**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INTERUNIDADES EM BIOENGENHARIA
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
FACULDADE DE MEDICINA DE RIBEIRÃO PRETO
INSTITUTO DE QUÍMICA DE SÃO CARLOS**

JULIANA GOULART PRATA DE OLIVEIRA

**EFEITOS DA IMOBILIZAÇÃO E REABILITAÇÃO
AQUÁTICA EM PROPRIEDADES MECÂNICAS DO
MÚSCULO GASTROCNÊMIO DE RATAS TREINADAS E
SEDENTÁRIAS**

**SÃO CARLOS
2005**

JULIANA GOULART PRATA DE OLIVEIRA

**EFEITOS DA IMOBILIZAÇÃO E REABILITAÇÃO
AQUÁTICA EM PROPRIEDADES MECÂNICAS DO
MÚSCULO GASTROCNÊMIO DE RATAS TREINADAS E
SEDENTÁRIAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação Interunidades em Bioengenharia – Escola de Engenharia de São Carlos / Faculdade de Medicina de Ribeirão Preto / Instituto de Química de São Carlos – Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Mestre em Bioengenharia.

Orientador: Prof. Dr. Antônio Carlos Shimano

**SÃO CARLOS
2005**

Dedico este trabalho aos meus queridos pais, Leonidas e Virgínia, à minha irmã Cristiana e aos meus avós, Antônio, Venina, Mardônio e Yolanda, pelo amor, confiança, ensinamentos, compreensão nos momentos de ausência e incentivo incondicional.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, alicerce de minha vida, conhecedor de meu caminho e guia de meus passos.

Agradeço a meus pais, Leonidas de Oliveira e Virgínia Goulart Prata de Oliveira, pelo apoio, amor, incentivo nos momentos de desânimo e por abdicarem de tantos finais de semana e feriados para doarem seu importante auxílio na parte experimental.

Ao amigo querido João Paulo Chiericato Matheus, pelas tantas horas de dedicação, boa vontade em ajudar, incentivo constante e fundamental contribuição em todas as etapas da pesquisa.

À Liana Barbaresco Gomide e Giovana Leitão Sene pelo importante auxílio durante a realização dos ensaios mecânicos, sugestões na correção textual, inestimável amizade e convívio prazeroso.

Ao engenheiro e amigo Marcos Massao Shimano pela impagável ajuda na compressão dos cálculos, recursos computacionais e formatação do texto.

Aos amigos Suraya Gomes Novais Shimano, Vítor Aparecido Castania, Luís Carlos de Paula Melo, Paulo Eugênio Cecin e Francisco Cláudio Dantas Mota, pelos muitos ensinamentos, amizade e auxílio durante todo o período do mestrado.

Aos funcionários do laboratório de Bioengenharia da Faculdade de Medicina de Ribeirão Preto - USP, Francisco Carlos Mazzonato, Luís Henrique Alves Pereira, Carlos Alberto Moro e Maria Teresinha de Moraes, pela inesquecível paciência, compreensão, acolhimento, amizade e disposição em ajudar sempre.

Aos funcionários da Oficina de Precisão da Prefeitura do Campus de Ribeirão Preto - USP, pela confecção de materiais indispensáveis para a realização deste trabalho.

À secretária do programa de pós-graduação Interunidades em Bioengenharia, Janete R. Ferreira dos Santos, pela presteza na organização burocrática do mestrado.

Aos queridos colegas do laboratório de Bioengenharia, Gustavo, Leonardo César, Fabrício, Dayana, Graziella, Leandro, Fabiano, Emilson, Ilton, Davi, Juliana, Patrícia, Maurício e Okubo, pelo convívio e aprendizado.

À Prof. Dra. Ana Cláudia Mattiello Sverzut, pela solicitude e importante contribuição científica.

Ao Maurício Milani, meu anjo-da-guarda, pela alegria, sugestões, correções, auxílio na parte gráfica e estatística, paciência, companheirismo, carinho e por ser meu valioso ponto de apoio e equilíbrio.

A todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

AGRADECIMENTOS ESPECIAIS

Ao Prof. Dr. Antônio Carlos Shimano, meus eternos agradecimentos pelo privilégio de ser sua aluna, confiança em mim depositada, amizade, exemplo de vida, incansável dedicação, proveitosas discussões e valiosos ensinamentos ao longo de meu desenvolvimento como profissional e pessoa.

Ao Prof. Dr. José Batista Volpon, pela acolhida no laboratório, orientações, críticas, generoso apoio em todas etapas desta pesquisa e empréstimo da máquina universal de ensaios (EMIC®), sem a qual seria impossível a realização deste trabalho.

A ambos, meus sinceros agradecimentos, toda minha estima, admiração e respeito.

(...)

“Sonho com aquilo que quero. Sou o que quero ser, porque possuo apenas uma vida e nela só tenho uma chance de fazer aquilo que quero.

Tenho felicidade bastante para fazê-la doce.

Dificuldades para fazê-la forte.

Tristeza para fazê-la humana.

E esperança suficiente para fazê-la feliz.

As pessoas mais felizes não têm as melhores coisas.

Elas sabem fazer o melhor das oportunidades que aparecem em seus caminhos.

A felicidade aparece para aqueles que choram. Para aqueles que se machucam.

Para aqueles que buscam e tentam sempre.

E para aqueles que reconhecem a importância das pessoas que passam por suas vidas. “

(...)

Clarice Lispector

RESUMO

OLIVEIRA, J.G.P. (2005). *Efeitos da imobilização e reabilitação aquática em propriedades mecânicas do músculo gastrocnêmio de ratas treinadas e sedentárias*. Dissertação (mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos / Faculdade de Medicina de Ribeirão Preto / Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

O músculo esquelético é bastante adaptável às alterações nas demandas funcionais. Este trabalho teve como objetivo analisar o treinamento físico com natação, o sedentarismo e os efeitos da imobilização e reabilitação aquática em propriedades mecânicas do músculo gastrocnêmio de ratas treinadas e sedentárias. Para tanto, foram utilizadas 70 ratas Wistar, divididas em 7 grupos experimentais: grupo 1 (Controle) - mantido por 6 semanas em condições basais; grupo 2 (Treinado) - submetido a natação (treinamento de resistência) durante 6 semanas; grupo 3 (Sedentário) - alojado por 6 semanas em gaiolas nas quais a mobilidade esteve limitada; grupo 4 (Treinado-Imobilizado) - treinado com natação e submetido a imobilização gessada por 1 semana; grupo 5 (Sedentário-Imobilizado) - submetido ao sedentarismo e imobilizado por 1 semana; grupo 6 (Treinado-Imobilizado-Reabilitado) - submetido a treinamento, imobilizado 1 semana e reabilitado com natação por 2 semanas; grupo 7 (Sedentário-Imobilizado-Reabilitado) - mantido sedentário, imobilizado 1 semana e reabilitado com o mesmo protocolo do grupo anterior. Após estas etapas, os animais foram submetidos à eutanásia e o músculo gastrocnêmio do membro pélvico direito foi retirado para a realização do ensaio mecânico de tração em uma máquina universal de ensaios (EMIC®). A partir dos gráficos carga *versus* alongamento de cada ensaio, foram calculadas as seguintes propriedades mecânicas: carga no limite de proporcionalidade, carga no limite

máximo e rigidez. Os resultados sugeriram que o treinamento com natação causou adaptações biomecânicas favoráveis no músculo esquelético, ao contrário do sedentarismo. A imobilização gessada acarretou piora das propriedades mecânicas analisadas e, embora a perda em valores absolutos tenha sido maior nos animais submetidos ao treinamento prévio, houve maior preservação das propriedades dos músculos nas ratas treinadas em comparação às sedentárias. Além disto, a reabilitação foi eficiente em melhorar o comportamento mecânico muscular e foi possível observar que os animais previamente treinados apresentaram resultado final mais satisfatório que os sedentários.

Palavras-chave: propriedades mecânicas, treinamento, sedentarismo, imobilização, reabilitação, músculo, rato.

ABSTRACT

OLIVEIRA, J.G.P. (2005). *Effects of immobilization and aquatic rehabilitation on the mechanical properties of gastrocnemius muscle of trained and sedentary female rats*. M. Sc. Dissertation. Escola de Engenharia de São Carlos / Faculdade de Medicina de Ribeirão Preto / Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

The skeletal muscle is a very adjustable structure and may present changes in response to functional demands. The aim of this study was to investigate the influence of physical training (swimming), sedentarism and the effects of immobilization and aquatic rehabilitation on the mechanical properties of the gastrocnemius muscle of trained and sedentary rats. Seventy female Wistar rats were allocated into seven experimental groups: group 1 (Control) - kept during 6 weeks in basal conditions; group 2 (Trained) - conditioned by a swimming program (resistance training) during six weeks; group 3 (Sedentary) - kept, during the same period, in small cages in which their mobility was restricted; group 4 (Trained-Immobilized) – previously trained with swimming and immobilized in a spica cast during a week; group 5 (Sedentary-Immobilized) - submitted to sedentarism and immobilized during a week; group 6 (Trained-Immobilized-Rehabilitated) - physically trained, immobilized during a week and rehabilitated with swimming during two weeks; group 7 (Sedentary-Immobilized-Rehabilitated) - submitted to sedentarism, immobilized during a week and rehabilitated with the same protocol of the previous group. After this period, the animals were killed and the right gastrocnemius muscle was collected and mechanically tested in traction in a standard testing machine (EMIC®). From the load *versus* deformation curves, the following mechanical parameters were obtained: load in the yield limit, ultimate load and stiffness. The results suggest that physical training caused favorable mechanical

adaptations in the striated muscle. Conversely, sedentarism yielded a decrease in the mechanical parameters. Cast immobilization induced a decrease of mechanical parameters and, although the decrease was greater animals submitted to previous training, the mechanical parameters of trained rats were preserved in comparison to the sedentary animals. In addition, the rehabilitation program improved the muscular mechanical behavior and the previously trained animals showed a better recovery when compared with the sedentary rats.

Keywords: mechanical properties, training, sedentarism, immobilization, rehabilitation, muscle, rat.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Componentes da gaiola “reduzida”: (A) grade superior; (B) divisória de contenção; (C) gaiola plástica.	38
Figura 2. Da esquerda para a direita: gaiola “reduzida” e a gaiola “padrão”.	39
Figura 3. Reservatório de água para a natação.....	41
Figura 4. Aquecedor de água	41
Figura 5. Termômetro.	41
Figura 6. Cinta elástica com pesos de chumbo.	42
Figura 7. Posicionamento da cinta elástica com pesos de chumbo fixada ao tórax da rata	42
Figura 8. Exercício de natação.	43
Figura 9. Quadro apresentando o protocolo de natação.....	43
Figura 10. Rata sendo retirada do reservatório de água.....	44
Figura 11. Ratas sendo secas com um secador, após o término da sessão de natação.....	44
Figura 12. Animal com membro posterior direito imobilizado com aparelho gessado.	45
Figura 13. Quadro apresentando o protocolo de reabilitação aquática (natação).	46

Figura 14. Músculo gastrocnêmio dissecado, com origem e inserção preservadas.....	47
Figura 15. Máquina universal de ensaios - EMIC [®] , acoplada a um microcomputador.....	48
Figura 16. Partes superior (A), intermediária (B) e inferior (C) do acessório de fixação do músculo.....	49
Figura 17. Posicionamento do acessório de fixação do músculo na máquina EMIC [®]	49
Figura 18. Detalhes do posicionamento do músculo gastrocnêmio e do acessório de fixação.....	49
Figura 19. Gráfico esquemático carga <i>versus</i> alongamento. A – B: fase elástica; B - D: fase plástica; B: limite de proporcionalidade; C: limite de resistência; D: limite de ruptura; CLP: carga no limite de proporcionalidade; CLM: carga no limite máximo.....	51
Figura 20. Gráfico carga <i>versus</i> alongamento do GRUPO 1 – Controle (C). ...	53
Figura 21. Gráfico carga <i>versus</i> alongamento do GRUPO 2 – Treinado (T). ...	54
Figura 22. Gráfico carga <i>versus</i> alongamento do GRUPO 3 – Sedentário (S). ...	54
Figura 23. Gráfico carga <i>versus</i> alongamento do GRUPO 4 – Treinado-Imobilizado (TI).....	55
Figura 24. Gráfico carga <i>versus</i> alongamento do GRUPO 5 – Sedentário-Imobilizado (SI).....	55
Figura 25. Gráfico carga <i>versus</i> alongamento do GRUPO 6 – Treinado-Imobilizado-Reabilitado (TIR).	56
Figura 26. Gráfico carga <i>versus</i> alongamento do GRUPO 7 – Sedentário-Imobilizado-Reabilitado (SIR).	56

Figura 27. Gráfico ilustrando média, desvio padrão, limites máximo e mínimo da CLP de todos os grupos experimentais: Controle (C), Treinado (T), Sedentário (S), Treinado-Imobilizado (TI), Sedentário-Imobilizado (SI), Treinado-Imobilizado-Reabilitado (TIR) e Sedentário-Imobilizado-Reabilitado (SIR).	58
Figura 28. Gráfico apresentando a carga no limite de proporcionalidade dos grupos Controle (C), Treinado (T) e Sedentário (S).	59
Figura 29. Gráfico apresentando a carga no limite de proporcionalidade dos grupos Controle (C), Treinado (T), Treinado-Imobilizado (TI) e Treinado-Imobilizado-Reabilitado (TIR).	60
Figura 30. Gráfico apresentando a carga no limite de proporcionalidade dos grupos Controle (C), Sedentário (S), Sedentário-Imobilizado (SI) e Sedentário-Imobilizado-Reabilitado (SIR).	61
Figura 31. Gráfico apresentando a carga no limite de proporcionalidade dos grupos Controle (C), Treinado-Imobilizado (TI), Sedentário-Imobilizado (SI), Treinado-Imobilizado-Reabilitado (TIR) e Sedentário-Imobilizado-Reabilitado (SIR).	62
Figura 32. Gráfico ilustrando média, desvio padrão, limites máximo e mínimo da CLM de todos os grupos experimentais: Controle (C), Treinado (T), Sedentário (S), Treinado-Imobilizado (TI), Sedentário-Imobilizado (SI), Treinado-Imobilizado-Reabilitado (TIR) e Sedentário-Imobilizado-Reabilitado (SIR).	63
Figura 33. Gráfico apresentando a carga no limite máximo dos grupos Controle (C), Treinado (T) e Sedentário (S).	64
Figura 34. Gráfico apresentando a carga no limite máximo dos grupos Controle (C), Treinado (T), Treinado-Imobilizado (TI) e Treinado-Imobilizado-Reabilitado (TIR).	65

Figura 35. Gráfico apresentando a carga no limite máximo dos grupos Controle (C), Sedentário (S), Sedentário-Imobilizado (SI) e Sedentário-Imobilizado-Reabilitado (SIR).	66
Figura 36. Gráfico apresentando a carga no limite máximo dos grupos Controle (C), Treinado-Imobilizado (TI), Sedentário-Imobilizado (SI), Treinado-Imobilizado-Reabilitado (TIR) e Sedentário-Imobilizado-Reabilitado (SIR).	67
Figura 37. Gráfico ilustrando média, desvio padrão, limites máximo e mínimo da Rigidez de todos os grupos experimentais: Controle (C), Treinado (T), Sedentário (S), Treinado-Imobilizado (TI), Sedentário-Imobilizado (SI), Treinado-Imobilizado-Reabilitado (TIR) e Sedentário-Imobilizado-Reabilitado (SIR).	68
Figura 38. Gráfico apresentando a propriedade mecânica de rigidez dos grupos Controle (C), Treinado (T) e Sedentário (S).	69
Figura 39. Gráfico apresentando a rigidez dos grupos Controle (C), Treinado (T), Treinado-Imobilizado (TI) e Treinado-Imobilizado-Reabilitado (TIR).	70
Figura 40. Gráfico apresentando a rigidez dos grupos Controle (C), Sedentário (S), Sedentário-Imobilizado (SI) e Sedentário-Imobilizado-Reabilitado (SIR).	71
Figura 41. Gráfico apresentando a propriedade mecânica de rigidez dos grupos Controle (C), Treinado-Imobilizado (TI), Sedentário-Imobilizado (SI), Treinado-Imobilizado-Reabilitado (TIR) e Sedentário-Imobilizado-Reabilitado (SIR).	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – CLP: médias e desvios padrão de todos os grupos experimentais.	57
Tabela 2 – CLM: médias e desvios padrão de todos os grupos experimentais.	62
Tabela 3 – R: médias e desvios padrão de todos os grupos experimentais.	67
Tabela 4 – Propriedades mecânicas do GRUPO 1 – Controle (C).	98
Tabela 5 – Propriedades mecânicas do GRUPO 2 – Treinado.	99
Tabela 6 – Propriedades mecânicas do GRUPO 3 – Sedentário.	99
Tabela 7 – Propriedades mecânicas do GRUPO 4 – Treinado-Imobilizado. ..	100
Tabela 8 – Propriedades mecânicas do GRUPO 5 – Sedentário-Imobilizado.	100
Tabela 9 – Propriedades mecânicas do GRUPO 6 – Treinado-Imobilizado- Reabilitado.	101
Tabela 10 – Propriedades mecânicas do GRUPO 7 – Sedentário-Imobilizado- Reabilitado.	101

