



Estudo de Caso

Case Study

Análise mecânica de máquinas de musculação: aplicação ao exercício de voador direto

Mechanical Analysis of Strength Training Machines: Application to the Pec Deck Exercise

Rodrigo Rico Bini^{§1} PhD

Recebido em: 14 de março de 2016. Aceito em: 13 de junho de 2016.
Publicado online em: 29 de setembro de 2016.

Resumo

Introdução: Estudos anteriores observaram a presença de polias excêntricas para exercícios visando o fortalecimento dos membros inferiores, no entanto, nenhum estudo até o momento avaliou as implicações da demanda de torque para os músculos flexores horizontais do ombro.

Objetivo: Quantificar a carga imposta a articulação glenoumeral durante o exercício de flexão horizontal realizado em máquinas de musculação.

Métodos: O presente estudo caracterizou-se como um ensaio teórico, visto que utilizou variáveis descritas na literatura juntamente com características antropométricas de um indivíduo fictício e características mecânicas das máquinas avaliadas. Foram comparadas duas máquinas, uma com uma polia excêntrica e outra com uma polia concêntrica, juntamente com o exercício de crucifixo deitado. Uma equação de equilíbrio de torques foi estabelecida assumindo que o torque realizado pelo executante (Torque da força humana) se equivale ao torque imposto pela máquina (Torque resistivo), utilizando um modelo de diagramas de corpo livre.

Resultados: A máquina com a polia excêntrica apresenta maiores valores de força humana comparada a máquina com a polia concêntrica e ao exercício de crucifixo. Ainda, a maior relação entre a força humana e a força resistiva e a menor relação entre a alavanca da força humana e a alavanca da força resistiva foram observadas para a máquina com a polia excêntrica.

Conclusão: Máquinas para a realização do exercício de voador direto com polias excêntricas e maiores alavancas para a força resistiva oferecem carga variada e não condizente com as propriedades musculares (força-comprimento), o que possivelmente resulta em demandas de força e adaptações distintas.

Palavras-chave: treinamento de força, articulação do ombro, lesões no ombro, biomecânica, relação força-comprimento.

Abstract

Introduction: Previous studies observed the existence of eccentric pulleys in lower limbs training machines, but no study to

Pontos-Chave Destaque

- A presença de polias excêntricas altera a demanda de torque.
- Modelos mecânicos permitem a identificação das demandas de torque.
- O raio das polias das máquinas não acompanha o torque muscular.

Keypoints

- Eccentric pulleys change torque requirements.
- Mechanical models enable de assessment of torque requirements.
- The radius of pulleys in machines do not follow muscular torque.

[§] Autor correspondente: Rodrigo Rico Bini – e-mail: bini.rodrigo@gmail.com
Afiliações: ¹Escola de Educação Física do Exército. Rio de Janeiro, Brasil.

date assessed the effects of force requirements for shoulder horizontal flexors.

Objective: Quantify the load at the glenoumeral joint during shoulder flexions performed in strength training machines.

Methods: The present study is characterized as a theoretical essay, given it uses variables from the literature associated with anthropometric measurements from a theoretical subject and mechanical measures from strength training machines. Two machines were compared, one with an eccentric pulley and another with a concentric pulley, along with a chest fly exercise performed in dorsal decubitus. A torque equilibrium equation was determined assuming that subject's torque would balance the torque offered by the machines, using free body diagrams.

Results: The machine with eccentric pulley presented larger human force compared to the machine with concentric pulley and to the chest fly exercise. In addition, the larger ratio between human force and resistive force and the smaller ratio between human moment arm and resistive force moment arm were observed for the machine with eccentric pulley.

Conclusion: Shoulder horizontal flexion training machines with eccentric pulleys and with larger resistive force moment arm lead to variable resistance and do not match muscle force-length relationship, which possibly lead to larger forces and changes in muscle adaptation.

