

O EFEITO DA NORMALIZAÇÃO E OUTROS FATORES DE ESCALA NA COMPARAÇÃO DE PARÂMETROS BIOMECÂNICOS DISCRETOS

C. M.B. Rodrigues *, M.V. Correia *, J. M.C.S. Abrantes**, J. Nadal*** e M.A.B. Rodrigues****

* INESC TEC (anteriormente INESC Porto) e

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal

** MovLab - Laboratório de Tecnologias e Interfaces /

Universidade Lusófona de Humanidades e Tecnologias, Lisboa, Portugal

*** Programa de Engenharia Biomédica - COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil

**** Departamento de Eletrônica e Sistemas/Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil

e-mail: c.rodrigues@fe.up.pt

Resumo: O processo de normalização é muito comum para comparação de grandezas físicas associadas ao movimento humano nomeadamente da força, trabalho e potência mecânica, bem como da aceleração que corresponde à normalização da força à massa. Outras normalizações utilizadas para comparação entre sujeitos incluem operações de adição ou subtração de constantes, bem como operações matemáticas de integração ou diferenciação, colocando-se a questão sobre qual o efeito produzido por estas operações na comparação de resultados em diferentes condições experimentais. Este estudo apresenta uma base conceptual teórica bem como a comparação de resultados em diferentes condições experimentais antes e após a normalização. Os dados são relativos à força de reação do solo (FRS) e ao movimento do centro de gravidade (CG) do corpo de uma amostra de $n = 6$ sujeitos em ensaios de diferentes tipos de saltos de impulsão vertical e dos respectivos contramovimentos dos membros inferiores e ciclos de alongamento e encurtamento (CAE) muscular associados. Os resultados apresentam diferenças na comparação entre as várias condições experimentais após a normalização, explicadas com base no enquadramento estatístico de base teórica apresentado.

Palavras-chave: Fatores escala, movimento, CG, CAE.

Abstract: *The process of normalization for comparison of quantities is very common at human movement analysis especially in physical quantities such as force, work, power or even acceleration, which is no more than the normalization of force to mass. Other normalizations for comparison between subjects include operations of additive and subtractive factors, mathematical operations of integration and differentiation, with the question of the effect produced by these operations in comparison of their magnitudes at different experimental conditions. This study presents a conceptual theoretical basis as well as the differences in results compared before and after normalization. Data refer to the ground reaction force (GRF) and the movement of the body center of gravity (CG) of a sample with $n = 6$ subjects in trials of different types of*

vertical jump and counter movement of the lower limbs associated with the corresponding muscle stretching and shortening cycles (SSC). The result show differences in the comparison of several experimental conditions after normalization, and presents a statistical framework for theoretical basis of the found differences.

Key-words: Scale factors, movement, CG, SSC

Introdução

Nos vários modos de locomoção humana, quer seja na marcha, corrida ou salto, o controle por contato representa um papel determinante em função da importância da FRS na locomoção. Uma vez que a força da gravidade tem o seu ponto de aplicação no centro de gravidade (CG) do corpo, a rotação do sistema corporal é essencialmente determinada pelo momento da FRS em relação ao CG do corpo. Desta forma, a FRS e o seu ponto de aplicação constituem duas das variáveis coletivas de baixa dimensionalidade mais importantes neste tipo de movimento [1]. A marcha, a corrida e o salto apresentam em comum um fenómeno designado por CAE que consiste num tipo de ação muscular muito comum no ser humano, nomeadamente nos membros inferiores, e que se caracteriza por uma ação reversível de alongamento a que se segue um encurtamento muscular, normalmente associado a um contra-movimento, conduzindo a uma ação concêntrica muscular mais intensa após a ação excêntrica do que seria conseguida apenas em ação concêntrica [2]. O CAE muscular vem sendo avaliado como alternativa a protocolos bem definidos em saltos de máxima impulsão vertical (MVJ), nomeadamente o *squat jump* (SJ), *counter movement jump* (CMJ) e *drop jump* (DJ), introduzidos por Asmussen [3], os quais continuam a ser utilizados [4], [5] em virtude do caráter padronizado, reprodutibilidade e simplicidade.