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	Sistema muscular e imobilização.....	19
1.2	Remobilização	24
1.3	Treinamento físico.....	27
1.3.1	Exercício aquático (treinamento e reabilitação).....	29
1.4	Estudo biomecânico.....	31
1.4.1	Ensaio mecânicos	32
2	OBJETIVOS	35
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	36
3.1	Animais	36
3.2	Grupos experimentais.....	36
3.3	Caracterização dos grupos.....	37
3.3.1	Grupo 1 (Controle)	37
3.3.2	Grupo 2 (Treinado)	38
3.3.3	Grupo 3 (Sedentário).....	38
3.3.4	Grupo 4 (Treinado-Imobilizado)	39
3.3.5	Grupo 5 (Sedentário-Imobilizado).....	39
3.3.6	Grupo 6 (Treinado-Imobilizado-Reabilitado).....	39
3.3.7	Grupo 7 (Sedentário-Imobilizado-Reabilitado)	40
3.4	Treinamento físico.....	40
3.5	Técnica de imobilização.....	45
3.6	Reabilitação aquática	46
3.7	Coleta do material	47

3.8	Ensaio mecânico de tração.....	48
3.8.1	Propriedades mecânicas	50
3.8.1.1	<i>Carga no limite de proporcionalidade (CLP)</i>	<i>51</i>
3.8.1.2	<i>Carga no limite máximo (CLM)</i>	<i>51</i>
3.8.1.3	<i>Rigidez (R)</i>	<i>52</i>
3.9	Análise estatística	52
4	RESULTADOS.....	53
4.1	Gráficos (Carga versus Alongamento)	53
4.2	Propriedades mecânicas	57
4.2.1	Carga no limite de proporcionalidade (CLP)	57
4.2.1.1	<i>Efeitos do treinamento físico e do sedentarismo (CLP)...</i>	<i>58</i>
4.2.1.2	<i>Efeitos do treinamento físico na imobilização e reabilitação (CLP).....</i>	<i>59</i>
4.2.1.3	<i>Efeitos do sedentarismo na imobilização e reabilitação (CLP).....</i>	<i>60</i>
4.2.1.4	<i>Comparação entre os efeitos do treinamento físico e do sedentarismo na imobilização e reabilitação (CLP).....</i>	<i>61</i>
4.2.2	Carga no limite máximo (CLM).....	62
4.2.2.1	<i>Efeitos do treinamento físico e do sedentarismo (CLM) ..</i>	<i>64</i>
4.2.2.2	<i>Efeitos do treinamento físico na imobilização e reabilitação (CLM)</i>	<i>64</i>
4.2.2.3	<i>Efeitos do sedentarismo na imobilização e reabilitação (CLM)</i>	<i>65</i>
4.2.2.4	<i>Comparação entre os efeitos do treinamento físico e do sedentarismo na imobilização e reabilitação (CLM)</i>	<i>66</i>
4.2.3	Rigidez (R)	67
4.2.3.1	<i>Efeitos do treinamento físico e do sedentarismo (Rigidez)</i>	<i>69</i>
4.2.3.2	<i>Efeitos do treinamento físico na imobilização e reabilitação (Rigidez)</i>	<i>70</i>
4.2.3.3	<i>Efeitos do sedentarismo na imobilização e reabilitação (Rigidez)</i>	<i>71</i>

	<i>4.2.3.4 Comparação entre os efeitos do treinamento físico e do sedentarismo na imobilização e reabilitação (Rigidez)</i>	<i>72</i>
5	DISCUSSÃO	73
6	CONCLUSÃO	85
	REFERÊNCIAS.....	86
	APÊNDICE.....	98
	ANEXO	102

1 INTRODUÇÃO

Os músculos são máquinas biológicas complexas que executam diversas atividades mecânicas. Vários estudos vêm sendo realizados com o intuito de melhor entender as respostas da musculatura esquelética frente às variadas situações, tais como alterações de carga decorrentes de imobilização, treinamentos de resistência e vôos espaciais. Neste contexto, a mensuração das propriedades mecânicas torna-se uma interessante ferramenta, pois fornece conhecimentos importantes a respeito das conseqüentes adaptações às alterações nas demandas funcionais (CAIOZZO, 2002).

1.1 Sistema muscular e imobilização

O tecido muscular esquelético constitui aproximadamente 40% do peso corporal humano (GUYTON; HALL, 1998), sendo formado basicamente por células inervadas, longas e delgadas, também chamadas fibras musculares, e componentes de tecido conectivo, que formam o arcabouço não-contrátil por onde passam rica inervação e suprimento sangüíneo para as fibras musculares (SALTER, 2001).

O componente conectivo do músculo esquelético tem papel fundamental na manutenção da organização e estabilidade do tecido, além de contribuir para as propriedades mecânicas passivas do músculo, como resistência ao alongamento excessivo (BUCKWALTER; GRODZINSKI, 1999).

A função muscular esquelética depende de vários fatores, tais como atividade proprioceptiva intacta, inervação motora, carga mecânica e

mobilidade das articulações. Em condições nas quais algum deles se altera, ocorrem adaptações na musculatura envolvida (APPELL, 1990).

Muitos estudos demonstram que os músculos esqueléticos dos mamíferos possuem a importante característica de se acomodar às mudanças de demanda (GOLDSPINK, 1998; MUJICA; PADILLA, 2001). Esta capacidade de adaptação permite o funcionamento eficiente nas mais variadas situações, o que é fundamental para a sobrevivência das espécies animais (GOLDSPINK, 1998).

Tanto as fibras musculares quanto as células do tecido conectivo respondem às mudanças na atividade muscular. As células do tecido conectivo muscular reagem às modificações de carga com alteração na proliferação e atividade de síntese, o que afeta a organização, composição e propriedades mecânicas da matriz. Já as fibras musculares respondem primeiramente às mudanças persistentes de atividade com alterações na estrutura celular, volume e função (BOOTH, 1987; BUCKWALTER; GRODINSKI, 1999; COOPER, 1972).

Esta adaptabilidade reflete a natureza plástica do músculo esquelético sob condições diversas, variando desde o desuso por imobilização até os exercícios de alta resistência. Em qualquer um dos casos, o grau de uso, ou a demanda funcional, é o fator determinante do tipo de adaptação, que resultará em mudanças na estrutura muscular (MICHAEL, 2000; THOMPSON, 2002). Assim, a função influencia a estrutura do músculo (RUSSELL; MOTLAGH; ASHLEY, 2000).

A manutenção da estrutura muscular, assim como do osso e tecido fibroso, requer uma mínima quantidade de cargas repetitivas. Atividade abaixo desta necessidade causa atrofia, diminuição da força, contratilidade e resistência tecidual (BUCKWATER; WOO; GOLDBERG, 1993; NICKS et al., 1989). Atividade acima pode melhorar a organização, força e massa do tecido (BUCKWATER; WOO; GOLDBERG, 1993).

A imobilização é um tratamento freqüentemente utilizado nas desordens do sistema músculo-esquelético, apesar dos vários efeitos prejudiciais, tais como: atrofia, aumento do volume de tecido conectivo, fibrose intramuscular, perda de extensibilidade, força, resistência (APPELL, 1990; BUSCHBACHER, 2000; JACKMAN; KANDARIAN, 2004; JOZSA et al., 1990;

KANNUS et al., 1992a; KANNUS et al., 1992b), formação de contraturas, alterações da atividade elétrica, diminuição da resistência de ligamentos e tendões (BUSCHBACHER, 2000). Além disto, Jozsa et al. (1990) ainda enfatizam a redução da capacidade oxidativa e densidade capilar intramuscular.

A massa do músculo esquelético é determinada pelo balanço entre síntese e degradação de proteínas. Desta forma, a atrofia muscular é consequência da redução da síntese protéica muscular e/ou aumento de sua degradação (GLASS, 2003; JACKMAN; KANDARIAN, 2004).

Por ser um fenômeno comumente encontrado na prática clínica, a resposta atrófica tem sido examinada em diversos estudos e modelos experimentais (MUSACCHIA; STEFFEN; FELL, 1988), tais como imobilização gessada, tenotomia, desnervação, transecção da medula espinhal e suspensão (ASMUSSEN; SOUKUP, 1991; MERCIER et al., 1999).

A utilização de animais neste tipo de experimento é de fundamental importância, pois permite o estudo dos aspectos celular e molecular das respostas musculares a hipoatividade (MERCIER et al., 1999), bem como das propriedades biomecânicas dos tecidos.

É amplamente aceito que os únicos modelos experimentais de desuso muscular com relevância clínica são aqueles que envolvem músculos com inervação e comprimento normais (APPELL, 1990). Por essa razão, a imobilização de um membro com gesso é um dos principais modelos, tanto em humanos quanto em outros animais (ANSVED, 1995; MERCIER et al., 1999).

A imobilização rígida produz perda mais rápida e severa da estrutura, volume e função muscular, quando comparada à diminuição na frequência ou intensidade da atividade. A síntese de proteínas musculares já começa a diminuir com 6 horas de imobilização gessada de um membro (BOOTH, 1987).

Diversos fatores influenciam o grau de atrofia e período necessário para sua recuperação, tais como o tempo de imobilização, comprimento no qual o músculo foi fixado, grau de desuso comparado com a utilização normal (importante quando se comparam atletas com não atletas), tratamentos ou treinamentos prévios, pré-existência de fraqueza ou atrofia (WILLS et al., 1982).

A maior atrofia ocorre durante a primeira fase da imobilização, havendo pequena perda adicional do diâmetro das fibras após a primeira semana (APPELL, 1986; MERCIER et al. 1999). Da mesma forma, é neste período em que ocorre a maior parte da deteriorização das propriedades funcionais e estruturais do músculo esquelético, que, passado este tempo, ocorre em taxa mais lenta (BOOTH, 1987).

A diminuição da força é bem acentuada (1,3 % - 5,5% por dia) nas imobilizações gessadas (BOTVIN et al., 1975; HERBISON; JAWEED; DITTUNO, 1978, 1984), sendo também maior durante a primeira semana (APPELL, 1990; BLOOMFIELD, 1997; FOWLES; SALE; MACDOUGAL, 2000) e variando entre os grupos e tipos de músculos.

Max, Maier e Vogelsang (1971) relataram perda de 30% do peso muscular do gastrocnêmio de ratos já nos três primeiros dias de imobilização das articulações do membro. Ao final do experimento (15 dias) a redução de peso chegou a 50%.

Booth (1977) analisou o curso da atrofia muscular de ratos imobilizados por diferentes períodos de tempo. Observou que durante os primeiros 10 dias ocorreu 60% da atrofia total dos músculos gastrocnêmio e plantar.

Appell (1986) encontrou nos 7 primeiros dias de imobilização com aparelho gessado, atrofia muscular de 35% no músculo tibial anterior de ratos.

Mercier et al. (1999) relataram que 3 semanas de imobilização em ratos causa atrofia de aproximadamente 50%, sendo que o resultado mais importante ocorre na primeira fase de imobilização, com pequena perda adicional de peso após prolongados períodos.

Pattison et al. (2003) observaram que 10 dias de imobilização gessada resultou em redução de 27 a 37% da massa do músculo sóleo de ratos.

Hauschka, Roy e Edgerton (1987) observaram que a redução do peso muscular após imobilização é menor do que a redução do tamanho das fibras musculares. A partir destas observações, sugeriram que o aumento do tecido conectivo intramuscular pode ocultar a extensão verdadeira da atrofia.

Järvinen et al. (2002) realizaram um trabalho no qual demonstraram que a imobilização acarretou alterações quantitativas e

qualitativas no tecido conectivo intramuscular, tais como aumento de seu volume e densidade, orientação irregular de fibras colágenas, deposição de colágeno no sarcolema das fibras musculares, modificações na estrutura normal do endomísio, entre outras. Segundo os autores, estas alterações poderiam contribuir para a deteriorização das propriedades biomecânicas e funcionais do músculo esquelético.

A atrofia muscular resulta da diminuição de tamanho dos dois principais tipos de fibras (APPELL, 1990). Quando o grau de atrofia é examinado entre os diferentes tipos, há grande discrepância na literatura, mas, apesar desta significativa variedade nas respostas das fibras à imobilização, muitos estudos demonstram que a atrofia envolve todos os tipos e subtipos em similar extensão (ANSVED, 1995).

Witzmann, Kim e Fitts (1982), observaram que a imobilização produz atrofia muscular tanto em fibras rápidas quanto em lentas, além de provocar mudanças nas propriedades contráteis dos diferentes tipos de fibras.

Ansved (1995) estudou os efeitos da imobilização gessada por 4 semanas no sóleo de ratos em diferentes idades e observou diminuição na área de secção do músculo em todas as idades, atrofia em todos os tipos de fibras e, entre os grupos, o grau de atrofia foi similar nos diferentes tipos de fibras.

Ishihara et al. (2004) demonstraram que duas semanas de ausência de carga em um membro por suspensão acarretou atrofia e diminuição da atividade das enzimas oxidativas de todos os tipos de fibras musculares.

Como citado anteriormente, a atrofia que ocorre quando um músculo é imobilizado e, conseqüentemente, não realiza contrações isotônicas, depende do comprimento em que foi fixado. A atrofia é menor quando o músculo é imobilizado em posição de alongamento (BOOTH, 1977; JÄRVINEN; EINOLA; VIRTANEN, 1998).

Järvinen, Einola e Virtanen (1998) estudaram os efeitos da posição de imobilização nas propriedades elásticas do gastrocnêmio de 52 ratos Wistar. Compararam a imobilização gessada em posição de encurtamento e alongamento, avaliando a curva carga *versus* alongamento e o peso bilateral dos gastrocnêmios de cada animal, após 7 e 21 dias de

imobilização. Concluíram que a imobilização em posição encurtada é seguida de uma atrofia muscular mais marcante e maior perda das propriedades elásticas do que a imobilização em posição de alongamento.

Os efeitos da diminuição de carga mecânica na resistência dos músculos têm sido documentados em uma série de experimentos, como no de McDonald e Fitts (1995), que estudaram a ausência de carga no sóleo de ratos por 1 a 2 semanas e observaram redução de aproximadamente 15 a 20 % na tensão do músculo.

Alguns dados sugerem que a atrofia muscular parece resultar em uma perda desproporcional de resistência e módulo de elasticidade. Estes resultados precisam ser ampliados para que haja um claro consenso a respeito dos efeitos da imobilização nestas propriedades dos tecidos biológicos (CAIOZZO, 2002).

1.2 Remobilização

Há muito a ser investigado sobre os efeitos das várias formas de remobilização. Embora muito importantes para a fisiologia do exercício e medicina desportiva, estes efeitos ainda não estão totalmente elucidados. A principal questão é saber se as mudanças degenerativas induzidas pela imobilização são temporárias e reparáveis, ou permanentes (APPELL, 1990; KANNUS et al., 1992b; STEVENS et al., 2004).

A fim de direcionar as ações em reabilitação apropriadamente, é essencial o entendimento da maneira pela qual uma condição de incapacidade é expressada em todos os aspectos do organismo (MICHAEL, 2000), o que inclui o comportamento mecânico dos materiais biológicos, cuja melhora é um dos objetivos a ser alcançado no processo de reabilitação.

O tecido muscular é muito sensível a atrofia mesmo em curtos períodos de desuso, como em uma semana (APPEL, 1990; KANNUS; JÄRVINEN, 1990). Sua recuperação às funções normais (força e resistência) e volume é geralmente uma das mais difíceis e demoradas tarefas, mesmo em medicina esportiva (ERIKSSON, 1981). Porém, como supõe-se que a

recuperação do músculo seja quase ou totalmente completa (COOPER, 1972; HOUSTON; BENTZEN; LARSEN, 1979; TOPP et al., 2002), este conhecimento tem sido aplicado para pacientes que participam de programas de reabilitação ou treinamento pós-imobilização.

Topp et al. (2002) sugeriram que o músculo esquelético tem o potencial de recuperar o conteúdo de proteínas contráteis e a força, pois o número de fibras musculares não é inicialmente afetado pela imobilização.

Alguns trabalhos têm demonstrado que protocolos de aumento da atividade física podem reverter ou preservar a força durante e após a imobilização prolongada (APPELL, 1990; CARVALHO; SHIMANO; VOLPON, 2002; JÄRVINEN; LEHTO, 1993; KASPER, 1995; KASPER; MAXWELL; WHITE, 1996; PIKO, 2000).

O trabalho clássico foi realizado por Booth e Seider (1979), que avaliaram a restauração do peso úmido, conteúdo protéico e força isométrica muscular após 3 meses de imobilização e 4 de remobilização. O peso úmido e conteúdo protéico retornaram aos valores normais já em 2 semanas de remobilização, enquanto a força de contração alcançou valores normais em 4 meses.

Appell (1986) demonstrou que o programa de remobilização deve ser realizado com cautela, a fim de evitar danos teciduais (como alterações patológicas nas células) decorrentes de exercitação precoce.

Takanashi (1992) estudou ratos Wistar imobilizados por 2 semanas e posteriormente treinados em esteira por 0, 1, 2, 4 e 8 semanas. Pela análise dos resultados, observou que o peso úmido e a área de secção do sóleo diminuíram de forma significativa após a imobilização, assim como a porcentagem de tipos de cadeias de miosina. Além disto, constatou que, nos ratos treinados, o peso e a área recuperaram mais rapidamente do que no grupo controle, sugerindo que o treinamento de resistência pode promover a recuperação das disfunções provocadas pela atrofia por desuso.