Keywords: strength training, shoulder joint, shoulder injuries, biomechanics, force length relationship.

Análise mecânica de máquinas de musculação: aplicação ao exercício de voador direto

Introdução

O treinamento de força, ou treinamento resistido, é amplamente utilizado com o objetivo de melhora da função muscular por meio do ganho de massa muscular e força (1). Esta modalidade envolve a realização de exercícios contra resistências externas oferecidas por meio de pesos livres, máquinas ou implementos (e.g. cordas, faixas elásticas, etc.). A escolha de cada tipo de resistência possui efeito direto sobre a força muscular (2). Um exemplo deste efeito foi ilustrado por Folland e Morris (3), os quais observaram que máquinas utilizadas para a realização de exercícios de extensão de joelho não fornecem resistência mecânica similar à capacidade de produção de força muscular. Isto implica que o arranjo mecânico dos elementos que compõe a máquina não respeita as características do sistema muscular (4).

A escolha dos exercícios que ofertam uma maior sobrecarga para os músculos é determinante a fim de aperfeiçoar os ganhos de massa muscular (5). Durante o planejamento do treinamento de força, a escolha dos exercícios que serão realizados em cada etapa do treinamento permite definir prioridades entre os grupos musculares e o

ordenamento da sobrecarga muscular. No entanto, a sobrecarga articular envolve ainda características do movimento (e.g. ângulo de flexão do joelho) associadas a propriedades mecânicas da máquina. Nesta linha, Bini e colaboradores (6) observaram que uma máquina utilizada para a realização de exercícios de extensão do joelho resultava em demanda de torque variável ao longo da amplitude de movimento. Esta variação está relacionada à presença de uma polia excêntrica, a qual aumentava a demanda de torque à medida que os joelhos se aproximavam da extensão máxima.

Estudos anteriores também observaram a presença de polias excêntricas para exercícios visando o fortalecimento dos membros inferiores (3, 7, 8), no entanto, nenhum estudo até o momento avaliou as implicações da demanda de torque para os músculos flexores horizontais do ombro. Estes músculos são muito visados em exercícios como o supino, *cross-over* e o voador direto, no entanto, a articulação glenoumeral é altamente susceptível a lesões, principalmente quando esta se encontra em extensão horizontal associada a externa (9). Desta forma o objetivo do presente estudo foi quantificar a carga imposta a articulação glenoumeral

durante o exercício de flexão horizontal realizado em máquinas de musculação. Para isto, foi estimado o torque necessário para a realização do exercício em dois modelos de máquina, e comparados ao exercício de flexão horizontal realizado em decúbito dorsal com halteres. A escolha pelo exercício de crucifixo envolveu a utilização frequente deste no treinamento de força visando a hipertrofia dos flexores horizontais do ombro (10) e a possibilidade de modelamento das cargas utilizando modelos de diagrama de corpo livre.

Métodos

Desenho experimental

O presente estudo caracterizou-se como um ensaio teórico, visto que utilizou variáveis descritas na literatura juntamente com características antropométricas de um indivíduo fictício (170 cm de estatura e 70 kg de massa corporal) e características mecânicas das máquinas avaliadas, similar ao realizado em outros estudos (6, 8, 11). Estas informações permitiram a elaboração de

