182	1	-0,203
	Sig. (2-tailed)	0,341	0,171	0,211	0,788	0,719	0,561	0,355	---	0,300
	N	28	28	28	28	28	28	28	28	28
TENSÃO	Pearson	0,065	0,247	-0,644**	0,700**	-0,631**	0,249	0,232	-0,203	1
	Sig. (2-tailed)	0,743	0,205	0,000	0,000	0,000	0,202	0,234	0,300	---
	N	28	28	28	28	28	28	28	28	28

** A Correlação é significativa no nível de 0,01 (2-tailed)

* A correlação é significativa no nível de 0,05 (2-tailed)

REFERÊNCIAS

9 Referências

Albrand G, Munoz F, Sornay-Rendu E, DuBoeuf F, Delmas PD. Independent predictors of all osteoporosis-related fractures in healthy postmenopausal women: the OFELY study. *Bone*. 2003;32(1):78-85.

Bagi CM, Miller SC, Bowman BM, Blomstrom GL, France EP. Differences in cortical bone in overloaded and underloaded femurs from ovariectomized rats: comparison of bone morphometry with torsional testing. *Bone*. 1992;13(1):35-40.

Beaudreuil J. Nonpharmacological treatments for osteoporosis. *Ann Readapt Med Phys*. 2006;49(8):581-8.

Beitz R, Dören M. Physical activity and postmenopausal health. *J Br Menopause Soc*. 2004;10(2):70-4.

Brunet M. Female athlete triad. *Clin Sports Med*. 2005;24(3):623-36.

Carvalho HF, Collares-Buzato CB (Orgs.). *Células: uma abordagem multidisciplinar*. Barueri, SP: Manole, 2005. 1. 450 p.

Carvalho J, Mota J, Soares JM. Strength training vs. aerobic training: cardiovascular tolerance in elderly adults. *Rev Port Cardiol*. 2003;22(11):1315-30.

Cauley JA, Fullman RL, Stone KL, Zmuda JM, Bauer DC, Barrett-Connor E, Ensrud K, Lau EM, Orwoll ES; Mr. OS Research Group. Factors associated with the lumbar spine and proximal femur bone mineral density in older men. *Osteoporos Int*. 2005;16(12):1525-37.

Cl rroux J, Feldman RD, Petrella RJ. Lifestyle modifications to prevent and control hypertension. 4. Recommendations on physical exercise training. Canadian Hypertension Society, Canadian Coalition for High Blood Pressure Prevention and Control, Laboratory Centre for Disease Control at Health Canada, Heart and Stroke Foundation of Canada. *CMAJ*. 1999;160(9 Suppl):S21-8

Cooper C, Westlake S, Harvey N, Javaid K, Dennison E, Hanson M. Review: developmental origins of osteoporotic fracture. *Osteoporos Int*. 2006;17(3):337-47.

Courteix D, Lespessailles E, Peres SL, Obert P, Germain P, Benhamou CL. Effect of physical training on bone mineral density in prepubertal girls: a comparative study between impact-loading and non-impact-loading sports. *Osteoporos Int*. 1998;8(2):152-8.

Daly RM. The effect of exercise on bone mass and structural geometry during growth. *Med Sport Sci*. 2007;51:33-49.

De Feo P, Di Loreto C, Lucidi P, Murdolo G, Parlanti N, De Cicco A, Piccioni F, Santeusano F. Metabolic response to exercise. *J Endocrinol Invest*. 2003;26(9):851-4.

Delaney MF. Strategies for the prevention and treatment of osteoporosis during early postmenopause. *Am J Obstet Gynecol*. 2006;194(2 Suppl):S12-23.

Duncan CS, Blimkie CJ, Cowell CT, Burke ST, Briody JN, Howman-Giles R. Bone mineral density in adolescent female athletes: relationship to exercise type and muscle strength. *Med Sci Sports Exerc*. 2002;34(2):286-94.

Duque G, Mallet L, Roberts A, Gingrass S, Kremer R, Sainte-Marie LG, Kiel DP. To treat or not to treat, that is the question: proceedings of the Quebec symposium for the treatment of osteoporosis in long-term care institutions, Saint-Hyacinthe, Quebec. *J Am Med Dir Assoc*. 2007;8(3 Suppl 2):67-73.