Appell (1997) analisou o processo de reabilitação muscular após cirurgias ortopédicas e afirmou que altas cargas mecânicas devem ser evitadas, ao contrário das estimulações elétricas, que podem ser aplicadas a fim de auxiliar a recuperação do músculo após o período de imobilização.

Kannus et al. (1998) estudaram os efeitos da imobilização e de três tipos de remobilização (mobilização livre na gaiola e corridas em esteira de baixa e alta intensidade). Por meio de análises morfológicas e histoquímicas observaram que a imobilização induziu o acúmulo de tecido conectivo, redução do tamanho das fibras, perda de capilares e acúmulo de fibras com alterações patológicas. Porém, estas alterações foram, em grande parte, reversíveis quando a remobilização foi intensificada por treinamento físico, sendo que a atividade física de alta intensidade pareceu ser mais benéfica do que a de baixa intensidade.

É evidente que a reabilitação dos tecidos músculo-esqueléticos requer muito mais tempo do que o necessário para causar atrofia por imobilização (KANNUS et al., 1992b). Os músculos que consistem predominantemente de fibras de contração lenta (como o sóleo) parecem recuperar mais rapidamente que aqueles de contração rápida (como gastrocnêmio e tibial anterior), principalmente pela melhor circulação e renovação protéica (APPELL, 1990; BOOTH, 1978; BOOTH; SEIDER, 1979; DESPLANCES et al., 1987).

O tempo necessário para a completa recuperação, quando esta é possível, é algumas vezes subestimado e dependente da duração da imobilização, idade dos sujeitos, composição de fibras do músculo afetado e sua condição anterior à imobilização. Neste contexto, quando indicado, um programa de treinamento prévio à imobilização pode preservar o músculo de atrofia severa (APPELL, 1990).

Pela escassez dos dados existentes, há necessidade de se pesquisar mais a respeito da remobilização na restauração das propriedades morfológicas e funcionais decorrentes da imobilização, bem como sua prevenção (KANNUS et al., 1992a).

É importante ressaltar que a notável adaptabilidade do músculo esquelético é fundamental nos processos de reabilitação (MICHAEL, 2000).

1.3 Treinamento físico

A atividade física é essencial para o funcionamento saudável do corpo humano. Todos os sistemas do organismo respondem favoravelmente ao exercício físico regular de moderada intensidade e, inversamente, com deteriorização e disfunção em resposta à inatividade (TOPP et al., 2002).

As respostas musculares à atividade física regular podem ser examinadas em humanos ou animais experimentais. As adaptações no sistema músculo-esquelético ao aumento da atividade contrátil dependem do modelo que está sendo estudado, tanto nos humanos quanto em outros animais (BOOTH; THOMASON, 1991).

Minamoto e Salvini (2001) realizaram uma revisão bibliográfica na qual enfatizaram a importância da atividade física como estímulo mecânico regulador da ação secretora hormonal dos fatores de crescimento, produzidos pelo músculo e considerados “anabolizantes fisiológicos”.

Muitos autores têm focalizado suas pesquisas no desenvolvimento de protocolos de atividade física a serem introduzidos depois do período de inatividade, porém, tem havido pouca ênfase na examinação do potencial de melhora da reserva funcional do indivíduo que se exercita antes do destreinamento (TOPP et al., 2002).

Pela escassez de informações quantitativas detalhadas a respeito da extensão em que as propriedades morfológicas e funcionais dos tecidos músculo-esqueléticos podem ter sua perda prevenida durante a imobilização, a hipótese de que um músculo que tenha sido treinado antes da imobilização possa suportar melhor a atrofia não é bem documentada na literatura científica (KANNUS et al., 1992b).

Appell (1986) estudou os efeitos do treinamento físico pré e pós-imobilização nas alterações morfológicas do músculo esquelético. Primeiramente, submeteu ratos à imobilização gessada por diferentes períodos de tempo e examinou a atrofia do tibial anterior pela mensuração das secções transversas das fibras. Em uma segunda série de experimentos, os ratos foram

treinados em esteira antes e após a imobilização. As análises mostraram que, nos músculos treinados antes da imobilização, a atrofia foi quase inexistente, o que sugeriu que o programa de treinamento pré-imobilização provavelmente previne a atrofia muscular severa.

Segundo Appell (1990), um programa de treinamento pré-imobilização pode reduzir o grau de atrofia nos casos em que pode ser realizado antes de um esperado período de imobilização, como nas reconstruções ligamentares decorrente de trauma antigo, osteotomias corretivas, dentre outros procedimentos.

Karpakka et al. (1990) estudaram os efeitos de um programa de treinamento pré-imobilização (3 semanas de natação) e da imobilização após períodos de 0, 7 e 21 dias, na síntese de colágeno em músculos de rato. Para tanto, mensuraram, no sóleo e tibial anterior, enzimas da biossíntese de colágeno. Os resultados sugeriram que o treinamento pré-imobilização poderia estar diminuindo as alterações teciduais decorrentes do desuso durante a primeira semana de imobilização. Além disso, observaram que a natação pode ser um regulador positivo na biossíntese do colágeno.

Topp et al. (2002) realizaram uma revisão bibliográfica na qual enfatizaram que o aumento da atividade física antes de períodos de inatividade, como a internação em uma unidade de terapia intensiva (UTI) ou imobilização, estimula ganhos na capacidade funcional do sistema músculo-esquelético e cardiovascular. Este fator proporciona melhor resposta do organismo frente à hipoatividade, partindo do fato que a melhora da reserva funcional pode atenuar a diminuição das funções, permitindo a manutenção ou retorno mais rápido a sua independência funcional, com redução da duração da reabilitação após a estada na UTI.

A prevenção da atrofia decorrente da imobilização pode ser muito importante se feita apropriadamente. Desta forma, é necessária a realização de mais pesquisas experimentais e clínicas, incluindo todas as modernas técnicas de análise morfológica, funcional, biomecânica e bioquímica (KANNUS et al., 1992b).

1.3.1 Exercício aquático (treinamento e reabilitação)

Atividade física regular de baixa tensão e alta repetição, como caminhadas e natação por um tempo de 30 a 60 minutos, melhora a capacidade das células musculares sustentarem esforços. Este tipo de treinamento aumenta a quantidade de mitocôndrias, conteúdo de glicogênio e proporção de células musculares identificadas como tendo alta capacidade oxidativa (BUCKWALTER; GRODZINSKI, 1999).

Embora seja evidente que a reabilitação aquática tenha realizado grandes avanços e progressos desde o começo do século XX, ainda há um grande espaço para o maior aperfeiçoamento e intensificação dessa prática terapêutica. Isso somente pode ser realizado pelos esforços continuados dos profissionais de saúde que acreditam nos benefícios positivos da incorporação da reabilitação aquática nos programas de tratamento terapêutico (IRION, 2000).

Os efeitos terapêuticos e fisiológicos da água são amplos. Todos os líquidos compartilham uma propriedade chamada viscosidade, que se refere à magnitude do atrito interno do líquido. A viscosidade, com todas as suas propriedades físicas agregadas, é a qualidade que torna a água um meio útil para o treino de fortalecimento, posto que sua resistência aumenta a medida que a força é exercida, embora essa resistência caia a zero instantaneamente com a cessação da força (BECKER, 2000).

O treinamento aquático tornou-se um componente regular de muitas sessões práticas de equipes atléticas e muitas delas exercitam-se rotineiramente na piscina enquanto se recuperam de uma lesão. Esse treinamento, bem como as classes regulares de condicionamento físico aquático fornecidas por muitas organizações, aumentaram o interesse pela fisioterapia aquática para reabilitação e treinamento de extremidades. Várias pessoas podem beneficiar-se da fisioterapia aquática no tratamento das lesões de extremidades. Qualquer indivíduo com limitação ou restrição de sustentação

de peso pode usá-la progressivamente para avançar neste sentido (THEIN; MCNAMARA, 2000).

Atualmente, muitas organizações atléticas reconhecem os benefícios da programação aquática. As últimas tendências mostraram a inclusão de instalações aquáticas nos centros de treinamento das equipes profissionais e nos estádios. Contudo, poucos usam como mais do que um centro temporário de reabilitação. Considerando a escassez de literatura a respeito do treinamento ou reabilitação, essa subutilização pode ser simplesmente o resultado de uma falta de conhecimento (TIERNEY, 2000).

Os experimentos com ratos, preás, cães, coelhos e outros mamíferos procuram simular condições de estresse físico observadas em humanos, visando o melhor acompanhamento das alterações sistêmicas decorrentes do exercício. Dentro dos “ergômetros” mais utilizados para animais estão a esteira rolante e a natação. Os ratos são os animais mais usados, pois além de pequenos e de fácil manipulação, apresentam boa resposta ao exercício. A natação é uma habilidade inata a esta espécie animal e os estudos realizados utilizando esse modelo revelam a ocorrência de adaptações ao treinamento físico semelhantes às observadas em humanos (GOBATTO et al., 2001).

Larsen, Forwood e Parker (1987) estudaram a influência da imobilização (4 semanas) e da reabilitação com natação na resistência elástica e força do ligamento cruzado anterior de ratos. Utilizaram um protocolo de natação de 6 semanas, sendo as duas primeiras de adaptação. A duração de cada sessão foi de 60 minutos e o esforço foi progressivamente aumentado de uma sobrecarga de 1% do peso corporal na terceira semana, para 3% nas semanas finais. Este estudo indicou que o programa de natação proposto foi significativamente eficiente na melhora do déficit de força e resistência elástica dos ligamentos previamente imobilizados.

Diversos estudos relatam variados efeitos positivos do treinamento físico de natação (protocolos de resistência) no músculo esquelético de ratos, como hipertrofia (SAMPAIO BARROS et al, 1995), melhora na mobilização de substratos energéticos (GOBATTO et al., 1991, 2001), aumento da concentração de glicogênio (PERES; LUCIANO, 1995), dentre outros.

Medeiros et al. (2000) utilizaram um protocolo considerado de baixa intensidade e longa duração, no qual treinaram ratos Wistar durante 8 semanas, 60 minutos diários, 5 vezes por semana, com aumento gradual da sobrecarga de trabalho até 5% da massa corporal. Observaram bradicardia de repouso significativa a partir da sexta semana, o que é considerado um eficiente marcador do efeito do treinamento físico aeróbio, além de aumento do metabolismo oxidativo muscular, o que pôde ser observado pelo incremento em 52% da atividade da enzima citrato sintase. Concluíram que este protocolo foi suficiente para promover tanto adaptações centrais (cardiovasculares), quanto periféricas (músculo-esqueléticas).

Luciano et al. (2002) realizaram um estudo no qual utilizaram um protocolo de exercícios considerado crônico, no qual os animais nadaram durante 6 semanas, 60 minutos diários, com carga de 5% do peso corporal. Dentre as observações, verificaram que o músculo esquelético responde ao exercício crônico com uma série de adaptações estruturais e funcionais.

1.4 Estudo biomecânico

A Biomecânica é a mecânica aplicada à biologia, sendo que, para um organismo vivo, é a ciência que ajuda a entender suas funções normais, prever mudanças e propor métodos de intervenção (FUNG, 1993). Pode ser definida como o estudo da estrutura e função dos sistemas biológicos, por meio da utilização dos métodos da mecânica. Partindo desta definição, nota-se que para haver o desenvolvimento de um estudo biomecânico, necessita-se da contribuição de áreas subsidiárias, tais como a anatomia, fisiologia e mecânica (HALL, 1991).

Por ser um valioso instrumento de medida no estudo e compreensão do complexo de forças atuantes no sistema músculo-esquelético e suas conseqüências, atua como elo fundamental entre as ciências exatas e biológicas, possibilitando uma oportunidade para estudos multidisciplinares e interação entre profissionais de diferentes formações (PESSAN, 1996).

Os materiais biológicos e os usados na Engenharia são diferentes, porém algumas técnicas de análise utilizadas na Engenharia podem ser adaptadas aos estudos dos biomateriais (FRATESCHI, 2002).

Segundo Amadio (1996 apud BARBOSA, 2004¹), há dois campos de estudo distintos na Biomecânica: o estudo das forças internas (biomecânica interna) e das forças externas (biomecânica externa). A primeira se encarrega da determinação das forças internas e seus resultados, enquanto a segunda representa os parâmetros de determinação quantitativa ou qualitativa referentes às mudanças de lugar e posição do corpo, ou seja, refere-se às características observáveis exteriormente na estrutura do movimento.

O conhecimento das características de resistência de alguns materiais é importante na medicina ortopédica e esportiva. Materiais biológicos, tais como músculo, osso, tendão e cartilagem, muitas vezes, necessitam de otimização de suas resistências para evitarem rupturas (GOULD, 1993).

1.4.1 Ensaios mecânicos

A Biomecânica proporciona as bases para prever e prover os meios que venham beneficiar o rendimento do corpo humano, sob várias facetas (RAMOS, 1979).

As propriedades dos materiais podem ser determinadas pela observação do comportamento de estruturas já existentes, porém a forma de maior confiabilidade é por meio de ensaios padronizados, que proporcionam resultados comparáveis e reprodutíveis. Estes experimentos são denominados ensaios mecânicos, a partir dos quais são calculadas as propriedades mecânicas dos materiais (SHIMANO; SHIMANO, 2000).

A determinação das propriedades mecânicas é realizada por meio de vários ensaios, que podem ser destrutivos (quando promovem a ruptura ou inutilização do material) ou não-destrutivos, em caso contrário. Na primeira

¹ AMADIO, A. (1996). *Fundamentos biomecânicos para a análise do movimento humano*. São Paulo: Edição da Universidade de São Paulo.

categoria estão classificados os ensaios de tração, impacto, dobramento, flexão, torção, fadiga, compressão e outros. Na segunda, estão os raios X, o ultra-som, dentre outros (SOUZA, 1977).

Os ensaios podem, ainda, ser classificados de acordo com a velocidade de aplicação da carga em estáticos (ou quase estáticos) e dinâmicos. Nos primeiros, a carga é aplicada em baixa velocidade, o que permite a observação das reações do material. Já nos dinâmicos, a velocidade na qual a carga é aplicada é alta (ROCHA, 1998).

A escolha do ensaio mecânico mais interessante ou adequado depende da finalidade do material, tipos de esforços que irá ser submetido e propriedades mecânicas que se deseja medir. O ensaio de tração consiste em submeter o material a um esforço que tende a esticá-lo ou alongá-lo. Os esforços ou cargas são medidos na própria máquina de ensaio e o corpo de prova é levado até sua ruptura (SOUZA, 1977).

Após a realização do ensaio mecânico, pode-se traçar um gráfico carga *versus* alongamento a fim de avaliar o comportamento mecânico do material (SOUZA, 1977). As variáveis calculadas a partir das curvas dos ensaios são importantes, pois ajudam a caracterizar o elemento biológico, o que tem grande importância na absorção, transmissão e resistência a esforços físicos (SEDLIN; HIRSCH, 1996). Entretanto, estudos sobre as propriedades mecânicas do tecido muscular esquelético, por meio de ensaios de tração, são escassos.

Järvinen (1977) utilizou o ensaio mecânico de tração longitudinal para estudar os efeitos da ausência de carga mecânica pela imobilização gessada em ratos. Posteriormente, Järvinen, Einola e Virtanen (1992) usaram o mesmo ensaio para analisar os efeitos da posição de imobilização nas propriedades elásticas do gastrocnêmio de ratos.

Carvalho, Shimano e Volpon (2002) pesquisaram os efeitos da imobilização, remobilização livre e remobilização com treinamento por natação nas propriedades mecânicas do músculo gastrocnêmio de ratas. Observaram que a remobilização livre devolveu ao músculo suas propriedades mecânicas, porém a exercitação não produziu recuperação da resiliência (energia absorvida na fase elástica), apesar de ter havido aumento estatisticamente significativo da rigidez neste grupo, quando comparado ao imobilizado.

Carvalho et al. (2002), analisaram as propriedades mecânicas, obtidas por meio de ensaio mecânico de tração, do músculo gastrocnêmio de ratas imobilizadas e reabilitadas com estimulação elétrica neuromuscular. Observaram que o tratamento favoreceu o aumento nos valores das propriedades mecânicas da fibra muscular.

Lara (2003) investigou os efeitos da natação após a retirada da carga dos membros pélvicos de ratas por suspensão. Estudando os gráficos carga *versus* alongamento de cada ensaio mecânico de tração, calculou as principais propriedades (rigidez, carga e alongamento no limite máximo e de proporcionalidade) e verificou que o exercício foi capaz de reverter as alterações causadas pela hipoatividade.

Considerando a escassez de pesquisas referentes ao estudo das propriedades mecânicas de músculos por meio de ensaios mecânicos, este trabalho propôs investigar se o músculo gastrocnêmio de ratas treinadas previamente à imobilização gessada, quando comparadas a sedentárias, teria menor perda das propriedades mecânicas após este período, bem como melhor recuperação com um mesmo protocolo de reabilitação.

2 OBJETIVOS

Por meio da análise de propriedades mecânicas do músculo gastrocnêmio de ratas, este trabalho teve como objetivos:

- Analisar os efeitos da natação e do sedentarismo;
- Comparar as respostas à imobilização gessada de ratas treinadas com sedentárias;
- Comparar as respostas à reabilitação aquática pós-imobilização de ratas treinadas com sedentárias.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Animais

Foram utilizadas 70 ratas fêmeas da raça *Rattus norvegicus albinus*, variedade *Wistar*, com massa corporal variando entre 235 e 285 gramas (média de $260,52 \pm 16,26$ gramas), fornecidas pelo Biotério Central da Prefeitura do Campus de Ribeirão Preto, da Universidade de São Paulo. Os animais foram mantidos, a temperatura ambiente, em gaiolas alojadas no Laboratório de Bioengenharia da Faculdade de Medicina de Ribeirão Preto - USP, recebendo água e alimentação padrão à vontade.