O objetivo do presente trabalho consiste na avaliação dos efeitos de normalização sobre a FRS em diferentes tipos de impulsão vertical, contramovimentos e CAE's musculares, desde GRF_z até à aceleração responsável pela velocidade e deslocamento do CG.

Materiais e métodos

Os dados em análise são provenientes de uma amostra homogênea composta por um grupo de ($n = 6$) sujeitos, estudantes universitários de educação física e desporto com aptidões semelhantes, tendo cada um dos sujeitos executado três ensaios de cada um dos tipos de salto SJ, CMJ e DJ, de acordo com o protocolo definido por Asmussen (1974). O protocolo da pesquisa foi aprovado em comité de ética local. Após o consentimento informado dos sujeitos, realizaram-se as medidas antropométricas, das quais se destacam pelo interesse para este estudo as médias e desvios padrão amostrais com $CV \leq 20\%$ da massa ($76,7 \pm 9,3$) kg e da estatura ($1,789 \pm 0,062$) m. Instruíram-se os sujeitos sobre o modo de realização de cada tipo de salto e forneceram-se indicações durante a realização dos saltos. Os dados das forças e momentos de força de contato com o solo foram obtidos através da plataforma de força modelo BP2416-4000CE (AMTI, EUA) operando à frequência de amostragem 1000 Hz com amplificador MiniAmp MSA-6 da mesma marca. No contexto dos ensaios realizados, o presente estudo centra-se na análise da componente vertical GRF_z da força de reação do solo FRS, da força vertical resultante, aceleração, velocidade e deslocamento vertical do CG, bem como do impulso de força, trabalho e potência mecânica desenvolvidos nos diferentes MVJ, tendo-se selecionado para análise o melhor de cada um dos ensaios de cada tipo de salto, com base no critério do tempo de voo obtido a partir do período temporal correspondente ao registo do valor nulo de força pela plataforma.

Com base na componente vertical GRF_z da FRS foi detectada por inspeção gráfica e confirmação numérica em planilha de cálculo comercial, MS Excel 2007 (Microsoft, EUA) a fase de suporte relativa ao intervalo de tempo em que GRF_z se mantém aproximadamente constante, determinando com recurso à função estatística moda o valor mais frequente de GRF_z correspondente à força da gravidade $F_g = GRF_z$ e a partir desta a massa $m = F_g / g$ de cada sujeito, sendo $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ a aceleração da gravidade. Foi também detectada a fase de impulsão, determinada de acordo com as condições relativas a cada tipo de salto implementadas com derivadas por diferenças finitas ($d GRF_z / dt < 0$ e $GRF_z < mg$ para CMJ, $d GRF_z / dt > 0$ e $GRF_z > mg$ para SJ e $d GRF_z / dt > 0$ e $GRF_z > 0$ para DJ) e obtida a força vertical resultante $RF_z = GRF_z - mg$ e a partir desta a aceleração vertical $az = RF_z / m$ do CG. A partir da velocidade inicial conhecida no instante de inversão do movimento vertical ($v_z = 0$) e da integração numérica pelo método de Euler da aceleração instantânea az obteve-se a velocidade vertical instantânea v_z do CG e a partir da integração pelo mesmo método da velocidade vertical instantânea v_z o deslocamento vertical Δz do CG em relação à sua posição inicial em cada tipo de salto. Obtiveram-se também por integração numérica temporal pelo método de Euler os impulsos instantâneos

da força vertical de reacção do solo $I[GRF_z(t)]$ e da força vertical resultante $I[RF_z(t)]$. Calcularam-se a potência mecânica instantânea $P(t)$ a partir da força vertical resultante $RF_z(t)$ e da velocidade vertical instantânea $v_z(t)$ do CG e o trabalho mecânico $W(t)$ a partir de $RF_z(t)$ e do deslocamento vertical $\Delta z(t)$ do CG. Foram ainda calculadas a força vertical de reacção do solo GRF_z / F_g e a força vertical resultante RF_z / F_g normalizadas ao peso de cada sujeito.