Ensrud KE, Ewing SK, Taylor BC, Fink HA, Stone KL, Cauley JA, Tracy JK, Hochberg MC, Rodondi N, Cawthon PM. For the study of osteoporotic fractures research group. Frailty and risk of falls, fracture, and mortality in older women: the study of osteoporotic fractures. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci*. 2007;62(7):744-51.

Frost HM. Wolff's Law and bone's structural adaptations to mechanical usage: an overview for clinicians. *Angle Orthod*. 1994;64(3):175-88.

Gemalmaz A, Discigil G, Sensoy N, Basak O. Identifying osteoporosis in a primary care setting with quantitative ultrasound: relationship to anthropometric and lifestyle factors. *J Bone Miner Metab*. 2007;25(3):184-92.

Gemalmaz A, Oge A. Knowledge and awareness about osteoporosis and its related factors among rural Turkish women. *Clin Rheumatol*. 2007; Oct 27 [Epub ahead of print].

Gomes RJ, de Mello MA, Caetano FH, Sibuya CY, Anaruma CA, Rogatto GP, Pauli JR, Luciano E. Effects of swimming training on bone mass and the GH/IGF-1 axis in diabetic rats. *Growth Horm IGF Res*. 2006;16(5-6):326-31

Hadjidakis DJ, Androulakis II. Bone remodeling. *Ann N Y Acad Sci*. 2006;1092:385-96.

Hagerman FC, Walsh SJ, Staron RS, Hikida RS, Gilders RM, Murray TF, Toma K, Ragg KE. Effects of high-intensity resistance training on untrained older men. I. Strength, cardiovascular, and metabolic responses. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci*. 2000;55(7):B336-46.

Häkkinen K, Alen M, Kraemer WJ, Gorostiaga E, Izquierdo M, Rusko H, Mikkola J, Häkkinen A, Valkeinen H, Kaarakainen E, Romu S, Erola V, Ahtiainen J, Paavolainen L. Neuromuscular adaptations during concurrent strength and endurance training versus strength training. *Eur J Appl Physiol*. 2003;89(1):42-52.

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(4):1663-8.

Haskell WL, Lee IM, Pate RR, Powell KE, Blair SN, Franklin BA, Macera CA, Heath GW, Thompson PD, Bauman A. Physical activity and public health: updated recommendation for adults from the American College of Sports Medicine and the American Heart Association. *Med Sci Sports Exerc.* 2007;39(8):1423-34.

Hazell T, Kenno K, Jakobi J. Functional benefit of power training for older adults. *J Aging Phys Act.* 2007;15(3):349-59.

Heilborn J (ed). *Science and engineering programs*. Apple II edition. Berkeley, CA: Osborne/McGraw-Hill; 1981, p.158.

Honda A, Sogo N, Nagasawa S, Shimizu T, Umemura Y. High-impact exercise strengthens bone in osteopenic ovariectomized rats with the same outcome as Sham rats. *J Appl Physiol.* 2003;95(3):1032-7.

Hoshi A, Watanabe H, Chiba M, Inaba Y. Bone density and mechanical properties in femoral bone of swim loaded aged mice. *Biomed Environ Sci.* 1998;11(3):243-50.

Huang TH, Lin SC, Chang FL, Hsieh SS, Liu SH, Yang RS. Effects of different exercise modes on mineralization, structure, and biomechanical properties of growing bone. *J Appl Physiol.* 2003;95(1):300-7.

Iwamoto J, Shimamura C, Takeda T, Abe H, Ichimura S, Sato Y, Toyama Y. Effects of treadmill exercise on bone mass, bone metabolism, and calciotropic hormones in young growing rats. *J Bone Miner Metab.* 2004;22(1):26-31.

Iwamoto J, Takeda T, Sato Y. Effect of treadmill exercise on bone mass in female rats. *Exp Anim.* 2005;54(1):1-6.

Karatosun H, Erdogan A, Yildiz M, Akgun C, Cetin C. Effects of swimming training and free mobilization on bone mineral densities of rats with the immobilization-induced osteopenia. *Saudi Med J.* 2006;27(3):312-6.

Karlsson MK. Does exercise during growth prevent fractures in later life? *Med Sport Sci.* 2007;51:121-36.

Keen R. Osteoporosis: strategies for prevention and management. *Best Pract Res Clin Rheumatol*. 2007;21(1):109-22.