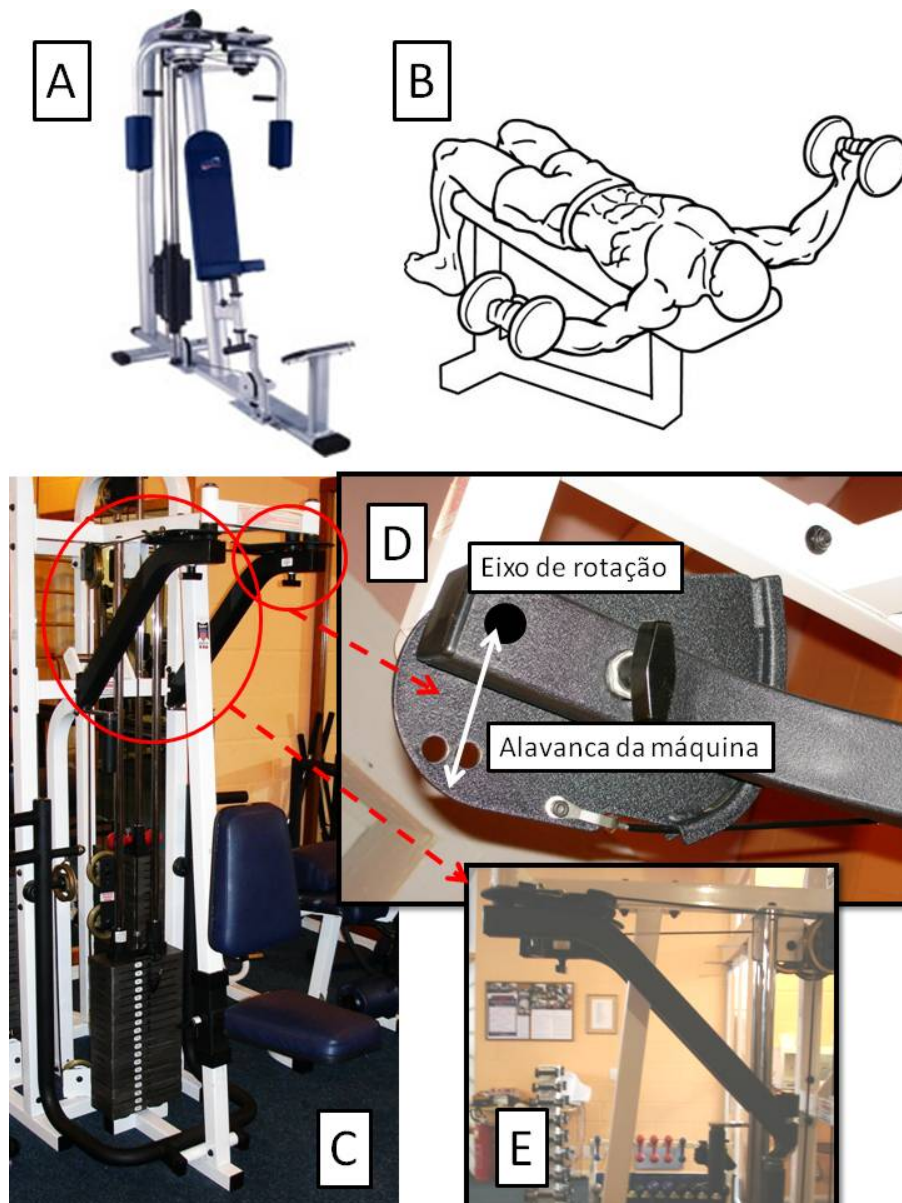


Figura 1 – Ilustração das máquinas para exercício de voador direto (Atrex - A e TuffStuff - C) e ilustração do exercício de crucifixo deitado (B). Destaque para a presença da polia excêntrica para a máquina TuffStuff (D) e para o arranjo dos pegadores desta (E).

modelos bi-dimensionais para a análise das forças e torques nos exercícios de flexão horizontal da articulação glenoumeral (Figura 1). Estas definições permitiram a realização do estudo sem o envolvimento de seres humanos, portanto sem a necessidade do consentimento do Comitê de Ética em Pesquisa com Seres Humanos da Universidade.