No início do experimento, os animais foram pesados e identificados com marcas produzidas em suas orelhas. Seguindo as normas e princípios éticos na experimentação animal, este estudo foi aprovado pela Comissão de Ética no Uso de Animais (CEUA) do Campus de Ribeirão Preto – USP, segundo protocolo N° 04.1.374.53.4 (Anexo).

3.2 Grupos experimentais

Foram estudados 7 grupos experimentais, nos quais os animais foram distribuídos aleatoriamente da seguinte forma:

GRUPO 1: CONTROLE (C) - composto por 10 animais mantidos em condições normais de laboratório.

GRUPO 2: TREINADO (T) - composto por 10 animais exercitados com natação.

GRUPO 3: SEDENTÁRIO (S) - composto por 8 animais alojados em gaiolas “reduzidas”, nas quais a mobilidade esteve limitada. Este grupo apresentou uma quantidade menor de animais, pois uma rata morreu de causa desconhecida alguns dias após a chegada no laboratório e o outra foi excluída em decorrência de problemas durante a realização do ensaio mecânico.

GRUPO 4: TREINADO-IMOBILIZADO (TI) - composto por 10 animais treinados com natação e submetidos à imobilização gessada.

GRUPO 5: SEDENTÁRIO-IMOBILIZADO (SI) - composto por 9 animais alojados em gaiolas “reduzidas” e submetidos à imobilização gessada. Este grupo apresentou um número menor de animais, pois uma rata foi excluída em decorrência de problemas durante a realização do ensaio mecânico.

GRUPO 6: TREINADO-IMOBILIZADO-REABILITADO (TIR) - composto por 10 animais exercitados conforme o GRUPO 2, imobilizados e reabilitados com natação.

GRUPO 7: SEDENTÁRIO-IMOBILIZADO-REABILITADO (SIR) - composto por 10 animais alojados em gaiolas “reduzidas”, imobilizados e reabilitados com natação.

3.3 Caracterização dos grupos

3.3.1 Grupo 1 (Controle)

O grupo Controle (C) foi constituído de ratas alojadas por 6 semanas, em número máximo de três, em gaiolas “padrão” (área total da base igual a 1162,5 cm²), com livre acesso à água e alimentação.

3.3.2 Grupo 2 (Treinado)

Os animais do grupo Treinado (T) foram submetidos a um protocolo de treinamento físico de natação durante 6 semanas consecutivas, conforme descrito nas páginas 40 a 44.

3.3.3 Grupo 3 (Sedentário)

Os animais do grupo Sedentário (S) foram colocados individualmente em gaiolas “reduzidas” (área total da base igual a 270 cm²), confeccionadas pela Oficina de Precisão da Prefeitura do Campus da USP de Ribeirão Preto, onde permaneceram por 6 semanas recebendo água e alimentação à vontade. A figura 1 apresenta a grade superior, divisória de contenção e caixa plástica da gaiola “reduzida”. Na figura 2 está ilustrada a comparação visual entre a gaiola “reduzida” e a gaiola “padrão”, com vista superior.

Figura 1. Componentes da gaiola “reduzida”: (A) grade superior; (B) divisória de contenção; (C) gaiola plástica.

Figura 2. Da esquerda para a direita: gaiola “reduzida” e a gaiola “padrão”.

3.3.4 Grupo 4 (Treinado-Imobilizado)

Os animais do grupo Treinado-Imobilizado (TI) foram submetidos ao mesmo protocolo de treinamento físico de natação que o grupo 2 (T) e, posteriormente, imobilizados com aparelho gessado durante 1 semana.

3.3.5 Grupo 5 (Sedentário-Imobilizado)

Os animais do grupo Sedentário-Imobilizado (SI) foram colocados durante 6 semanas em gaiolas “reduzidas” (conforme protocolo do grupo 3 - S) e submetidos à imobilização gessada durante 1 semana.

3.3.6 Grupo 6 (Treinado-Imobilizado-Reabilitado)

Os animais do grupo Treinado-Imobilizado-Reabilitado (TIR) foram submetidos ao protocolo de treinamento físico de 6 semanas,

imobilizados por 1 semana (conforme protocolo do grupo 4 – TI) e reabilitados com natação nas 2 semanas seguintes.

3.3.7 Grupo 7 (Sedentário-Imobilizado-Reabilitado)

Os animais do grupo Sedentário-Imobilizado-Reabilitado (SIR) foram colocados em gaiolas “reduzidas” por 6 semanas, imobilizados na semana seguinte (conforme protocolo do grupo 5 – SI) e reabilitados com natação por 2 semanas.

3.4 Treinamento físico

O treinamento físico de natação foi realizado em um reservatório de água circular, fabricado em plástico, capaz de armazenar 500 litros e com profundidade de 60 cm. Um aquecedor manteve a temperatura da água em 32° C. Estes materiais também foram utilizados nos trabalhos de Carvalho, Shimano e Volpon (2002); Frateschi (2002) e Lara (2003).

A figura 3 apresenta o reservatório de água utilizado para a realização do treinamento físico de natação das ratas. A figura 4 mostra o aquecedor e a figura 5 o termômetro utilizado na verificação da temperatura da água.

Figura 3. Reservatório de água para a natação.

Figura 4. Aquecedor de água

Figura 5. Termômetro.

Os animais foram exercitados no período da manhã, 5 dias por semana, durante 6 semanas consecutivas, totalizando 30 sessões de natação. Entre uma semana e outra foram estabelecidos 2 dias de descanso para recuperação muscular.

A primeira semana de atividade física consistiu em um trabalho de adaptação, em que foram aplicadas cinco sessões de 10, 20, 30, 40 e 50 minutos, sendo uma em cada dia (LINARDI, 1992).

Após esse período, foi iniciado o treinamento de adaptação progressiva ao esforço, no qual foram utilizados pesos de chumbo previamente calibrados, colocados em uma cinta elástica fixada ao tórax do animal, de modo a não prejudicar sua movimentação (CARVALHO; SHIMANO; VOLPON, 2002; FRATESCHI, 2002), como mostram as figuras 6 e 7.

Figura 6. Cinta elástica com pesos de chumbo.

Figura 7. Posicionamento da cinta elástica com pesos de chumbo fixada ao tórax da rata

A carga foi aumentada de 5% a 8% do peso corporal da rata, sendo que, nas últimas sessões, a natação foi realizada durante 60 minutos, com sobrecarga de trabalho igual a 8% do peso corporal. A figura 8 mostra os animais durante a natação e a figura 9 apresenta o quadro com o protocolo proposto.

Figura 8. Exercício de natação.

Semana de treinamento	Duração das sessões em minutos
1º	10; 20; 30; 40; 50
2º	50; 50; 60; 60; 60
3º	60; 60; 60; 60; 60 (com sobrecarga de 5%)
4º	60; 60; 60; 60; 60 (com sobrecarga de 5%)
5º	60; 60; 60; 60; 60 (com sobrecarga de 8%)
6º	60; 60; 60; 60; 60 (com sobrecarga de 8%)

Figura 9. Quadro apresentando o protocolo de natação.

Os animais foram observados durante todo tempo de cada sessão para que não apoiassem na borda do tanque nem flutuassem, deixando de se movimentar.

Após o término das sessões de natação, os animais foram retirados da piscina com o auxílio de uma peneira (figura 10) e secos com um jato de ar quente proveniente de um secador (figura 11).

Figura 10. Rata sendo retirada do reservatório de água.

Figura 11. Ratas sendo secas com um secador, após o término da sessão de natação.

3.5 Técnica de imobilização

Para a confecção do aparelho gessado, os animais foram anestesiados com uma associação de Cloridrato de Ketamina e Xilazina, na dose de 0,6 ml para cada 100 gramas de peso do animal. Após este procedimento, o membro pélvico direito foi imobilizado, incluindo pelve, quadril, joelho e tornozelo.

Para tanto, o membro foi envolvido por uma malha tubular e ataduras de algodão, a fim de prevenir a formação de úlceras de pressão. Por fim, foi utilizada atadura gessada de secagem rápida, com o cuidado de não provocar isquemia no membro (ANSVED, 1995). A figura 12 mostra o modelo de imobilização adotado.

Figura 12. Animal com membro posterior direito imobilizado com aparelho gessado.

Após a imobilização, os animais foram separados em número máximo de três, em gaiolas “padrão” de polietileno, com livre acesso à água e alimentação. A imobilização foi mantida durante uma semana, após a qual o aparelho gessado foi retirado com auxílio de uma serra elétrica manual.

Neste estudo, o aparelho gessado foi confeccionado baseando-se no modelo proposto por Booth e Kelso (1973), adaptado para somente um membro. Este mesmo modelo foi utilizado em outros trabalhos, como nos de Carvalho (2004); Carvalho, Shimano e Volpon (2002); Frateschi (2002), e Oliveira (2004).

3.6 Reabilitação aquática

Passadas 48 horas da retirada do aparelho gessado, os animais dos grupos 6 e 7 foram submetidos a um protocolo de 2 semanas de reabilitação aquática, por meio de natação.

Para tanto, foi utilizado o mesmo reservatório de água anteriormente citado, com temperatura do líquido igual a 32 °C.

Os animais foram exercitados no período da manhã, 5 dias na semana, em um total de 10 sessões. Foram estabelecidos 2 dias de descanso entre as semanas para recuperação muscular. A figura 13 mostra o quadro que apresenta o protocolo de reabilitação proposto.

Semana de treinamento	Duração das sessões em minutos
1º	10; 20; 30; 40; 50
2º	50; 50; 60; 60; 60

Figura 13. Quadro apresentando o protocolo de reabilitação aquática (natação).

No final de cada sessão, os animais foram secos com um jato de ar quente e recolocados em suas gaiolas.

3.7 Coleta do material

Após o término dos protocolos experimentais, os animais foram submetidos à eutanásia por administração intraperitoneal de dose excessiva do anestésico Tiopental Sódico, para que seus gastrocnêmios fossem dissecados e submetidos ao ensaio mecânico de tração.

O músculo gastrocnêmio do membro pélvico direito de cada animal foi retirado, por meio da remoção da pele e de algumas partes moles, seguida da desarticulação da tíbia e quadril. Foi tomada a precaução de manter a integridade do músculo, preservando sua origem no terço distal do fêmur e inserção no calcâneo (figura 14).

Figura 14. Músculo gastrocnêmio dissecado, com origem e inserção preservadas.

Após a dissecação, as peças foram colocadas em solução de Ringer lactato, em temperatura ambiente, até o momento da realização do ensaio.

3.8 Ensaio mecânico de tração

Para a realização dos ensaios mecânicos, foi utilizada uma máquina universal de ensaios (marca EMIC®, modelo DL10000), cedida pelo Prof. Dr. José Batista Volpon, responsável pelo Laboratório de Bioengenharia da Faculdade de Medicina de Ribeirão Preto – USP.

Há uma interface direta da máquina a um microcomputador, com o software *Tesc*®, responsável pelo comando do equipamento e plotagem do gráfico carga *versus* alongamento de cada ensaio (figura 15).

Figura 15. Máquina universal de ensaios - EMIC®, acoplada a um microcomputador.

A máquina foi equipada com uma célula de carga com capacidade de 50 Kgf e, para fixação da peça na máquina, foi confeccionado, na Oficina de Precisão da Prefeitura do Campus de Ribeirão Preto - USP, um acessório que evitou o escorregamento durante a realização do ensaio.

Este acessório foi composto por 3 partes: superior, fixada à célula de carga; intermediária, importante para posicionar o fêmur e fixá-lo na parte superior do acessório; inferior, fixa à base da máquina e importante para fixar a pata do animal (figura 16). A figura 17 apresenta, os detalhes do

posicionamento do acessório na máquina e a figura 18 apresenta o músculo gastrocnêmio acoplado ao acessório e posicionado para ensaio mecânico.

Figura 16. Partes superior (A), intermediária (B) e inferior (C) do acessório de fixação do músculo.

Figura 17. Posicionamento do acessório de fixação do músculo na máquina EMIC®.

Figura 18. Detalhes do posicionamento do músculo gastrocnêmio e do acessório de fixação.

No momento do ensaio, o músculo gastrocnêmio do membro pélvico direito foi acoplado à máquina e, conforme metodologia estabelecida pelo laboratório, foi aplicada uma pré-carga de 200 gramas durante o tempo de acomodação de 30 segundos, com o intuito de provocar acomodação do sistema.

Após a pré-carga, o ensaio prosseguiu por, em média, 8 minutos, com velocidade pré-estabelecida para o ensaio de 10 mm/minuto. A carga aplicada foi registrada pelo *software* em intervalos regulares de alongamento até o momento de ruptura do músculo.

A partir dos gráficos carga *versus* alongamento de cada ensaio, foram obtidas e analisadas as seguintes propriedades mecânicas: carga no limite de proporcionalidade, carga no limite máximo e rigidez.

Da mesma forma que no trabalho de CARVALHO (2001), os músculos foram submetidos ao ensaio em um período máximo de 1 hora e 30 minutos após a coleta, sendo que, durante este tempo, foram mantidos imersos em solução de Ringer lactato, a temperatura ambiente.

3.8.1 Propriedades mecânicas

Os dados referentes à curva de cada ensaio foram transcritos para o programa *Microsoft Excel 2000*[®], no qual foram construídos os gráficos carga *versus* alongamento, a partir dos quais foi possível determinar as propriedades mecânicas: carga no limite de proporcionalidade (CLP), carga no limite máximo (CLM) e rigidez (R).

A figura 19 apresenta um gráfico esquemático carga *versus* alongamento, que é traçado por meio de leituras sucessivas de alongamentos e cargas crescentes. No eixo das abscissas estão presentes os valores dos alongamentos e, no eixo das ordenadas, os valores das cargas. A parte da curva entre os pontos A e B, representada como um segmento de reta, corresponde a fase elástica, na qual a carga apresenta uma relação linear ao alongamento e, se retirada a carga, o material retorna a sua forma original. A partir de B o alongamento e a carga não são mais proporcionais, determinando

o final da fase elástica e início da fase plástica (parte da curva entre os pontos B e D). O ponto B é o limite de proporcionalidade, C é o limite máximo de resistência do material e D representa o limite de ruptura.

Figura 19. Gráfico esquemático carga *versus* alongamento. A – B: fase elástica; B - D: fase plástica; B: limite de proporcionalidade; C: limite de resistência; D: limite de ruptura; CLP: carga no limite de proporcionalidade; CLM: carga no limite máximo.

3.8.1.1 Carga no limite de proporcionalidade (CLP)

É dada pelo registro da carga até o ponto B, que marca o fim da fase elástica e início da fase plástica. É medida em Newtons (N) (figura 19).

3.8.1.2 Carga no limite máximo (CLM)

É calculada no registro máximo de carga imposta (limite de resistência), registrado no ponto C. É medida em Newtons (N) (figura 19).

3.8.1.3 Rigidez (*R*)

A rigidez é uma propriedade obtida na fase elástica do material, determinada pela tangente do ângulo θ (figura 19). É medida em Newtons por metro (N/m) e representada pela seguinte equação:

$$R = Tg\theta$$

3.9 Análise estatística

A análise estatística foi feita por meio do programa “Instat[®] v. 3.00” da *Graphpad Software*. Foi realizado o teste de normalidade *Kolmogorov Smirnov* e a distribuição foi considerada normal para todos os grupos. Desta forma, para análise simultânea dos grupos, foi utilizado o teste ANOVA e, para comparação entre os grupos, o teste de *Tukey-Kramer*, ambos com níveis de significância estabelecidos em 5% ($p < 0,05$).

4 RESULTADOS

4.1 Gráficos (Carga *versus* Alongamento)

A figura 20 apresenta os gráficos carga *versus* alongamento dos músculos gastrocnêmios das ratas do GRUPO 1 – Controle (C).

Figura 20. Gráfico carga *versus* alongamento do GRUPO 1 – Controle (C).

A figura 21 mostra os gráficos carga *versus* alongamento dos músculos das ratas do GRUPO 2 – Treinado (T).

Figura 21. Gráfico carga *versus* alongamento do GRUPO 2 – Treinado (T).

Os gráficos carga *versus* alongamento dos músculos das ratas do GRUPO 3 - Sedentário (S) estão apresentados na figura 22.

Figura 22. Gráfico carga *versus* alongamento do GRUPO 3 – Sedentário (S).

Os gráficos carga *versus* alongamento dos animais do GRUPO 4 - Treinado-Imobilizado (TI) estão apresentados na figura 23.

Figura 23. Gráfico carga *versus* alongamento do GRUPO 4 – Treinado-Imobilizado (TI).

Os gráficos carga *versus* alongamento dos animais do GRUPO 5 - Sedentário-Imobilizado (SI) estão apresentados na figura 24.

Figura 24. Gráfico carga *versus* alongamento do GRUPO 5 – Sedentário-Imobilizado (SI).

Os gráficos carga *versus* alongamento dos animais do GRUPO 6 - Treinado-Imobilizado-Reabilitado (TIR) estão apresentados na figura 25.

Figura 25. Gráfico carga *versus* alongamento do GRUPO 6 – Treinado-Imobilizado-Reabilitado (TIR).