A partir das grandezas físicas anteriores, obtidas para cada sujeito e cada tipo de salto de impulsão vertical de acordo com os protocolos considerados, foram extraídos com recurso às funções estatísticas da planilha comercial, aplicadas em cada fase do movimento detetadas anteriormente, um conjunto de parâmetros discretos com significado físico, associados às grandezas dinâmicas, cinemáticas e energéticas para comparação intra-sujeitos baseada nos parâmetros anteriores. De acordo com os objetivos e limitações do presente estudo, a atenção foi concentrada na análise das variáveis diretamente associadas à força, nomeadamente GRF_z , GRF_z / F_g , RF_z , RF_z / F_g e az , sendo a análise das variáveis restantes apresentada conceptualmente. Os parâmetros discretos selecionados correspondem ao valor mínimo *min imp*, máximo *max imp* e médio *mean imp* de força durante a fase de impulsão, aos valores médio de força na fase descendente *mean down* e ascendente *mean up* de impulsão, bem como o nível de força no instante de inversão *start up* da fase descendente para a fase ascendente de impulsão, de acordo com o seu carácter preditor do melhor desempenho nos MVJ [6]. As fases descendente e ascendente de impulsão e o instante de inversão do movimento descendente para ascendente foram determinados com base no sinal da velocidade vertical v_z . Foram ainda considerados para esta análise os níveis de força no instante de *take-off* e o valor máximo de força *max land* na recepção ao solo após o salto. A detecção do instante de início da fase de impulsão em SJ foi complementada com verificação por operador em função da tendência para contramovimento e corrigir a falsa detecção automática desta fase.

Os testes estatísticos aplicados com recurso ao Statistical Package for Social Sciences IBM SPSS 9.5.0.0 (SPSS, EUA) para a comparação dos parâmetros discretos considerados nas diferentes condições experimentais SJ, CMJ e DJ foram os *Paired Samples T-Test* em virtude dos dados reportarem a ensaios com a mesma amostra de sujeitos em diferentes condições experimentais, tendo aplicado os equivalentes não-paramétricos para confirmação dos resultados.

Resultados

Apresentam-se na Tabela 1 os resultados das comparações emparelhadas de GRF_z , GRF_z / F_g , RF_z , RF_z / F_g e az entre os diferentes tipos de saltos de impulsão vertical máxima, SJ, CMJ e DJ, com indicação das diferenças estatisticamente significativas ($p < 0,05$).

Tabela 1: Resultados da comparação emparelhada de $GRFz$, $GRFz / Fg$, RFz , RFz / Fg e az entre os diferentes saltos de impulsão vertical máxima, SJ, CMJ e DJ, com indicação das diferenças estatisticamente significativas *($p < 0,05$).