Coleta dos dados e definição do modelo

Para fins de ilustração do efeito da presença de polias excêntricas, foram comparadas duas máquinas, uma com uma polia excêntrica (TuffStuff, modelo training station, TuffStuff Inc., item C da Figura 1) e outra com uma polia concêntrica (Atrex, modelo TR2010, Righetto Fitness Equipment, item A da Figura 1). Para fins de obtenção das medidas mecânicas, foram mensuradas as distâncias entre o pegador de cada máquina e o eixo de rotação destas (vide item E da Figura 1). Para a máquina Atrex, foi considerada a distância entre a almofada onde o executante apoia os cotovelos e o eixo de rotação, sendo esta considerada a alavanca do executante. Adicionalmente, a distância entre a projeção do cabo de direcionamento da carga e o eixo de rotação (vide item E da Figura 1) foi mensurada em ambas as máquinas, sendo considerada a alavanca da máquina. Com isto, uma equação de equilíbrio de torques foi estabelecida ($\Sigma T = 0$) assumindo que o torque realizado pelo executante (Torque força humana) se equivale ao torque imposto pela máquina (Torque resistivo).

Para fins de comparação entre as máquinas e da comparação com o exercício de crucifixo deitado, foi estabelecido que uma carga de 5 kg seria aplicada em cada membro. Para as máquinas, esta carga gerou torque sobre o eixo de rotação da máquina proporcional a distância entre o cabo guia e o eixo de rotação (alavanca da máquina). Para o exercício de crucifixo, esta carga foi aplicada sobre a articulação glenoumeral por meio da distância da carga até o eixo estimado de rotação da articulação. Afim de simular uma situação prática de realização do exercício, foi estimado que o exercício foi realizado com o cotovelo com flexão de 20° em relação ao úmero (vide Figura 1 item B). Ainda, juntamente com a massa de 5 kg (simulando

um halter), a massa dos segmentos braço, antebraço e mão foram adicionados a equação de equilíbrio de torques para o exercício de crucifixo deitado. Os parâmetros relacionados a distribuição da massa de cada segmento e a localização estimada do centro de massa foram obtidas da literatura (12).

Análise de dados

Uma vez estimados os torques gerados pela coluna de pesos (para as máquinas), pelo halter e pela massa dos segmentos (para o exercício de crucifixo), o torque necessário pelo executante (Torque da força humana) foi obtido. Seguidamente, a força humana necessária foi estimada, utilizando o torque e a distância entre o ponto de aplicação da força humana e o eixo de rotação das máquinas (ou da articulação glenoumeral para o crucifixo). Para fins de comparação entre as máquinas e com o exercício de crucifixo, os valores de força humana, relação entre a força humana e a força resistiva, e relação entre as avalancas do executante e da máquina foram analisados em três instantes da amplitude de movimento (início, meio e fim).

Resultados

Na Tabela 1 são apresentados os resultados da força humana, relação entre a força humana (FH) e força resistiva (FR) e relação entre a alavanca da força humana (alavFH) e a alavanca da força resistiva (alavFR).

É possível perceber que a máquina TuffStuff apresenta maiores valores de força humana comparada a máquina Atrex e ao exercício de crucifixo. Ainda, a maior relação FH/FR e a menor relação alavFH/alavFR foram observadas para a máquina TuffStuff.

Discussão

O presente estudo teve como objetivo comparar a demanda de força durante a realização de exercícios de flexão horizontal da articulação glenoumeral realizados em máquinas de musculação com diferentes arranjos de seus componentes mecânicos. Uma máquina (TuffStuff) foi escolhida por possuir uma polia excêntrica, a qual modulava a alavanca (e conseqüentemente o torque) resistivo enquanto a outra possuía uma polia concêntrica. Estes aspectos se refletiram em

Tabela 1 – Força humana, relação entre a força humana (FH) e força resistiva (FR), relação entre a alavanca da força humana (alavFH) e a alavanca da força resistiva (alavFR)