A figura 26 apresenta os gráficos carga *versus* alongamento dos animais do GRUPO 7 - Sedentário-Imobilizado-Reabilitado (SIR).

Figura 26. Gráfico carga *versus* alongamento do GRUPO 7 – Sedentário-Imobilizado-Reabilitado (SIR).

As tabelas com os valores das propriedades mecânicas de carga no limite de proporcionalidade (CLP), carga no limite máximo (CLM) e rigidez (R), dos gastrocnêmios de cada animal dos 7 grupos experimentais estão apresentadas no Apêndice.

4.2 Propriedades mecânicas

4.2.1 Carga no limite de proporcionalidade (CLP)

Os valores médios da carga no limite de proporcionalidade (CLP) dos grupos experimentais estão apresentados na tabela 1.

Tabela 1 – CLP: médias e desvios padrão de todos os grupos experimentais.

Carga no Limite de Proporcionalidade (N)		
GRUPO	Média	Desvio padrão
Controle	36,94	2,61
Treinado	40,59	4,11
Sedentário	32,48	3,29
Treinado-Imobilizado	28,84	2,60
Sedentário-Imobilizado	26,36	2,98
Treinado-Imobilizado-Reabilitado	35,89	2,51
Sedentário-Imobilizado-Reabilitado	30,43	2,37

Os dados de carga no limite de proporcionalidade foram submetidos ao teste de normalidade *Kolmogorov Smirnov* e apresentaram distribuição normal, sendo, assim, submetidos à análise estatística paramétrica.

A análise simultânea dos grupos experimentais pelo teste ANOVA mostrou haver diferença extremamente significativa ($p < 0,0001$).

A figura 27 apresenta o gráfico Box-plot da CLP de todos os grupos experimentais, ilustrando o comportamento de cada grupo por meio da média, desvio padrão, limites máximo e mínimo.

Figura 27. Gráfico ilustrando média, desvio padrão, limites máximo e mínimo da CLP de todos os grupos experimentais: Controle (C), Treinado (T), Sedentário (S), Treinado-Imobilizado (TI), Sedentário-Imobilizado (SI), Treinado-Imobilizado-Reabilitado (TIR) e Sedentário-Imobilizado-Reabilitado (SIR).

4.2.1.1 Efeitos do treinamento físico e do sedentarismo (CLP)

A figura 28 apresenta os valores médios de carga no limite de proporcionalidade dos grupos Controle (C), Treinado (T) e Sedentário (S).

Figura 28. Gráfico apresentando a carga no limite de proporcionalidade dos grupos Controle (C), Treinado (T) e Sedentário (S).

O teste de *Tukey-Kramer* mostrou haver diferença significativa entre os grupos: C e S ($p < 0,05$); e entre T e S ($p < 0,001$). Não foi observada diferença estatística significativa entre o grupo C e o T, apesar de o valor médio do grupo T apresentar-se maior.

4.2.1.2 Efeitos do treinamento físico na imobilização e reabilitação (CLP)

Na figura 29 estão apresentados os valores médios de carga no limite de proporcionalidade dos grupos Controle (C), Treinado (T), Treinado-Imobilizado (TI) e Treinado-Imobilizado-Reabilitado (TIR).

Figura 29. Gráfico apresentando a carga no limite de proporcionalidade dos grupos Controle (C), Treinado (T), Treinado-Imobilizado (TI) e Treinado-Imobilizado-Reabilitado (TIR).

Com o teste de *Tukey-Kramer* foi possível observar diferença significativa entre os grupos: C e TI ($p < 0,001$); T e TI ($p < 0,001$); TI e TIR ($p < 0,001$) e entre T e TIR ($p < 0,05$). Não houve diferença estatística significativa entre o grupo C e o TIR.

4.2.1.3 Efeitos do sedentarismo na imobilização e reabilitação (CLP)

A figura 30 apresenta os valores médios de carga no limite de proporcionalidade dos grupos Controle (C), Sedentário (S), Sedentário-Imobilizado (SI) e Sedentário-Imobilizado-Reabilitado (SIR).

Figura 30. Gráfico apresentando a carga no limite de proporcionalidade dos grupos Controle (C), Sedentário (S), Sedentário-Imobilizado (SI) e Sedentário-Imobilizado-Reabilitado (SIR).

O teste de *Tukey-Kramer* mostrou haver diferença significativa entre os grupos: C e SI ($p < 0,001$); S e SI ($p < 0,01$) e entre C e SIR ($p < 0,001$). Não houve diferença estatística significativa entre o grupo S e o SIR e entre o SI e o SIR, apesar de nesta última comparação observarmos tendência de SIR apresentar valor maior que SI.

4.2.1.4 Comparação entre os efeitos do treinamento físico e do sedentarismo na imobilização e reabilitação (CLP)

Na figura 31 estão apresentados os valores médios de carga no limite de proporcionalidade dos grupos Controle (C), Treinado-Imobilizado (TI), Sedentário-Imobilizado (SI), Treinado-Imobilizado-Reabilitado (TIR) e Sedentário-Imobilizado-Reabilitado (SIR).

Figura 31. Gráfico apresentando a carga no limite de proporcionalidade dos grupos Controle (C), Treinado-Imobilizado (TI), Sedentário-Imobilizado (SI), Treinado-Imobilizado-Reabilitado (TIR) e Sedentário-Imobilizado-Reabilitado (SIR).

O teste de *Tukey-Kramer* mostrou haver diferença significativa entre os grupos TIR e SIR ($p < 0,01$). Não houve diferença estatística entre TI e SI.

4.2.2 Carga no limite máximo (CLM)

Os valores médios da carga no limite máximo (CLM) dos grupos experimentais estão apresentados na tabela 2.

Tabela 2 – CLM: médias e desvios padrão de todos os grupos experimentais.

Carga no Limite Máximo (N)		
GRUPO	Média	Desvio padrão
Controle	44,96	1,95
Treinado	50,09	3,60
Sedentário	43,49	2,66
Treinado-Imobilizado	37,60	3,29

Carga no Limite Máximo (N)		
GRUPO	GRUPO	GRUPO
Sedentário-Imobilizado	33,23	3,39
Treinado-Imobilizado-Reabilitado	42,37	2,24
Sedentário-Imobilizado-Reabilitado	38,79	1,99

Os dados de carga no limite máximo foram submetidos ao teste de normalidade *Kolmogorov Smirnov* e apresentaram distribuição normal, sendo, assim, submetidos à análise estatística paramétrica.

A análise simultânea dos grupos pelo teste ANOVA mostrou diferença estatística extremamente significativa ($p < 0,0001$).

A figura 32 apresenta o gráfico Box-plot da CLM de todos os grupos experimentais, ilustrando o comportamento de cada grupo por meio da média, desvio padrão, limites máximo e mínimo.

Figura 32. Gráfico ilustrando média, desvio padrão, limites máximo e mínimo da CLM de todos os grupos experimentais: Controle (C), Treinado (T), Sedentário (S), Treinado-Imobilizado (TI), Sedentário-Imobilizado (SI), Treinado-Imobilizado-Reabilitado (TIR) e Sedentário-Imobilizado-Reabilitado (SIR).

4.2.2.1 Efeitos do treinamento físico e do sedentarismo (CLM)

A figura 33 apresenta os valores médios de carga no limite de máximo grupos Controle (C), Treinado (T) e Sedentário (S).

Figura 33. Gráfico apresentando a carga no limite máximo dos grupos Controle (C), Treinado (T) e Sedentário (S).

O teste de *Tukey-Kramer* mostrou haver diferença significativa entre os grupos: C e T ($p < 0,01$); e entre T e S ($p < 0,001$). Não foi observada diferença estatística significativa entre o grupo C e o S.

4.2.2.2 Efeitos do treinamento físico na imobilização e reabilitação (CLM)

Na figura 34 estão apresentados os valores médios de carga no limite máximo dos grupos Controle (C), Treinado (T), Treinado-Imobilizado (TI) e Treinado-Imobilizado-Reabilitado (TIR).

Figura 34. Gráfico apresentando a carga no limite máximo dos grupos Controle (C), Treinado (T), Treinado-Imobilizado (TI) e Treinado-Imobilizado-Reabilitado (TIR).

Com o teste de *Tukey-Kramer* foi possível observar diferença significativa entre os grupos: C e TI ($p < 0,001$); T e TI ($p < 0,001$); TI e TIR ($p < 0,01$) e entre T e TIR ($p < 0,001$). Não houve diferença estatística significativa entre o grupo C e o TIR.

4.2.2.3 Efeitos do sedentarismo na imobilização e reabilitação (CLM)

A figura 35 apresenta os valores médios de carga no limite máximo dos grupos Controle (C), Sedentário (S), Sedentário-Imobilizado (SI) e Sedentário-Imobilizado-Reabilitado (SIR).

Figura 35. Gráfico apresentando a carga no limite máximo dos grupos Controle (C), Sedentário (S), Sedentário-Imobilizado (SI) e Sedentário-Imobilizado-Reabilitado (SIR).

O teste de *Tukey-Kramer* mostrou haver diferença significativa entre os grupos: C e SI ($p < 0,001$); S e SI ($p < 0,001$); SI e o SIR ($p < 0,01$); C e SIR ($p < 0,001$) e entre o S e o SIR ($p < 0,05$)

4.2.2.4 Comparação entre os efeitos do treinamento físico e do sedentarismo na imobilização e reabilitação (CLM)

Na figura 36 estão apresentados os valores médios de carga no limite máximo dos grupos Controle (C), Treinado-Imobilizado (TI), Sedentário-Imobilizado (SI), Treinado-Imobilizado-Reabilitado (TIR) e Sedentário-Imobilizado-Reabilitado (SIR).

Figura 36. Gráfico apresentando a carga no limite máximo dos grupos Controle (C), Treinado-Imobilizado (TI), Sedentário-Imobilizado (SI), Treinado-Imobilizado-Reabilitado (TIR) e Sedentário-Imobilizado-Reabilitado (SIR).

O teste de *Tukey-Kramer* mostrou haver diferença significativa entre os grupos: TI e SI ($p < 0,05$). Não houve diferença estatística entre TIR e o SIR, apesar de o valor médio do primeiro grupo ser maior que o do segundo.

4.2.3 Rigidez (R)

Os valores médios da Rigidez (R) dos grupos experimentais estão apresentados na tabela 3.

Tabela 3 – R: médias e desvios padrão de todos os grupos experimentais.

Rigidez ($\times 10^3$ N/m)		
GRUPO	Média	Desvio padrão
Controle	4,9517	0,2546
Treinado	5,3148	0,6524
Sedentário	3,9300	0,6712
Treinado-Imobilizado	4,5839	0,3692

Rigidez ($\times 10^3$ N/m)		
GRUPO	Média	Desvio padrão
Sedentário-Imobilizado	4,1511	0,4886
Treinado-Imobilizado-Reabilitado	5,3575	0,7188
Sedentário-Imobilizado-Reabilitado	4,6058	0,3248

Os dados da rigidez foram submetidos ao teste de normalidade *Kolmogorov Smirnov* e apresentaram distribuição normal, sendo, assim, submetidos à análise estatística paramétrica.

A análise simultânea dos grupos pelo ANOVA mostrou diferença estatística extremamente significativa ($p < 0,0001$).

A figura 37 apresenta o gráfico Box-plot da Rigidez de todos os grupos experimentais, ilustrando o comportamento de cada grupo por meio da média, desvio padrão, limites máximo e mínimo.

Figura 37. Gráfico ilustrando média, desvio padrão, limites máximo e mínimo da Rigidez de todos os grupos experimentais: Controle (C), Treinado (T), Sedentário (S), Treinado-Imobilizado (TI), Sedentário-Imobilizado (SI), Treinado-Imobilizado-Reabilitado (TIR) e Sedentário-Imobilizado-Reabilitado (SIR).

4.2.3.1 Efeitos do treinamento físico e do sedentarismo (Rigidez)

A figura 38 apresenta os valores médios da propriedade mecânica de rigidez dos grupos Controle (C), Treinado (T) e Sedentário (S).

Figura 38. Gráfico apresentando a propriedade mecânica de rigidez dos grupos Controle (C), Treinado (T) e Sedentário (S).

O teste de *Tukey-Kramer* mostrou haver diferença significativa entre os grupos: C e S ($p < 0,01$) e entre T e S ($p < 0,001$). Não houve diferença estatística significativa entre os grupos C e T.

4.2.3.2 Efeitos do treinamento físico na imobilização e reabilitação (Rigidez)

Na figura 39 estão apresentados os valores médios de rigidez dos grupos Controle (C), Treinado (T), Treinado-Imobilizado (TI) e Treinado-Imobilizado-Reabilitado (TIR).

Figura 39. Gráfico apresentando a rigidez dos grupos Controle (C), Treinado (T), Treinado-Imobilizado (TI) e Treinado-Imobilizado-Reabilitado (TIR).

Com o teste de *Tukey-Kramer* foi possível observar diferença significativa entre os grupos: T e TI ($p < 0,05$); TI e TIR ($p < 0,05$). Não houve diferença estatística significativa entre o grupo C e o TI; entre o C e o TIR, bem como entre os grupos T e TIR.

4.2.3.3 Efeitos do sedentarismo na imobilização e reabilitação (Rigidez)

A figura 40 apresenta os valores médios de rigidez dos grupos Controle (C), Sedentário (S), Sedentário-Imobilizado (SI) e Sedentário-Imobilizado-Reabilitado (SIR).

Figura 40. Gráfico apresentando a rigidez dos grupos Controle (C), Sedentário (S), Sedentário-Imobilizado (SI) e Sedentário-Imobilizado-Reabilitado (SIR).

O teste de *Tukey-Kramer* mostrou haver diferença significativa apenas entre os grupos C e SI ($p < 0,05$). Desta forma, não foi observada diferença estatisticamente significativa entre os grupos S e SI, SI e SIR, C e SIR, bem como entre S e SIR. Apesar do resultado estatístico, nota-se que o grupo SIR assumiu valor médio de rigidez maior do que os grupos S e SI.

4.2.3.4 Comparação entre os efeitos do treinamento físico e do sedentarismo na imobilização e reabilitação (Rigidez)

Na figura 41 estão apresentados os valores médios de rigidez dos grupos Controle (C), Treinado-Imobilizado (TI), Sedentário-Imobilizado (SI), Treinado-Imobilizado-Reabilitado (TIR) e Sedentário-Imobilizado-Reabilitado (SIR).

Figura 41. Gráfico apresentando a propriedade mecânica de rigidez dos grupos Controle (C), Treinado-Imobilizado (TI), Sedentário-Imobilizado (SI), Treinado-Imobilizado-Reabilitado (TIR) e Sedentário-Imobilizado-Reabilitado (SIR).

O teste de *Tukey-Kramer* mostrou haver diferença significativa entre os grupos: TIR e SIR ($p < 0,05$). Não houve diferença estatística entre TI e SI.

5 DISCUSSÃO

O exercício físico regular causa modificações profundas no equilíbrio interno do organismo, levando-o a desenvolver diversos mecanismos adaptativos, conforme o tipo de atividade implementada (GALLANI; AZEVEDO; SAMPAIO BARROS, 1997). Por outro lado, a diminuição da sobrecarga imposta na musculatura esquelética resulta em perdas de sua capacidade funcional, com deteriorização das funções (TOPP et al., 2002).

A motivação deste estudo surgiu da lacuna existente na literatura científica quanto à comparação entre os efeitos do treinamento físico prévio e os do sedentarismo no comportamento mecânico do músculo esquelético submetido à imobilização e posterior reabilitação.

Alterações nas propriedades mecânicas dos tecidos biológicos, decorrentes de diminuição ou aumento da demanda funcional, são resultantes de alterações histológicas, mas é questionável se qualquer adaptação histológica é capaz de gerar modificações mecânicas nos tecidos biológicos. Assim, a relevância deste tipo de investigação está na possibilidade do fornecimento de importantes conhecimentos adicionais.

O ensaio mecânico a ser adotado deve ser escolhido pela proximidade da fisiologia mecânica. Neste estudo, optamos pelo ensaio de tração, em que a estrutura anatômica é fixada junto à máquina preservando as características fisiológicas quanto à origem e inserção muscular. Isto é importante, pois, conforme relatos de Hayes e Carter (1971 apud FRATESCHI,

2002²), a análise do tecido biológico como estrutura inteira reflete melhor a solicitação mecânica fisiológica.

Segundo Rocha (1998), o ensaio de tração longitudinal é uma boa escolha, por sua reprodutibilidade, possibilidade de determinar um grande número de propriedades mecânicas, simplicidade e por facilitar a introdução de conceitos válidos para a maioria dos outros tipos de ensaios, o que também motivou a realização deste tipo de experimento. Além disto, este ensaio simula cargas impostas à estrutura músculo-esquelética em funcionamento, que é acometida por constante atuação de forças, principalmente tensão.

Todos os músculos foram submetidos ao ensaio em um tempo máximo de 1 hora e meia. A preocupação quanto ao tempo entre a dissecação e o ensaio foi importante, pois este procedimento deveria ser realizado com o músculo a fresco e, caso houvesse demora e o material não ficasse imerso em soro, poderia haver perda da integridade mecânica do tecido por desidratação.

O músculo gastrocnêmio foi escolhido, pois, assim como o sóleo, é muito sensível a atrofia muscular e parece responder bem a atividade física (JOZSA et al., 1990; KANNUS et al., 1992a; KANNUS et al., 1992b).