Kelley GA, Kelley KS. Exercise and bone mineral density at the femoral neck in postmenopausal women: a meta-analysis of controlled clinical trials with individual patient data. *Am J Obstet Gynecol*. 2006;194(3):760-7.

Klentrou P, Slack J, Roy B, Ladouceur M. Effects of exercise training with weighted vests on bone turnover and isokinetic strength in postmenopausal women. *J Aging Phys Act*. 2007;15(3):287-99.

Lamichhane AP. Osteoporosis-an update. *JNMA J Nepal Med Assoc*. 2005;44(158):60-6.

Lane NE. Epidemiology, etiology, and diagnosis of osteoporosis. *Am J Obstet Gynecol*. 2006;194(2 Suppl):S3-11.

Leveritt M, Abernethy PJ, Barry BK, Logan PA. Concurrent strength and endurance training. A review. *Sports Med*. 1999;28(6):413-27.

Lewiecki EM, Silverman SL. Redefining osteoporosis treatment: who to treat and how long to treat. *Arq Bras Endocrinol Metab*. 2006;50(4):694-704.

Lewiecki EM, Borges JL. Bone density testing in clinical practice. *Arq Bras Endocrinol Metabol*. 2006;50(4):586-95.

Lombardi G, Tauchmanova L, Di Somma C, Musella T, Rota F, Savanelli MC, Colao A. Somatopause: dismetabolic and bone effects. *J Endocrinol Invest*. 2005;28(10 Suppl):36-42.

Maciel R, Greve J. Efeitos da atividade física voluntária na densidade mineral óssea e conteúdo mineral ósseo de ratas Wistar. *III Fórum de Pesquisa FIB*. Nov 16. Salvador, BA; 2006.

Magkos F, Kavouras SA, Yannakoulia M, Karipidou M, Sidossi S, Sidossis LS. The bone response to non-weight-bearing exercise is sport-, site-, and sex-specific. *Clin J Sport Med*. 2007;17(2):123-8.

Martin RB. Targeted bone remodeling involves BMU steering as well as activation. *Bone*. 2007;40(6):1574-80.

McCormick RK. Osteoporosis: integrating biomarkers and other diagnostic correlates into the management of bone fragility. *Altern Med Rev*. 2007;12(2):113-45.

McDermott AY, Mernitz H. Exercise and older patients: prescribing guidelines. *Am Fam Physician*. 2006;74(3):437-44.

Melconian S. *Mecânica técnica e resistência dos materiais*. São Paulo, SP: Erica; 1988, p.164 e 240.

Melton SA, Hegsted M, Keenan MJ, Morris GS, O'Neil CE, Zablah-Pimentel EM. Water exercise prevents femur density loss associated with ovariectomy in the retired breeder rat. *J Strength Cond Res*. 2004;18(3):508-12.

Menkes A, Mazel S, Redmond RA, Koffler K, Libanati CR, Gundberg CM, Zizic TM, Hagberg JM, Pratley RE, Hurley BF. Strength Training increases regional bone mineral density and bone remodeling in middle- aged and older men. *J Appl Physiol*. 1993;74(5) :2478-84.

Miller SC, Bowman BM, Jee WS. Available animal models of osteopenia-small and large. *Bone*. 1995;17(4 Suppl):117S-123S.

Murphy NM, Carroll P. The effect of physical activity and its interaction with nutrition on bone health. *Proc Nutr Soc*. 2003;62(4):829-38.

Niehoff A, Kersting UG, Zaucke F, Morlock MM, Brüggemann GP. Adaptation of mechanical, morphological, and biochemical properties of the rat growth plate to dose-dependent voluntary exercise. *Bone*. 2004;35(4):899-908.

Nieman DC. Exercise and resistance to infection. *Can J Physiol Pharmacol*. 1998;76(5):573-80.

Nieman DC, Pedersen BK. Exercise and immune function. Recent developments. *Sports Med*. 1999;27(2):73-80.

Nishijima H, Satake K, Igarashi K, Morita N, Kanazawa N, Okita K. Effects of exercise in overweight Japanese with multiple cardiovascular risk factors. *Med Sci Sports Exerc.* 2007;39(6):926-33.

Notomi T, Okazaki Y, Okimoto N, Saitoh S, Nakamura T, Suzuki M. A comparison of resistance and aerobic training for mass, strength and turnover of bone in growing rats. *Eur J Appl Physiol.* 2000;83(6):469-74.