	Atrex			TuffStuff			Crucifixo		
	Início	Meio	Fim	Início	Meio	Fim	Início	Meio	Fim
Força humana (kg)	1,15	1,15	1,15	4,13	7,64	8,68	4,70	2,11	0
Relação FH/FR (%)	23	23	23	83	153	174	94	42	0
Relação alavFH/alavFR (%)	218	218	218	61	33	29	100	100	100

valores crescentes para a força humana necessária para equalizar o torque resistivo. Isto implica que, para a mesma carga selecionada na coluna de pesos, o executante utilizando a máquina Tuffstuff, produz mais força próximo ao final da amplitude de movimento (máxima flexão horizontal). Este resultado implica ainda na imposição de maior carga aos flexores horizontais do ombro próximo ao menor comprimento muscular, o que se contrapõe a capacidade de força decorrente do comprimento muscular [menor força no máximo encurtamento (13)], podendo gerar adaptações da força muscular a comprimentos específicos dos músculos [maior força em menores comprimentos (14-16)].

Um segundo aspecto importante envolve a relação entre a carga selecionada na coluna de pesos (força resistiva) e a força realizada pelos flexores horizontais (força humana), a qual se apresentou aumentada para a máquina TuffStuff. Isto ocorre em função da maior alavanca da força resistiva comparada a alavanca disponível para a força humana (relação $\text{alavFH/alavFR} < 100\%$). A repercussão deste resultado é evidente uma vez que se observa que, para a máquina Tuffstuff, o executante precisa realizar no mínimo 4,13 kg no início do exercício para mover 5 kg da coluna de pesos. Ao final do movimento, a demanda de força tinge 8,68 kg devido à presença da polia excêntrica e a relação alavFH/alavFR . Diferentemente, para a máquina Atrex, a demanda de força (para a mesma carga de 5 kg) é de 1,15 kg ao longo de toda a amplitude de movimento. Nesta linha, o intercâmbio de máquina passa a ser altamente comprometido visto que a relação entre a força humana e a força resistiva destas

não é similar. Esta dificuldade no intercâmbio de exercícios se reflete ainda para o crucifixo, visto que a demanda de força é nula na maior flexão horizontal e superior às máquinas na maior extensão horizontal.

Ainda, o exercício de crucifixo apresentou decréscimo da força humana à medida que o movimento segue em direção à flexão horizontal, conforme esperado, devido à redução da alavanca das massas envolvidas (halter e massa dos segmentos) em relação ao eixo de rotação articular. Com isto, é possível verificar uma demanda máxima de força nos maiores comprimentos musculares, o que maximiza a contribuição dos componentes elásticos do tecido musculotendíneo (13). No entanto, se a carga deslocada for elevada, a posição inicial deste exercício (máxima extensão horizontal associada à rotação externa) posiciona a articulação em uma situação de risco para luxações (9).

Pontos fortes e limitações do estudo

O presente estudo foi o primeiro a modelar matematicamente as cargas impostas à articulação glenoumeral durante a realização de exercícios de flexão horizontal realizados em máquinas de musculação. Dentre as limitações deste estudo deve-se destacar a convenção de que o movimento seria realizado em velocidade constante, o que difere de observações descritas em outros estudos (14, 17). Esta limitação tenderia a subestimar os torques no início do movimento e superestimar os torques no final do movimento devido aos efeitos inerciais da carga deslocada. No entanto, não há estudos apontando estes efeitos associados à presença de polias excêntricas em máquinas e musculação. Uma segunda limitação envolve a utilização de um modelo de equilíbrio de

torque, o qual desconsidera a ocorrência de cocontrações entre músculos antagonistas. A existência de cocontrações dos antagonistas implica em aumento da força necessária pelos agonistas para uma mesma produção de torque (18).

Conclusão

Máquinas para a realização do exercício de voador direto com polias excêntricas e maiores alavancas para a força resistiva oferecem carga variada e não condizente com as propriedades musculares (força-comprimento), o que possivelmente resulta em demandas de força e adaptações distintas.

Declaração de conflito de interesses

Não nenhum conflito de interesses em relação ao presente estudo.