Além disto, segundo Järvinen, Einola e Virtanen (1992), o gastrocnêmio é um músculo que trabalha sob condições de atividade física extrema, tendo risco aumentado para lesões ou rupturas, que requerem tratamento com imobilização.

Diversos animais têm sido empregados em estudos experimentais. Neste, optamos pelo rato, pois, segundo Pachioni (1996), é de fácil manuseio, baixo custo e apresenta estrutura músculo-esquelética semelhante a do ser humano. Além disto, conforme relato de Gobatto et al. (2001), é um animal muito adaptável à natação.

Optamos por trabalhar com ratas fêmeas pois, segundo experiência do Laboratório de Bioengenharia da Faculdade de Medicina de Ribeirão Preto - USP, são mais dóceis. Além disto, pesquisas focalizando o estudo de propriedades mecânicas de músculos gastrocnêmios de ratas submetidas a alguma espécie de treinamento não relataram ter apresentado

² HAYES, W.C.; CARTER, D.R. (1971). Biomechanics of bone. In: SIMMONS, D.J.; KUNIN. *Skeletal Reserch*. New York: Academic Press, Cap. 1, p. 263-300.

problemas decorrentes do fato de os animais serem fêmeas (CARVALHO, 2004; CARVALHO; SHIMANO; VOLPON, 2002;).

Para o treinamento e reabilitação, foi escolhida a natação como modalidade de exercício, em decorrência da comprovada solicitação física dos animais. Além disto, nos permitiu que um grande número de animais fosse treinado simultaneamente sob as mesmas condições experimentais, dispensando artifícios como choque elétrico para induzir atividade, conforme acontece na modalidade experimental de exercícios na esteira rolante, em que o estímulo elétrico é acoplado para assegurar o treinamento físico dos animais (VIEIRA et al., 1988).

Desta forma, além de demonstrar ser um eficiente método no que se refere à obtenção de adaptações fisiológicas ao exercício, a natação parece provocar menor estresse emocional agudo no animal do que exercícios com esteira rolante (KOKUBUN, 1990; OSTMAN - SMITH, 1979).

Conforme descrito em outros trabalhos, como no de Frateschi (2002), os animais movimentaram-se de maneira satisfatória, sem intercorrências de afogamentos, mesmo após 60 minutos de natação.

Optamos por realizar um protocolo de 6 semanas de exercitação, pois tínhamos como objetivo estabelecer um treinamento de resistência que acarretasse adaptações fisiológicas no organismo do animal. Segundo Luciano et al. (2002), este tempo é suficiente para induzir alterações estruturais no organismo do rato.

Linardi (1992) implementou um protocolo de 7 semanas, no qual aumentou a sobrecarga de trabalho por incremento de tempo. Observou alterações fisiológicas decorrentes do treinamento de resistência proposto após a sexta semana.

A área da base das gaiolas onde foram colocados os animais sedentários foi estipulada em 270 cm², por estar de acordo com as recomendações quanto a espaço mínimo para animais do *Guide for the care and use of laboratory animals* (INSTITUTE FOR LABORATORY ANIMAL RESEARCH, 1996), utilizado pela Comissão de Ética no Uso de Animais (CEUA) do Campus da USP de Ribeirão Preto. Segundo as recomendações, esta área é suficiente para que os animais não sofram estresse, possam virar seu corpo, mover-se, descansar e expressar os ajustes posturais normais.

Para induzir atrofia muscular, optamos pela imobilização gessada, posto que é um modelo de hipoatividade comumente usado, devido à sua conhecida relevância clínica, simplicidade e pelo fato de não ser um método invasivo (ANSVED, 1995; MERCIER et al., 1999).

Segundo Ansved (1995), embora as contrações isométricas não sejam abolidas no modelo de imobilização gessada, os movimentos das articulações são prevenidos. Neste trabalho, isto pôde ser constatado pelo fato de os animais muitas vezes contraírem os músculos na tentativa de sair do aparelho gessado.

A imobilização foi mantida durante uma semana, pois a literatura relata que neste período ocorre a maior parte da deteriorização das propriedades funcionais e estruturais do músculo esquelético, que, passado este tempo, ocorre em taxa mais lenta (APPELL, 1986; BOOTH, 1987; MERCIER et al., 1999).

Da mesma forma que no trabalho de Oliveira (2004), o gesso confeccionado não restringiu a movimentação dos animais nas gaiolas, permitindo o livre acesso à alimentação, bem como a prática ativa de exercícios com as articulações não envolvidas no aparelho gessado.

Talvez uma das maiores dificuldades encontradas neste trabalho tenha sido a graduação de pressão colocada sobre os animais na confecção dos gessos. Para o aprendizado, foram realizados estudos piloto, a fim de determinar uma pressão que, além de não provocar edema, não permitisse que os animais saíssem do aparelho gessado.

Para a reabilitação, optamos por um protocolo de 2 semanas, por ser o dobro do tempo do período da imobilização e, segundo a literatura, a reabilitação dos tecidos músculo-esqueléticos requer mais tempo do que o necessário para causar atrofia (APPELL, 1990; BOOTH, 1978; BOOTH; SEIDER, 1979; DESPLANCES et al., 1987; KANNUS et al., 1992b).

Realizamos um protocolo de reabilitação precoce e acelerado, para que fosse possível observar se havia diferenças entre os animais previamente treinados e sedentários. Com um protocolo extenso, os grupos poderiam assumir valores mais semelhantes de propriedades mecânicas.

Rosemeyer e Sturz (1977, apud KANNUS et al., 1992b³), realizaram um trabalho no qual observaram que a recuperação muscular esquelética foi alcançada com aproximadamente o dobro do tempo necessário para causar atrofia por imobilização.

Em nosso trabalho, nos primeiros dias após gesso, os ratos se exercitaram com menos desenvoltura, porém de maneira satisfatória, sem intercorrências de afogamento.

No presente estudo, por meio da comparação entre os grupos Controle (C), Treinado (T) e Sedentário (S), foi possível observar adaptações favoráveis da musculatura esquelética submetida ao treinamento físico. Da mesma forma, estas comparações também permitiram verificar os efeitos prejudiciais do sedentarismo em propriedades mecânicas do músculo analisado.

Pelo estudo da carga no limite de proporcionalidade (CLP), verificamos que S assumiu valores estatisticamente menores quando comparado aos grupos C ($p < 0,05$) e T ($p < 0,001$). Isto significa que o sedentarismo provocou alterações que fizeram com que o tecido muscular esquelético se deformasse irreversivelmente em uma menor carga.

Este resultado é importante, pois, segundo Caiozzo (2002), condições que afetam a resistência e o módulo de elasticidade de um músculo ou grupo muscular podem expor a estrutura ligamentar das articulações a um maior risco de lesões.

Além disto, a musculatura que tem a propriedade de carga no limite de proporcionalidade prejudicada, possivelmente, também está mais susceptível a lesões, já que suporta menos carga antes de perder sua integridade estrutural.

Observando o valor médio da CLP do grupo Treinado, percebemos que foi superior ao do grupo Controle, apesar de não ter havido diferença estatística.

³ ROSEMEYER, B.; STURZ, H. (1977). Musculus quadriceps femoris bei immobilisation und remobilisation. *Z Orthop*, v. 115: p.182-8.

Na análise da carga no limite máximo (CLM) verificamos que T assumiu valores médios estatisticamente maiores que C ($p < 0,01$) e S ($p < 0,001$). Desta forma, o treinamento influenciou positivamente o músculo quanto à esta propriedade, já que o fato de a CLM ser estatisticamente maior em T significa que os músculos destes animais suportaram maior carga antes da ruptura.

Analisando a propriedade de rigidez, também foi possível verificar influência do treinamento e do sedentarismo. Houve diferença estatística entre os grupos C e S ($p < 0,01$), bem como entre os grupos T e S ($p < 0,001$).

Järvinen, Einola e Virtanen (1992) relatam que a rigidez do músculo é uma importante propriedade a ser estudada, pois sua redução indica que o músculo está se alongando mais na presença de cargas menores, o que o torna mais susceptível a lesões.

É importante ressaltar que na comparação do grupo T com o S todas as propriedades mecânicas analisadas apresentaram diferença estatisticamente significativa, demonstrando alterações favoráveis das propriedades biomecânicas nos animais treinados e prejudiciais naqueles submetidos ao sedentarismo.

Medeiros et al. (2000) também observaram, em 6 semanas de natação em ratos, tanto adaptações periféricas (músculo-esqueléticas), como centrais (cardiovasculares).

Outro trabalho que demonstrou adaptações músculo-esqueléticas com semelhante protocolo de natação foi o de Sampaio Barros et al. (1995), que, por meio de análises histológicas, observaram hipertrofia de 18,36% nas fibras do gastrocnêmio dos ratos treinados em relação aos sedentários.

No que se refere à diminuição de demanda funcional pelo sedentarismo, Jozsa et al. (1990) relataram que em algumas semanas de redução na frequência ou intensidade de atividade física já ocorrem alterações prejudiciais que afetam a massa e a força muscular. Isto é consequência da diminuição na capacidade oxidativa e no volume das miofibras, que preenchem o citoplasma da fibra muscular.

Em nosso estudo, observamos deteriorização de propriedades mecânicas da fase elástica (CLP e R) em 6 semanas de restrição de movimentação. Isto é importante, pois as propriedades calculadas na fase

elástica refletem uma etapa de deformação reversível mais próxima do funcionamento do músculo em condições normais (CARVALHO; SHIMANO; VOLPON, 2002).

Assim como neste trabalho, Hikkinen e Vouri (1972) também puderam observar os efeitos deletérios da redução de carga por restrição da movimentação. Para tanto, estudaram os efeitos da atividade física no metabolismo do colágeno de camundongos, utilizando um grupo sedentário, mantido em recipientes com $\frac{1}{4}$ do volume das gaiolas normais, nos quais a mobilidade foi consideravelmente limitada.

Outro aspecto analisado foi a influência do treinamento físico e sedentarismo na imobilização e reabilitação. Para tanto, foi necessário fazer comparações entre os grupos Controle (C), Treinado (T), Treinado-Imobilizado (TI) e Treinado-Imobilizado-Reabilitado (TIR), bem como entre os grupos Controle (C), Sedentário(S), Sedentário-Imobilizado (SI) e Sedentário-Imobilizado-Reabilitado (SIR). Além destes, também foram comparados os grupos Treinado-Imobilizado (TI) com Sedentário-Imobilizado (SI), bem como Treinado-Imobilizado-Reabilitado (TIR) com Sedentário-Imobilizado-Reabilitado (SIR).

Quanto à carga no limite de proporcionalidade (CLP), observamos que o grupo TI apresentou valores estatisticamente menores que C ($p < 0,001$) e T ($p < 0,001$). Da mesma forma, o grupo SI também assumiu valores médios estatisticamente menores que os grupos C ($p < 0,001$) e S ($p < 0,01$). Isto mostrou que a imobilização por uma semana foi capaz de reduzir a carga suportada antes da deformação irreversível, tanto nos animais treinados quanto nos sedentários.

Não foi encontrada diferença estatística entre TI e SI. Ressalta-se que os animais previamente sedentários partiram de uma condição inicial pior do que os treinados. Desta forma, a amplitude de perda após a imobilização dos últimos foi maior.

É possível estabelecer relação deste achado com as observações de Appel (1990), que relatou que indivíduos treinados podem perder maior força muscular absoluta após a imobilização.

De maneira análoga, Smorawinski et al. (2001), estudando variáveis fisiológicas relacionadas à performance no exercício e modificações

nas respostas neuro-hormonais à atividade física, concluíram que a piora destas variáveis após períodos de inatividade dependem do grau de treinamento físico prévio, sendo mais pronunciada nos atletas.

A análise da carga no limite máximo (CLM) mostrou que o grupo TI apresentou valor médio estatisticamente menor do que C ($p<0,01$) e T ($p<0,001$). O mesmo comportamento foi observado quando comparamos os grupos SI com o C ($p<0,001$) e o S ($p<0,001$). Isto mostrou que, tanto nos animais treinados quanto nos sedentários, a imobilização influenciou negativamente também esta propriedade.

Comparando os grupos TI com SI, verificamos que TI apresentou valor estatisticamente maior que SI ($p<0,05$). Desta forma, percebemos que o treinamento prévio à imobilização foi capaz de manter a CLM dos músculos gastrocnêmios em valores superiores aqueles dos animais sedentários.

Appell (1986, 1990) demonstrou que mesmo curtos períodos de treinamento antes da imobilização podem ser vantajosos em prevenir o músculo de uma atrofia severa.

Topp et al. (2002) relataram que uma possível vantagem do incremento da atividade física antes da imobilização é que o treinamento do indivíduo pode fazer com que a atrofia muscular comece em um grau maior de força muscular absoluta do que no indivíduo não treinado, conservando, portanto, maior força no período de imobilização.

Estudando a propriedade de rigidez, verificamos haver diferença estatística entre T e TI ($p<0,05$), com redução da rigidez em TI. Apesar desta perda da propriedade em questão de TI em relação a T, não houve diferença entre o grupo C e o TI. Este achado foi bastante importante, pois mostrou que o treinamento prévio à imobilização foi capaz de manter a rigidez em valores médios semelhantes ao Controle.

Relacionando este resultado com as observações de Järvinen et al. (1992), podemos sugerir que a preservação da propriedade de rigidez dos músculos após a imobilização nos animais treinados poderia estar diminuindo a susceptibilidade a lesões. Ou seja, os animais submetidos à exercitação regular previamente ao período de imobilização estariam correndo menos risco de ter lesões, já que o valor médio da propriedade de rigidez se manteve em valores semelhantes ao Controle.

Comparando os correspondentes grupos sedentários, verificamos haver diferença estatística significativa na rigidez dos grupos C e SI ($p < 0,05$), sendo que os valores médios foram menores em SI. Quando comparamos os grupos S e SI, não foi encontrada diferença estatística.

O fato de TI apresentar diferença em relação a T e SI não se comportar da mesma maneira em relação a S, pode se dever ao fato de os animais do grupo TI estarem sendo submetidos a estímulos mecânicos maiores do que o SI, previamente à imobilização.

Smorawinski et al. (2001) afirmaram que o grau de redução de atividade física habitual em decorrência de inatividade é certamente maior em atletas do que em indivíduos sedentários.

Desta forma, sugerimos que a diminuição mais acentuada da demanda funcional dos animais que treinaram em relação àqueles que eram mantidos sedentários antes da imobilização influenciou a propriedade de rigidez.

Além disto, é importante ressaltar que reduções na rigidez de músculos imobilizados devem ser levadas em consideração no processo de reabilitação a fim de evitarmos complicações resultantes de sobrecarga muscular (CARVALHO; SHIMANO; VOLPON, 2002).

Não foi observada diferença entre TI e SI. Da mesma forma que ocorreu com a propriedade de CLP, os animais do grupo SI partiram de uma condição inicial da propriedade de rigidez pior do que os do grupo TI. Nota-se que os últimos tiveram maior perda absoluta desta propriedade mecânica em decorrência do período de imobilização.

De maneira geral, o treinamento prévio à imobilização demonstrou benefícios quanto às propriedades mecânicas musculares. Segundo Michael (2000), a melhor estratégia é a prevenção: se um músculo é mantido ativo, as lesões e perdas decorrentes de inatividade são menos prejudiciais ao tecido.

Em nossa pesquisa, constatamos que o período de 1 semana de imobilização gessada foi suficiente para provocar perda das propriedades mecânicas do músculo gastrocnêmio. Este achado confirma os trabalhos que relatam que o tecido muscular é muito sensível a atrofia, mesmo em curtos períodos de desuso, como em uma semana (APPEL, 1986, 1990; KANNUS; JARVINEN, 1990).

Neste trabalho, também foi possível observar os benefícios da reabilitação no que se refere às propriedades mecânicas musculares. Assim como em nossa pesquisa, outros estudos demonstraram que as alterações decorrentes da imobilização de um músculo são, em grande parte, reversíveis quando a remobilização é intensificada com treinamento físico (APPEL, 1986; KANNUS et al. 1998; PATTISON et al., 2003; TAKANASHI, 1992).

Observamos que o grupo TIR apresentou valor médio de CLP estatisticamente maior que o TI ($p < 0,001$) e menor que o grupo T ($p < 0,05$). Quando comparamos os grupos TIR e C, não houve diferença nesta propriedade.

Isto mostra que a reabilitação, apesar de acelerada, foi eficiente neste caso, pois, além de TIR ter aumentado a CLP em relação a TI, recuperou a propriedade de CLP em relação ao grupo Controle.

Quanto à CLP, SIR assumiu valor estatisticamente inferior a C ($p < 0,001$), porém não houve diferença ao compará-lo com S. Ao comparamos SIR com SI, não houve diferença estatística, apesar de observarmos tendência de o primeiro grupo assumir valores maiores que o segundo, sendo de 15,44% a diferença percentual.

Assim, a reabilitação recuperou a CLP dos animais previamente sedentários a valores semelhantes aos do grupo Sedentário, porém inferiores ao Controle.

Ainda em relação a esta propriedade, verificamos que TIR apresentou valor médio estatisticamente maior que SIR ($p < 0,01$). Isto sugere que a experiência do treinamento físico prévio teve influência na melhora da resposta à reabilitação pós-imobilização desta propriedade.

Estabelecendo um elo com o resultado da comparação entre TI e SI para esta propriedade, sugerimos que, apesar de não ter havido diferença estatística entre estes dois grupos, alguma adaptação persistiu nos animais previamente treinados, pois estes tiveram melhor resposta ao mesmo protocolo de reabilitação. A análise mecânica realizada provavelmente não teve sensibilidade para detectar tal alteração.