O'Brien M. Exercise and osteoporosis. *J Med Sci.* 2001;170(1):58-62.

Palombaro KM. Effects of walking-only interventions on bone mineral density at various skeletal sites: a meta-analysis. *J Geriatr Phys Ther.* 2005;28(3):102-7.

Pfister AK, Welch CA, Saville PD, Ratiff HL. Osteoporosis by forearm bone densitometry in postmenopausal women in West Virginia. *W V Med J.* 2007;103(1):26-8.

Poirier P, Després JP. Exercise in weight management of obesity. *Cardiol Clin.* 2001;19(3):459-70.

Prior JC, Barr SI, Chow R, Faulkner RA. Prevention and management of osteoporosis: consensus statements from the Scientific Advisory Board of the Osteoporosis Society of Canada. Physical activity as therapy for osteoporosis. *CMAJ.* 1996;155(7):940-4.

Raisz LG. Pathogenesis of osteoporosis: concepts, conflicts, and prospects. *J Clin Invest.* 2005;115(12):3318-25.

Reinking MF, Alexander LE. Prevalence of disordered-eating behaviors in undergraduate female collegiate athletes and nonathletes. *J Athl Train.* 2005;40(1):47-51.

Rittweger J. Can exercise prevent osteoporosis? *J Musculoskelet Neuronal Interact.* 2006;6(2):162-6.

Ryan AS, Ivey FM, Hurlbut DE, Martel GF, Lemmer JT, Sorkin JD, Metter EJ, Fleg JL, Hurley BF. Regional bone mineral density after resistive training in young and older men and women. *Scand J Med Sci Sports.* 2004;14(1):16-23.

Shipp KM. Exercise for people with osteoporosis: translating the science into clinical practice. *Curr Osteoporos Rep.* 2006;4(4):129-33.

Simkin A, Leichter I, Swissa A, Samueloff S. The effect of swimming activity on bone architecture in growing rats. *J Biomech.* 1989;22(8-9):845-51.

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(1):59-69.

Stone NJ, Schmelz LR. Metabolic syndrome management. *Expert Opin Pharmacother.* 2007;8(13):2059-75.

Suominen H. Muscle training for bone strength. *Aging Clin Exp Res.* 2006;18(2):85-93.

Taaffe DR, Snow-Harter C, Connolly DA, Robinson TL, Brown MD, Marcus R. Differential effects of swimming versus weight-bearing activity on bone mineral status of eumenorrheic athletes. *J Bone Miner Res.* 1995;10(4):586-93.

Verhaeghe J, Thomsen JS, Van Bree R, Van Herck E, Bouillon R, Mosekilde L. Effects of exercise and disuse on bone remodeling, bone mass, and biomechanical competence in spontaneously diabetic female rats. *Bone.* 2000;27(2):249-56.

Włodarski KH, Włodarski PK, Galus R. Senescence of osteogenic cells. *Ortop Traumatol Rehabil.* 2007;9(1):63-7.

APÊNDICE

APÊNDICE 1

Artigos consultados e não incluídos no Trabalho nem nas Referências

Benton MJ, White A. Osteoporosis: recommendations for resistance exercise and supplementation with calcium and vitamin D to promote bone health. *J Community Health Nurs.* 2006;23(4):201-11.

Broderick CR, Winter GJ, Allan RM. Sport for special groups. *Med J Aust.* 2006;184(6):297-302.

Brown JP, Josse RG. Scientific Advisory Council of the Osteoporosis Society of Canada. Clinical practice guidelines for the diagnosis and management of osteoporosis in Canada. *CMAJ.* 2002;167(10 Suppl):S1-34.

Frost HM. A determinant of bone architecture. The minimum effective strain. *Clin Orthop Relat Res.* 1983;(175):286-92.

Frost HM. The mechanostat: a proposed pathogenic mechanism of osteoporoses and the bone mass effects of mechanical and nonmechanical agents. *Bone Miner.* 1987;2(2):73-85.

Frost HM. Vital biomechanics: proposed general concepts for skeletal adaptations to mechanical usage. *Calcif Tissue Int.* 1988;42(3):145-56.

Frost HM. Wolff's law: an 'MGS' derivation of Gamma in the Three-Way Rule for mechanically controlled lamellar bone modeling drifts. *Bone Miner.* 1993;22(2):117-27.