Declaração de financiamento

O estudo não recebeu financiamento para a sua realização

Referências

1. Folland JP, Williams AG. Morphological and Neurological Contributions to Increased Strength. *Sports Med.* 2007;37(2):145-68.
2. Frost D, Cronin J, Newton R. A Biomechanical Evaluation of Resistance. *Sports Med.* 2010;40(4):303-26.
3. Folland J, Morris B. Variable-cam resistance training machines: Do they match the angle - Torque relationship in humans? *J Sports Sci.* 2008;26(2):163-9.
4. McMaster DT, Cronin J, McGuigan M. Forms of variable resistance training. *Strength Cond J.* 2009;31(1):50-64.
5. Escamilla RF, Lewis C, Bell D, Bramblet G, Daffron J, Lambert S, et al. Core muscle activation during Swiss ball and traditional abdominal exercises. *J Orthop Sports Phys Ther.* 2010 May;40(5):265-76.
6. Bini RR, Carpes FP, Toledo JM, Loss JF. Estimation of the forces acting on the tibiofemoral joint during knee extension exercises performed on an open kinetic chain strength-training machine. *Braz J Kineanthrop Hum Perf.* 2008;10(1):35-42.
7. Dalleau G, Baron B, Bonazzi B, Leroyer P, Verstraete T, Verkindt C. The influence of variable resistance moment arm on knee extensor performance. *J Sports Sci.* 2010;28(6):657-65.
8. Da Silva DP, Geremia JM, Pantoja PD, Loss JF. Exercício de flexão de joelhos: máquina x caneleira. In: Gonçalves M, editor. XII Congresso Brasileiro de Biomecânica; 2007; São Pedro-SP. Sociedade Brasileira de Biomecânica; 2007. p. 48-53.
9. Seroyer ST, Nho SJ, Bach BR, Bush-Joseph CA, Nicholson GP, Romeo AA. Shoulder Pain in the Overhead Throwing Athlete. *Sports Health.* 2009;1(2):108-20.
10. Marchetti PH, Arruda CC, Segamarchi LF, Soares EG, Ito DT, da Luz Junior DA, et al. Exercício supino: uma breve revisão sobre os aspectos biomecânicos. *Braz J Sports Exerc Res.* 2010;1(2):135-42.
11. Loss JF, Candotti CT. Comparative study between two elbow flexion exercises using the estimated resultant muscle force. *Braz J Physioter.* 2008;12(6):502-10.
12. Chandler RF, Clauser CE, McConville JT, Reynolds HM, Young JW. Investigation of inertial properties of the human body. Ohio: Wright-Patterson Air Force Base; 1975.
13. Rassier DE, MacIntosh BR, Herzog W. Length dependence of active force production in skeletal muscle. *J Appl Physiol.* 1999;86(5):1445-57.
14. Melo M, O., Brodt GA, Gomes LE, Candotti CT, La Torre M, Loss JF. Effects of added elastic tubes on open-chain knee extensor strength training. *Sports Biomech.* 2013 Jun;12(2):195-203.
15. Savelberg HHCM, Meijer K. Contribution of mono- and biarticular muscles to extending knee joint moments in runners and cyclists. *J Appl Physiol.* 2003;94(6):2241-8.
16. Herzog W, Guimaraes AC, Anton MG, Carter-Erdman KA. Moment-length

relations of rectus femoris muscles of speed skaters/cyclists and runners. *Med Sci Sports Exerc.* 1991;23(11):1289-96.

17. Brodt GA, Melo MO, Bonezi A, Gertz LC, Loss JF. Avaliação da força de atrito em máquina de musculação durante exercícios de extensão de joelho. *Motriz: Revista de Educação Física.* 2013;19:523-31.
18. Kellis E, Baltzopoulos V. The effects of the antagonist muscle force on intersegmental loading during isokinetic efforts of the knee extensors. *J Biomech.* 1999;32(1):19-25.