Ao analisarmos a propriedade mecânica de carga no limite máximo (CLM), TIR apresentou valor médio estatisticamente maior que TI ($p < 0,01$), porém menor que T ($p < 0,001$). Não houve diferença estatística entre

os grupos C e TIR. Isto mostra que a reabilitação foi eficiente na recuperação desta propriedade, pois, além do TIR ter aumentado a CLM em relação a TI, a reabilitação recuperou a CLM a um valor estatisticamente igual ao do grupo Controle.

Em relação aos correspondentes grupos sedentários, podemos observar que a reabilitação foi eficiente em aumentar a CLM do grupo SIR em relação ao SI ($p < 0,01$). Porém, ao contrário de TIR, o grupo SIR não conseguiu recuperar esta propriedade nem em relação a C ($p < 0,001$), nem a S ($p < 0,05$).

Desta forma, verifica-se certo benefício da reabilitação no comportamento desta propriedade, porém inferior ao resultado alcançado nos animais que tinham a experiência prévia de treinamento com natação.

Michael (2000), em uma revisão bibliográfica, relatou que a noção de integridade muscular é apresentada em vários estudos. Ou seja, mesmo quando enfraquecido por atrofia, o músculo esquelético preserva seu padrão organizacional. Isto sugere que mecanismos protetores possibilitam a sua plasticidade sem perda da estrutura básica.

Kasper e Xun (1996) observaram que o número de núcleos dos miócitos permanece constante durante a atrofia, mesmo quando o volume celular diminui.

Estes achados embasariam a idéia de que a matéria prima tende a ser preservada para futuras mudanças nas demandas funcionais (MICHAEL, 2000).

Na comparação entre TIR e SIR não foi observada diferença estatística significativa, apesar de o valor médio da CLM do primeiro ser maior que o do segundo. Assim, o treinamento prévio, comparado ao sedentarismo, pareceu ter favorecido menos a melhor resposta desta propriedade.

Observando a propriedade mecânica de rigidez, verificamos que TIR apresentou valor estatisticamente maior que TI ($p < 0,05$), demonstrando a eficiência da reabilitação no grupo previamente treinado quanto à essa propriedade. Outro dado que reforça esta afirmação é o fato de TIR não ter apresentado diferença estatística tanto quanto a C, como a T. Assim, a propriedade foi recuperada a valores basais.

Já em relação aos correspondentes grupos sedentários, foi diferente a influência exercida na propriedade de rigidez. Não houve diferença

estatística significativa entre SIR e os grupos SI, C e S. Apesar do resultado estatístico, nota-se uma certa tendência de a reabilitação ter influenciado positivamente esta propriedade do músculo gastrocnêmio, já que o valor médio de SIR tendeu a ser maior que S e SI.

Ainda no que se refere a esta propriedade, observamos comportamento semelhante ao da CLP quando comparamos TIR com SIR, sendo que o primeiro apresentou valor médio estatisticamente maior do que segundo ($p < 0,05$).

Este resultado sugere que a experiência de treinamento físico prévio também influenciou a melhor resposta à reabilitação pós-imobilização desta propriedade, pois recuperaram-se melhor com o mesmo protocolo de reabilitação.

Apesar de não ter havido diferença estatística entre os grupos TI e SI, provavelmente houve persistência de adaptações nos animais previamente treinados durante o período de imobilização, já que estes tiveram melhor resposta à reabilitação quando comparados aos correspondentes sedentários. É possível que a análise mecânica realizada não tenha tido sensibilidade para detectar tais alterações.

Analisando os resultados de nosso trabalho, sugerimos que o melhor comportamento mecânico dos músculos das ratas treinadas pode ser consequência de uma condição inicial mais favorável.

O estudo das propriedades mecânicas dos materiais biológicos é importante e necessário, pois a melhora destas propriedades é um objetivo a ser atingido no tratamento e reabilitação de diferentes patologias do sistema locomotor, bem como na melhora do desempenho em diversas atividades esportivas.

Essas informações (prevenção da atrofia decorrente da imobilização e sua influência positiva no processo de reabilitação) são fundamentais para que os fisioterapeutas e demais profissionais envolvidos na reabilitação dos problemas músculo-esqueléticos tenham embasamento científico para aplicar diferentes métodos preventivos (KANNUS et al., 1992b).

6 CONCLUSÃO

- A análise mecânica mostrou haver alterações decorrentes tanto da atividade física regular (natação), como do sedentarismo. A natação foi eficiente na melhora das propriedades mecânicas do músculo gastrocnêmio. Da mesma forma, o modelo de sedentarismo apresentado também influenciou o tecido muscular esquelético, causando piora das propriedades analisadas.

- Houve perda das propriedades mecânicas em decorrência da imobilização tanto nos animais treinados como nos sedentários. Em valores absolutos, os animais treinados apresentaram perda mais acentuada das propriedades mecânicas musculares. Porém, o treinamento exerceu influência positiva na CLM, havendo maior preservação desta propriedade mecânica nos músculos das ratas treinadas em comparação àquelas mantidas sedentárias.

- O protocolo de reabilitação aquática proposto foi eficiente em melhorar as propriedades mecânicas do músculo gastrocnêmio, tanto dos animais treinados como dos sedentários. Porém, os animais previamente treinados apresentaram resultado final mais satisfatório do que os sedentários.

REFERÊNCIAS

ANSVED, T. (1995). Effects of immobilization on the rat soleus muscle in relation to age. *Acta Physiologica Scandinavica*, Stockholm, v.154, n.3, p.291-302, Jul.

APPELL, H. J. (1986). Morphology of immobilized skeletal muscle and the effects of a pre and postimmobilization training program. *International Journal of Sports Medicine*, Stuttgart, v. 7, n.1, p. 6 – 12.

APPELL, H.J. (1990). Muscular atrophy following immobilization. A review. *Sports Medicine*, Aukland, v. 10, n. 1, p. 42 – 58.

APPELL, H.J. (1997). The muscle in the rehabilitation process. *Orthopade*, Berlin, v. 26, n. 11, p. 930 – 934, Nov.

ASMUSSEN, G.; SOUKUP, T. (1991). Arrest of developmental conversion of type II to type I fibers after suspension hypokinesia. *The Histochemical Journal*, London, v. 23, p. 312 – 322.

BARBOSA, T. (2004). Introdução à Biomecânica. Disponível em: <<http://www.ipb.pt/~barbosa/biomecanica/introducao.htm>>. Acesso em 09 set. 2004.

BECKER, B. E. (2000). Princípios físicos da água. In: RUOTI, R. G.; MORRIS, D. M.; COLE, A. J. *Reabilitação Aquática*. 1ª ed. São Paulo: Manole. Cap 2, p. 17 – 26.

BLOOMFIELD, S. A. (1997). Changes in musculoskeletal structure and function with prolonged bed rest. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, Madison, v. 29, n. 2, p. 197 – 206.

BOTVIN, J. G. et al. (1975). Mobilization of a patient with progressive neuromuscular disease and lower extremity fractures. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, Chicago, v. 56, n. 7, p.317 – 319.

BOOTH, F. W. (1977). Time course of muscular atrophy during immobilization of hindlimbs in rats. *Journal of Applied Physiology*, Bethesda, v. 43, p. 656- 661.

BOOTH, F. W. (1978). Regrowth of atrophied skeletal muscle in adult rats after ending immobilization. *Journal of Applied Physiology*, Bethesda, v. 44, n. 2, p. 225 – 230.

BOOTH, F. W. (1987). Physiologic and biochemical effects of immobilization on muscle. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, Philadelphia, v. 219, p. 15 - 20.

BOOTH, F. W.; KELSO, J. R. (1973). Protection of rat muscle atrophy by cast fixation. *Journal of Applied Physiology*, Bethesda, v. 34, p. 404-406, March.

BOOTH, F. W.; SEIDER, M. J. (1979). Early change in skeletal muscle protein synthesis after limb immobilization of rats. *Journal of Applied Physiology*, Bethesda, v. 47, p. 974 – 977.

BOOTH, F. W., THOMASON, D. B. (1991). Molecular and cellular adaptation of muscle in response to exercise: perspectives of various models. *Physiological reviews*, Washington, v. 71, p. 541 – 585.

BUCKWALTER, J. A.; GRODZINSKI, A. J. (1999). Loading of healing bone, fibrous tissue and muscle: implications for orthopaedic practice. *Journal American Academy Orthopaedics Surgery*, Boston, v. 7, n. 5, p. 291–299, Sept/Oct.

BUCKWALTER, J. A.; WOO S. L. Y.; GOLDBERG, V. M. (1993) Soft-tissue aging and musculoskeletal function. *Journal of Bone and Joint Surgery - American*, Boston, v. 75, p. 1533 – 1548.

BUSCHBACHER, R. M. (2000). Desconditioning, conditioning and the benefits of exercise. In: BRADDOM, R. L., *Physical Medicine and Rehabilitation*. 2^{ad} ed. Philadelphia, Pa: WBSaunders, Co., p. 687 – 705.

CAIOZZO, V. J. (2002). Plasticity of skeletal muscle phenotype: mechanical consequences. *Muscle & Nerve*, New York, v. 26, n. 6, p. 740–768, Dec.

CARVALHO, C. M. M. (2001). *Efeitos da imobilização e do exercício físico em algumas propriedades mecânicas do músculo esquelético*. 57p. Dissertação (mestrado) – Programa Interunidades em Bioengenharia EESC/FMRP/IQSC, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 2001.

CARVALHO, C. M. M.; SHIMANO, A. C.; VOLPON, J. B. (2002). Efeitos da imobilização e do exercício físico em algumas propriedades mecânicas do músculo esquelético. *Revista Brasileira de Engenharia Biomédica*, Rio de Janeiro, v. 18, n. 2, p.65 – 73.

CARVALHO, L. C. et al. (2002). Estudo das propriedades mecânicas do músculo gastrocnêmio de ratas imobilizadas e reabilitadas com estimulação elétrica neuromuscular. *Revista Brasileira de Fisioterapia*, São Carlos, p.29, Suplemento. Apresentado ao XI Simpósio de Fisioterapia da UFSCar, São Carlos, 2002.

CARVALHO, L. C. (2004). *Estimulação elétrica neuromuscular e alongamento passivo manual na recuperação das propriedades mecânicas do músculo gastrocnêmio imobilizado*. Dissertação (mestrado) – Programa Interunidades em Bioengenharia EESC/FMRP/IQSC, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 2004.

COOPER, R. R. (1972). Alterations during immobilization and regeneration of skeletal muscle in cats. *Journal of Bone and Joint Surgery*, Boston, v. 54, p. 919 – 953.

DESPLANCHES, D. et al. (1987). Effect of spontaneous recovery of retraining after hindlimb immobilization. *Journal of Applied Physiology*, Bethesda, v. 63, p. 1739 – 1743.

ERIKSSON, E. (1981). Rehabilitation of muscle function after sports injury – major problem in sports medicine. *International Journal of Sports Medicine*, Stuttgart, v. 6, p. 1 – 6.

FITTS, R. H., BRIMMER, C. J. (1985). Recovery in skeletal muscle contractile function after prolonged hindlimb immobilization. *Journal of Applied Physiology*, Bethesda, v. 59, p. 616 – 923.

FRATESCHI, M. E. B. J. M. (2002). *Efeitos da imobilização e remobilização em algumas propriedades mecânicas do osso*. 59 p. Dissertação (Mestrado) – Programa Interunidades em Bioengenharia EESC/FMRP/IQSC, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 2002.

FUNG, Y. C. (1993). Introduction: a sketch of the history and scope of the field. In: FUNG, Y.C. *Biomechanics: mechanical properties of living tissues*. 2nd ed. New York: Springer-Verlag, Cap. 1, p.1-22.

FOWLES, J. R.; SALE, D. G.; MACDOUGAL, J. D. (2000). Reduce strength after passive stretch of the human plantar flexors. *Journal of Applied Physiology*, Bethesda, v. 89, n. 3, p. 1179 - 1188.

GALLANI, M. C. B. J.; AZEVEDO, J. R. M.; SAMPAIO BARROS, M. M. (1997). Interação entre exercício físico e suplementação de ácido ascórbico sobre a histamina tecidual do músculo esquelético e cardíaco de cobaias sedentárias e treinadas. *Revista Paulista de Educação Física*, São Paulo, v.11, n. 2, p. 134-41, Jul / Dez.

GLASS, D. J. (2003). Signaling pathways that mediate skeletal muscle hypertrophy and atrophy. *Nature Cell Biology*, v. 5, p. 87–90.

GOBATTO, C. A. et al. (1991). Efeitos da desnutrição protéico-calórica e do treinamento físico na produção de ácido láctico em ratos machos adultos após

teste de cargas progressivas. Resultados preliminares. *Ciência e Cultura*, São Paulo, v. 43, p. 725 – 726.

GOBATTO, C. A. et al. (2001). Caracterização da intensidade do exercício e do efeito do treinamento físico no modelo de natação de ratos Wistar. *Motriz*, v. 7, n. 1, p. 57 – 62, Supl.

GOLDSPINK, G. (1998). Selective gene expression during adaptation of muscle in response to different physiological demands. *Comparative Biochemistry and Physiology*, London, Part b 120, p. 5 – 15.

GOULD III, J.A. (1993). Biomecânica básica na terapia esportiva e ortopédica, In: GOULD III, J.A. *Fisioterapia na ortopedia e na medicina do esporte*. São Paulo: Manole, p. 3 – 83.

GUYTON, A. C.; HALL, J. E. (1998). *Fisiologia humana e mecanismos das doenças*. 6° ed, Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, Cap 6, p. 53 – 64.

HALL, S. J. (1991). *Biomecânica Básica*. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan.

HIKKINEN, E.; VOURI, I. (1972). Effect of physical activity on the metabolism of collagen in aged mice. *Acta Physiologica Scandinavica*, Stockholm, v. 84, p. 543 – 549.

HAUSCHKA, E. O.; ROY, R. R.; EDGERTON, R. V. (1987). Size and metabolic properties of single muscle fibers in rat soleus after hindlimb suspension. *Journal of Applied Physiology*, Bethesda, v. 62, p. 2338 – 2347.

HERBISON, G. J.; JAWEED, M. M.; DITTUNO, J. F. (1978). Muscle fiber atrophy after cast immobilization in the rat. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, Chicago, v. 59, n. 7, p. 301 – 305.

HERBISON, G. J.; JAWEED, M. M.; DITTUNO, J. F. (1984). Recovery of reinnervating rat muscle after cast immobilization. *Experimental Neurology*, New York, v. 85, n. 2, p. 239 – 248.

HIKKINEN, E.; VOURI, I. (1972). Effect of physical activity on the metabolism of collagen in aged mice. *Acta Physiologica Scandinavica*, Stockholm, v. 84, p. 543 – 549.

HOUSTON, M. E., BENTZEN, M. H., LARSEN, H. (1979). Interrelationships between skeletal muscle adaptations and performance as studied by detraining and retraining. *Acta Physiologica Scandinavica*, Stockholm, v. 105, p. 163 – 170.

INSTITUTE FOR LABORATORY ANIMAL RESEARCH (1996). *Guide for the care and use of laboratory animals*: Disponível em : <<http://www.nap.edu/readingroom/books/labrats/>>. Acesso em 08 set. 2004.

IRION, J. M. (2000). Panorama histórico da reabilitação aquática. In: RUOTI, R. G.; MORRIS, D. M.; COLE, A. J. *Reabilitação Aquática*. 1ª ed. São Paulo: Manole. Cap 1, p. 3 – 14.

ISHIHARA, A. et al. (2004). Effects of running exercise during recovery from hindlimb unloading on soleus muscle fibers and their spinal motoneurons in rats. *Neuroscience Research*, Ireland, v. 48, p. 119-127

JACKMAN, R. W.; KANDARIAN, S. C. (2004). The molecular basis of skeletal muscle atrophy. *Am J Physiol Cell Physiol*, v. 287, p. 834 – 843, Oct.

JÄRVINEN, M. J. (1977). Immobilization effect on the tensile properties of striated muscle: an experimental study in the rat. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, Chicago. v. 58, n. 3, p. 123-127, Mar.

JÄRVINEN, M. J.; EINOLA, S. A.; VIRTANEN, E. O. (1992). Effect of the position of immobilization upon the tensile properties of the rat gastrocnemius muscle. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, Chicago. v. 73, n. 3, p. 253-257, Mar.

JÄRVINEN, M. J.; LEHTO, M. U. K. (1993). The effects of early mobilization and immobilization on the healing process following muscle injuries. *Sports Medicine*, Auckland, v. 15, n. 2, p. 78 – 89, Feb.

JÄRVINEN, M. J.; EINOLA, S. A.; VIRTANEN, E.O. (1998). Effect of the position of immobilization upon the tensile properties of the rat gastrocnemius muscle. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, Copenhagen, v. 8, n. 3, p. 160 – 171, Jun.

JÄRVINEN, T. A. H. et al. (2002). Organization and distribution of intramuscular connective tissue in normal and immobilized skeletal muscles – An immunohistochemical, polarization and scanning electron microscopic study. *Journal of Muscle Research and Cell Motility*, Netherlands, v. 23, p. 245 – 254.

JOZSA, L. et al. (1990). The effect of tenotomy and immobilization on intramuscular connective tissue: a morphometric and microscopic study in rat calf muscles. *Journal of Bone and Joint Surgery - Br*, London, v. 72, p. 293 – 297.