$GRFz$ (N)	Paired Samples T-Test								
	SJ-CMJ	Std.	p	CMJ-DJ	Std.	p	SJ-DJ	Std.	p
<i>min imp</i>	473,33*	145,50	0,001	-1011,82*	325,68	0,001	-538,49*	368,68	0,016
<i>max imp</i>	-170,64*	161,56	0,049	-3112,85*	685,35	$< 10^{-3}$	-3283,50*	624,93	$< 10^{-3}$
<i>mean imp</i>	52,73	64,42	0,101	-1608,05*	271,22	$< 10^{-3}$	-1555,32*	276,12	$< 10^{-3}$
<i>mean down</i>	7,63*	4,63	0,010	-2209,88*	447,09	$< 10^{-3}$	-2202,25*	450,68	$< 10^{-3}$
<i>mean up</i>	-53,54	70,75	0,123	-882,80*	150,43	$< 10^{-3}$	-936,33*	134,91	$< 10^{-3}$
<i>start up</i>	-706,20*	121,21	$< 10^{-3}$	-2026,56*	380,96	$< 10^{-3}$	-2732,76*	406,91	$< 10^{-3}$
<i>take-off</i>	2,82	4,25	0,165	-3,58	4,78	0,126	-0,76	3,55	0,623
<i>max land</i>	-174,98	2184,21	0,852	1029,38	2506,25	0,361	854,40	2775,26	0,485
$GRFz / Fg$	SJ-CMJ	Std.	p	CMJ-DJ	Std.	p	SJ-DJ	Std.	p
<i>min imp</i>	0,629*	0,208	0,001	-1,371*	0,499	0,001	-0,742*	0,518	0,017
<i>max imp</i>	-0,258	0,252	0,054	-4,123*	0,837	$< 10^{-3}$	-4,381*	0,722	$< 10^{-3}$
<i>mean imp</i>	0,058	0,085	0,156	-2,146*	0,368	$< 10^{-3}$	-2,088*	0,385	$< 10^{-3}$
<i>mean down</i>	0,0005	0,005	0,844	-2,945*	0,558	$< 10^{-3}$	-2,945*	0,560	$< 10^{-3}$
<i>mean up</i>	-0,093	0,098	0,067	-1,175*	0,214	$< 10^{-3}$	-1,269*	0,225	$< 10^{-3}$
<i>start up</i>	-0,979*	0,279	$< 10^{-3}$	-2,734*	0,700	$< 10^{-3}$	-3,712*	0,863	$< 10^{-3}$
<i>take-off</i>	0,003	0,005	0,203	-0,005	0,006	0,141	-0,001	0,005	0,529
<i>max land</i>	-0,279	2,768	0,814	1,121	3,251	0,437	0,841	3,509	0,583
RFz (N)	SJ-CMJ	Std.	p	CMJ-DJ	Std.	p	SJ-DJ	Std.	p
<i>min imp</i>	466,17*	144,50	0,001	-1009,68*	330,35	0,001	-543,51*	372,47	0,016
<i>max imp</i>	-177,80*	165,72	0,047	-3110,72*	693,67	$< 10^{-3}$	-3288,52*	630,78	$< 10^{-3}$
<i>mean imp</i>	45,58	67,33	0,158	-1605,92*	278,94	$< 10^{-3}$	-1560,35*	282,32	$< 10^{-3}$
<i>mean down</i>	0,47	4,03	0,785	-2207,75*	455,23	$< 10^{-3}$	-2207,27*	456,22	$< 10^{-3}$
<i>mean up</i>	-60,70	69,67	0,086	-859,59*	145,58	$< 10^{-3}$	-920,28*	151,60	$< 10^{-3}$
<i>start up</i>	-713,36*	122,43	$< 10^{-3}$	-2024,43*	382,38	$< 10^{-3}$	-2737,78*	404,39	$< 10^{-3}$
<i>take-off</i>	-4,34	6,72	0,175	0,72	14,31	0,907	-3,61	11,05	0,459
<i>max land</i>	-182,13	2181,27	0,846	1180,25	2280,59	0,261	998,12	2616,49	0,393
RFz / Fg	SJ-CMJ	Std.	p	CMJ-DJ	Std.	p	SJ-DJ	Std.	p
<i>min imp</i>	0,629*	0,208	0,001	-1,371*	0,499	0,001	-0,742*	0,518	0,017
<i>max imp</i>	-0,258	0,252	0,054	-4,123*	0,837	$< 10^{-3}$	-4,381*	0,722	$< 10^{-3}$
<i>mean imp</i>	0,055	0,086	0,180	-2,146*	0,368	$< 10^{-3}$	-2,090*	0,387	$< 10^{-3}$
<i>mean down</i>	0,001	0,005	0,844	-2,945*	0,558	$< 10^{-3}$	-2,945*	0,560	$< 10^{-3}$
<i>mean up</i>	-0,093	0,098	0,067	-1,148*	0,215	$< 10^{-3}$	-1,242*	0,246	$< 10^{-3}$
<i>start up</i>	-0,979*	0,279	$< 10^{-3}$	-2,734*	0,700	$< 10^{-3}$	-3,713*	0,863	$< 10^{-3}$
<i>take-off</i>	0,003	0,005	0,181	-0,002	0,011	0,690	0,001	0,009	0,721
<i>max land</i>	-0,279	2,768	0,814	1,363	2,856	0,295	1,084	3,232	0,449
az (m/s²)	SJ-CMJ	Std.	p	CMJ-DJ	Std.	p	SJ-DJ	Std.	p
<i>min imp</i>	6,172*	2,036	0,001	-13,451*	4,896	0,001	-7,279*	5,080	0,017
<i>max imp</i>	-2,531	2,475	0,054	-40,451*	8,211	$< 10^{-3}$	-42,981*	7,083	$< 10^{-3}$
<i>mean imp</i>	0,540	0,850	0,180	-21,048*	3,608	$< 10^{-3}$	-20,508*	3,800	$< 10^{-3}$
<i>mean down</i>	0,004	0,052	0,844	-28,894*	5,477	$< 10^{-3}$	-28,890*	5,497	$< 10^{-3}$
<i>mean up</i>	-0,916	0,962	0,067	-11,270*	2,113	$< 10^{-3}$	-12,186*	2,418	$< 10^{-3}$
<i>start up</i>	-9,601*	2,736	$< 10^{-3}$	-26,819*	6,870	$< 10^{-3}$	-36,420*	8,470	$< 10^{-3}$
<i>take-off</i>	0,032	0,051	0,181	-0,045	0,061	0,125	-0,014	0,009	0,529
<i>max land</i>	-2,742	27,149	0,814	13,373	28,021	0,295	10,632	31,710	0,449