KANNUS, P.; JÄRVINEN, M. (1990). Nonoperative treatment of acute knee ligament injuries. A review with special reference to indications and methods. *Sports Medicine*, Aukland, v. 9, p. 244 – 260.

KANNUS, P. et al. (1992a). The effects of training, immobilization and remobilization on musculoskeletal tissues. Training and immobilization. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, Copenhagen, v. 2, p. 100 – 118.

KANNUS, P. et al. (1992b). The effects of training, immobilization and remobilization on musculoskeletal tissues. Remobilization, and prevention, atrophy. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, Copenhagen, v. 2, p. 164 – 176.

KANNUS, P. et al. (1998). Free mobilization and low- to high- intensity exercise in immobilization- induced muscle atrophy. *Journal of Applied Physiology*, Bethesda, v. 84, n. 4, p. 1418-1424.

KARPAKKA, J. et al. (1990). The effects of preimmobilization training and immobilization on collagen syntesis in rat skeletal muscle. *International Journal of Sports Medicine*, Stuttgart, v. 11, n. 6, p. 484 – 488, Dec.

KASPER, C. E. (1995). Sarcolemmal disruption in reloaded atrophic skeletal muscle. *Journal of Applied Physiology*, Bethesda, v. 79, n. 2, p. 607 – 614.

KASPER, C. E.; XUN, L. (1996). Cytoplasm-to-myonucleus ratio in plantaris and soleus muscle fibers following hindlimb suspension. *J Muscle Res Cell Motility*, v. 17, p. 603 - 610.

KASPER, C. E.; MAXWELL, L. C.; WHITE, T. P. (1996). Alterations in skeletal muscle related to short-term impaired physical mobility. *Research in Nursing & Health*, New York, v. 19, n.2, p. 133 – 142.

KOKUBUN, E. (1990). *Interações entre o metabolismo de glicose e ácidos graxos livres em músculos esqueléticos*. 105p. Tese (Doutorado) – Instituto de Ciências Biomédicas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1990.

LARA, M. A. P. (2003). *Algumas propriedades mecânicas do músculo gastrocnêmio de ratas submetidas a um modelo de hipotatividade e tratadas com exercício*. 102p. Dissertação (Mestrado) – Programa Interunidades em Bioengenharia EESC/FMRP/IQSC, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 2003.

LARSEN, N. P.; FORWOOD, M. R.; PARKER, A. W. (1987). Immobilization and retraining of cruciate ligaments in the rat. *Acta Orthopaedica Scandinavica*, v. 58, p. 260 – 264.

LINDHOLM, T. S., THOMAS, V. T. (1976). The effect of remobilization of the extremity of the adult rat after short-term immobilization in a plaster cast. *Acta Chirurgica Scandinavica. Supplementum*, Stockholm, v. 467, p. 36 – 39.

LINARDI, M. (1992). *Estudo da sensibilidade aos efeitos cronotrópico e inotrópico das catecolaminas em átrios isolados de ratos submetidos a treinamento físico*. 67p. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Biologia, Departamento de Fisiologia e Biofísica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1992.

LUCIANO, E. et al. (2002). Endurance training improves responsiveness to insulin and modulates insulin signal transduction through the phosphatidylinositol 3-kinase/ Akt-1 pathway. *European Journal of Endocrinology / European Federation of Endocrine Societies*, Oslo, v. 147, p. 149 – 157.

MAX, S. R.; MAIER, R. F.; VOGELSANG, L. (1971). Lysosomes and disuse atrophy of skeletal muscle. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, New York, v. 146, p. 227 – 232.

MCDONALD, K. S.; FITTS, R. H. (1995). Effect of hindlimb unloading on rat soleus fiber force, stiffness, and calcium sensitivity. *Journal of Applied Physiology*, Bethesda, v. 79, p. 1796 – 1802.

MEDEIROS, A. et al. (2000). Efeito do treinamento físico com natação sobre o sistema cardiovascular de ratos normotensos. *Revista Paulista de Educação Física*, v. 14, n. 1, p. 7-15.

MERCIER, J. et al. (1999). Muscle plasticity and metabolism: effects of exercise and chronic diseases. *Molecular Aspects of Medicine*, Oxford, v. 20, p. 319 – 373.

MICHAEL, K. (2000). Relationship of skeletal muscle atrophy to functional status: a systematic research review. *Biological Research for Nursing*, v. 2, n. 2, p. 117-131, Oct.

MINAMOTO, V. B.; SALVINI, T. F. (2001). O músculo como um órgão de secreção hormonal regulado pelo estímulo mecânico. *Revista Brasileira de Fisioterapia*, São Carlos, v. 5, n. 2, p. 87 – 94.

MUJIK, I.; PADILLA, S. (2001). Muscular characteristics of detraining in humans. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, Madison, v. 33, n. 8, p. 1297 – 1303, Aug.

MUSACCHIA, X. J.; STEFFEN, J. M.; FELL, R. D. (1988). Disuse atrophy of skeletal muscle: animal models. *Exercise and Sports Science Reviews*, Philadelphia, v. 16, p. 61 – 87.

NICKS, D. K. et al. (1989). Muscle fiber size and number following immobilization atrophy. *Journal of Anatomy*, London, v. 136, p. 1 – 5.

OLIVEIRA, F. B. (2004). *O ultra-som terapêutico adicionado à imobilização gessada nas propriedades mecânicas reparação muscular pós-trauma por mecanismo de impacto*. 126p. Dissertação (mestrado) – Programa Interunidades em Bioengenharia EESC/FMRP/IQSC, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 2004.

OSTMAN – SMITH, I. (1979). Adaptative changes in the sympathetic nervous systems in some effector organs of the rat following long term exercise or cold acclimation and the role of cardiac sympathetic nerves in the genesis of compensatory cardiac hypertrophy. *Acta Physiologica Scandinavica*, Stockholm, p. 1-40, Suppl. 477.

PACHIONI, C. A. S. (1996). *Lesão por estiramento do músculo soleus: estudo experimental em ratos*. 60p. Dissertação (Mestrado) – Programa Interunidades em Bioengenharia EESC/FMRP/IQSC, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto. 1996.

PATTISON, J. S. et al. (2003). Selected contribution identification of differentially expressed genes between young and old rat soleus muscle during recovery from immobilization induced atrophy. *Journal of Applied Physiology*, Bethesda, v. 95, p. 2171 – 2179, Nov.

PERES, S. B.; LUCIANO, E. (1995). Influência de esteróide anabólico (Deca-durabolin) sobre o metabolismo de ratos submetidos ao treinamento físico. *Motriz*, v. 20.

PESSAN, V. J. G. (1996). *Ensaio de flexão em três pontos nas faces anterior e posterior de fêmures de ratas, em duas fases diferentes de crescimento*. 42p. Dissertação (Mestrado) – Programa Interunidades em Bioengenharia EESC/FMRP/IQSC, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 1996.

PIKO, B. (2000). Health-related predictors of self-perceived health in a student population: the importance of physical activity. *Journal of Community Health*, New York, v. 25, n. 2, p. 25 – 1437.

RAMOS, R. S. (1979). Biomecânica. Conceito atual. *Revista Brasileira de Ortopedia*, Belo Horizonte, v. 14, n. 4, p. 141 – 143.

ROCHA, M. A. (1998). *Ensaio mecânico da região epifísio-metáfisária: estudo experimental em fêmures de coelhos em crescimento*. 77p. Tese (Doutorado) – Faculdade de Medicina de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 1998.

RUSSELL, B.; MOTLAGH, D.; ASHLEY, W. W. (2000). Forms follows function: how muscle shape is regulated by work. *Journal of Applied Physiology*, Bethesda, v. 88, p. 1127-1132.

SALTER, R. B. (2001). *Distúrbios e lesões do sistema musculoesquelético*. 3ª ed., São Paulo: MEDSI. Cap. 2, p. 23 – 25.

SAMPAIO BARROS, M. M. et al. (1995). Dosagem histamínica muscular de ratos exercitados, *Revista Paulista de Educação Física*, v. 9, n. 1, p. 3 – 9.

SEDLIN, E. D.; HIRSCH, C. (1996). Factors affecting the determination of the physical properties of femoral cortical bone. *Acta Orthopaedica Scandinavica*, v. 37: p. 29-48.

SHIMANO, A. C.; SHIMANO, M. M. (2000). Ensaio tecnológicos de materiais biológicos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA BIOMÉDICA, 17., 2000, Florianópolis. *Anais...* Santa Catarina: Sociedade Brasileira de Engenharia Biomédica. p.15-20.

SMORAWINSKI, J. et al. (2001). Effects of 3-day bed rest on physiological responses to graded exercise in athletes and sedentary men. *Journal of Applied Physiology*, Bethesda, v. 91, p. 249-257,

SOUZA, S. A. (1977). *Ensaio mecânicos de materiais metálicos*. 3.ed. São Paulo: Edgard Blücher.

STEVENS, J. E. et al. (2004). Muscle Adaptations with Immobilization and Rehabilitation after Ankle Fracture. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, Madison, v. 36, n. 10, p. 1695-1701, Oct.

TAKANASHI, G. (1992). Effect of endurance training on the composition of fiber types and myosin light chains in muscles under disuse atrophy. *Nippon Seikeigeka Gakkai Zasshi*, Tokyo, v. 66, n. 1, p. 92 – 101, Jan.

THEIN, L.; MCNAMARA, C. (2000). Reabilitação aquática de pacientes com disfunções musculoesqueléticas das extremidades. In: RUOTI, R.G.; MORRIS, D.M.; COLE, A. J. *Reabilitação Aquática*. 1 ed. São Paulo: Manole. Cap 5, p. 67 – 93.

THOMPSON, L. V. (2002). Skeletal muscle adaptations with age, inactivity, and therapeutic exercise. *J Orthop Sports Phys Ther*, v. 32, n. 2, p. 44-57, Feb.

TIERNEY, T. (2000). Reabilitação aquática do atleta. In: RUOTI, R. G.; MORRIS, D. M.; COLE, A. J. *Reabilitação Aquática*. 1 ed. São Paulo: Manole. Cap 12, p. 233 – 248.

TOPP, R. et al. (2002). The effect of bed rest and potential of Prehabilitation on patients in the intensive care unit. *AACN Clinical Issues*, Hagerstown, v.13, n.2, p.263-276, May.

VIEIRA, R.; HAEBICH, H.; KOKUBUN, E.; HELL, N. S.; CURI, R. (1988). Swimming system for physical exercise of rats. *Arq Biol Tecnol*, v. 31, n.3, p. 387 – 394, Ago.

WITZMANN, F. A.; KIM, D. H.; FITTS, R. H. (1982). Hindlimb immobilization: length-tension and contractile properties of skeletal muscle. *Journal of Applied Physiology*, Bethesda, v. 53, n. 2, p. 335 – 345.

WILLS, C. A. et al. (1982). Effects of immobilization of human skeletal muscle. *Orthopaedic Review*, v.11, p. 57 – 64.

APÊNDICE

Propriedades mecânicas

As tabelas 4 a 10 apresentam as propriedades mecânicas de carga no limite de proporcionalidade (CLP), carga no limite máximo (CLM) e rigidez (R) dos gastrocnêmios dos animais dos grupos Controle (C), Treinado (T), Sedentário (S), Treinado-Imobilizado (TI), Sedentário-Imobilizado (SI), Treinado-Imobilizado-Reabilitado (TIR) e Sedentário-Imobilizado-Reabilitado (SIR), respectivamente.

Tabela 4 – Propriedades mecânicas do GRUPO 1 – Controle (C).

GRUPO 1 (C)	CLP (N)	CLM (N)	R ($\times 10^3 \text{N/m}$)
Animal 1	35,21	42,33	5,2359
Animal 2	35,21	42,26	4,7766
Animal 3	40,16	47,60	4,8915
Animal 4	37,69	44,93	5,0250
Animal 5	33,22	42,79	4,8023
Animal 6	39,17	46,76	5,3152
Animal 7	38,68	46,43	5,0270
Animal 8	40,16	45,06	4,6017
Animal 9	33,47	44,80	4,6222
Animal 10	36,45	46,63	5,2195
Média	36,94	44,96	4,9517
Desv.Pad.	2,61	1,95	0,2546

Tabela 5 – Propriedades mecânicas do GRUPO 2 – Treinado.

GRUPO 2	CLP (N)	CLM (N)	R (x10 ³ N/ m)
Animal 1	44,88	55,48	6,8721
Animal 2	40,66	48,97	4,9912
Animal 3	40,41	47,93	5,2671
Animal 4	38,43	48,97	4,7934
Animal 5	49,59	55,61	5,2892
Animal 6	37,44	51,90	5,0793
Animal 7	42,15	51,90	5,9263
Animal 8	37,44	46,43	4,9071
Animal 9	39,17	48,97	4,6606
Animal 10	35,70	44,74	5,3615
Média	40,59	50,09	5,3148
Desv.Pad.	4,11	3,60	0,6524

Tabela 6 – Propriedades mecânicas do GRUPO 3 – Sedentário.

GRUPO 3	CLP (N)	CLM (N)	R (x10 ³ N/ m)
Animal 1	30,99	46,04	3,2170
Animal 2	30,74	42,33	3,4209
Animal 3	35,95	42,92	4,4841
Animal 4	28,26	40,18	4,6506
Animal 5	33,97	41,55	4,3778
Animal 6	34,71	47,08	3,5320
Animal 7	28,51	41,29	3,1056
Animal 8	36,69	46,50	4,6520
Média	32,48	43,49	3,9300
Desv.Pad.	3,29	2,66	0,6712

Tabela 7 – Propriedades mecânicas do GRUPO 4 – Treinado-Imobilizado.

GRUPO 4	CLP (N)	CLM (N)	R (x10³N/ m)
Animal 1	25,66	34,84	4,7922
Animal 2	25,29	33,02	4,5055
Animal 3	27,31	41,81	4,2551
Animal 4	29,08	35,36	3,7000
Animal 5	27,89	37,18	4,8577
Animal 6	29,01	42,13	4,6837
Animal 7	32,91	41,09	4,6803
Animal 8	33,10	39,59	4,7504
Animal 9	29,08	35,10	4,6250
Animal 10	29,08	35,88	4,9888
Média	28,84	37,60	4,5839
Desv.Pad.	2,60	3,29	0,3692

Tabela 8 – Propriedades mecânicas do GRUPO 5 – Sedentário-Imobilizado.

GRUPO 2	CLP (N)	CLM (N)	R (x10³N/ m)
Animal 1	28,45	35,30	4,2813
Animal 2	29,75	31,65	4,7057
Animal 3	29,94	34,58	3,4630
Animal 4	21,76	28,46	4,0146
Animal 5	26,78	36,92	4,7706
Animal 6	25,66	36,92	4,0586
Animal 7	27,89	35,88	4,5993
Animal 8	22,50	30,41	4,0086
Animal 9	24,54	28,98	3,4586
Média	26,36	33,23	4,1511
Desv.Pad.	2,98	3,39	0,4886

Tabela 9 – Propriedades mecânicas do GRUPO 6 – Treinado-Imobilizado-Reabilitado.

GRUPO 2	CLP (N)	CLM (N)	R ($\times 10^3$ N/ m)
Animal 1	35,95	42,59	6,0658
Animal 2	38,02	45,06	5,1881
Animal 3	34,71	39,79	4,4125
Animal 4	35,74	42,59	5,2651
Animal 5	35,95	41,61	5,8530
Animal 6	32,02	40,90	6,1276
Animal 7	39,88	45,06	5,1396
Animal 8	32,02	39,79	4,0434
Animal 9	38,02	45,72	6,1355
Animal 10	36,57	40,57	5,3444
Média	35,89	42,37	5,3575
Desv.Pad.	2,51	2,24	0,7188

Tabela 10 – Propriedades mecânicas do GRUPO 7 – Sedentário-Imobilizado-Reabilitado.

GRUPO 2	CLP (N)	CLM (N)	R ($\times 10^3$ N/ m)
Animal 1	34,92	41,55	4,2082
Animal 2	27,07	36,99	4,3588
Animal 3	31,61	38,49	5,0469
Animal 4	29,13	37,58	4,7746
Animal 5	29,13	35,75	4,4223
Animal 6	33,47	41,35	4,9483
Animal 7	29,75	39,14	4,4176
Animal 8	28,51	39,01	4,6730
Animal 9	30,99	40,90	5,0018
Animal 10	29,75	37,12	4,2062
Média	30,43	38,79	4,6058
Desv.Pad.	2,37	1,99	0,3248

ANEXO

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Campus de Ribeirão Preto
Comissão de Ética no Uso de Animais

CERTIFICADO

Certificamos que o trabalho (Protocolo nº 04.1.374.53.4), intitulado: "Análise Biomecânica dos Efeitos da Imobilização e Reabilitação Aquática no Músculo Esquelético de Ratas Treinadas e Sedentárias", de autoria de **Juliana Goulart Prata de Oliveira**, por estar de acordo com os **Princípios Éticos na Experimentação Animal** adotado pela **Comissão de Ética no Uso de Animais (CEUA)** do *Campus* de Ribeirão Preto – USP, foi aprovado em reunião da CEUA de 11.05.2004.

Ribeirão Preto, 18 de maio de 2004

Presidente da CEUA
Prof. Dr. José Clóvis do Prado Junior

Secretária da CEUA
Maria Angélica S. Depiro