Discussão

De acordo com as relações entre as grandezas físicas consideradas $GRFz$, $GRFz / Fg$, RFz , RFz / Fg e az bem como das relações estatísticas entre valores esperados e variâncias de variáveis aleatórias relacionadas, seriam esperados resultados iguais nos testes estatísticos aplicados dos parâmetros correspondentes em todas as variáveis, já que as variáveis representam o mesmo sinal e possuem por isso a mesma informação, a menos da aditividade de constantes ou aplicação de fatores de escala correspondentes à multiplicação por constante.

Com base nos resultados apresentados na Tabela 1, pode verificar-se que é isso o que acontece em todas as comparações CMJ – DJ e SJ – DJ para os parâmetros correspondentes, que apresentam os mesmos resultados de comparação em todas as variáveis consideradas, bem como na maior parte dos parâmetros correspondentes das várias variáveis nas comparações SJ – CMJ.

Existem no entanto exceções como se pode verificar pelos resultados da Tabela 1 na comparação SJ – CMJ do parâmetro *max imp* que apresenta diferenças estatisticamente significativas ao nível de significância $p < 0,05$ em $GRFz$ e RFz , mas não em $GRFz / Fg$, RFz / Fg e az , e no parâmetro *mean down* que apresenta diferenças estatisticamente significativas apenas em $GRFz$. Observando os *p-values* nas comparações SJ – CMJ do parâmetro *max imp* pode-se verificar que estas se encontram muito próximas por defeito em $GRFz$ e RFz e muito próximas por excesso em $GRFz / Fg$, RFz / Fg e az da significância ($\alpha = 0,05$) definida como limite para classificação das diferenças como estatisticamente significativas, o que justifica a sensibilidade deste parâmetro na aplicação de um fator de escala.

Em função do risco de erro na detecção das fases do movimento e da influência nos cálculos seguintes, a detecção automática com base nas condições definidas foi supervisionada por operador para verificação e correção de falsos inícios como foi o caso da fase de impulsão em SJ. Além disso, os instantes de início e fim em cada fase de movimento são os mesmos em todas as variáveis consideradas, o que reduz a influência deste aspecto determinante, no estudo em causa.

Atendendo ao fator de escala que distingue os grupos de variáveis em que o parâmetro apresenta comportamentos semelhantes $GRFz$, RFz e $GRFz / Fg$, RFz / Fg , az e as variáveis em que o parâmetro apresenta um comportamento distinto $GRFz$, $GRFz / Fg$ e RFz , RFz / Fg , az , pode-se verificar que os grupos de variáveis em que o parâmetro apresenta comportamentos semelhantes diferem por fatores aditivos ou produto por constante ($RFz = GRFz - mg$, $RFz / Fg = GRFz / Fg - 1$, $az = RFz / Fg \times g$) e o grupo de variáveis em que o comportamento do parâmetro difere ($GRFz / Fg = GRFz \times 1/m \times 1/g$, $RFz / Fg = RFz \times 1/m \times 1/g$ e $az = RFz \times 1/m$) estão relacionadas por fatores multiplicativos ou variáveis não necessariamente independentes $GRFz$, RFz e $1/m$, sendo g uma constante, o que poderá explicar as semelhanças

anteriores já que $V(X + C) = V(X)$ e $V(CX) = C^2 V(X)$ enquanto as diferenças podem dever-se à relação $E(XY) = E(X)E(Y)$ aplicável apenas se X e Y independentes.

Conclusão

As operações de normalização associadas a sinais biomecânicos devem ser realizadas de forma prudente, uma vez que podem influenciar os resultados em análises estatísticas de parâmetros com nível de significância próximo dos considerados estatisticamente significativos. Não obstante o tamanho reduzido da amostra a opção pelos testes paramétricos emparelhados deve-se à maior sensibilidade destes testes cujos resultados foram confirmados por via da aplicação dos seus equivalentes não-paramétricos, bem como por testes não-emparelhados, em trabalho dos mesmos autores submetidos ao CBEB2014.

Agradecimentos

Ao Prof. Carlos Carvalho que disponibilizou o LMH/ISMAI e supervisionou os ensaios bem como aos colegas que contribuíram no processo de recolha de dados. À Univ. do Porto e à Università degli Studi di Roma "La Sapienza" que viabilizaram as mobilidades EBWII e BE MUNDUS.

Referências

- [1] van Ingen Shenau GJ, van Soest AJ. On the biomechanical basis of dexterity. In: Latash ML, Turvey MT (Eds.) Dexterity and its development. New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates; 1996. p. 305-38.
- [2] Komi PV, Bosco C. Utilization of stored elastic energy in leg extensor muscles by men and women. Med. Sci. Sports. 1978; 10 (4): 261-5.
- [3] Asmussen E, Bonde-Petersen F. Storage of elastic energy in skeletal muscles in man. Acta Physiol. Scand. 1974; 91: 385-92.
- [4] Bobbert, MF, Casius LJR. Spring-like leg behaviour, musculoskeletal mechanics and control in maximum and submaximum height human hopping. Phil. Trans. R. Soc. B. 2011; 366: 1516-29.
- [5] Komi, PV, Ishikawa, M & Linnamo, V. Identification of Stretch-Shortening Cycles in different sports. In: Proceedings of the 29th Conference of the International Society Biomechanical in Sports 2011 Jun 27- Jul 1; Porto, Portugal. 2011. 11(2): 31-33.
- [6] Aragón-Vargas, LF, Gross, MM. Kinesiological factors in vertical jump performance: differences among individuals. Journal of Applied Biomechanics. 1997; 13: 24-44.