

Consumo energético e eficiência da marcha com dois modelos de joelhos protésicos: estudo de caso

Catarina Sá¹, Joana Cruz¹, Rafael Nascimento¹, José Maurício Silva², M^a Teresa Tomás³

1. Licenciatura em Ortoprotésia, Escola Superior de Tecnologia da Saúde de Lisboa, Instituto Politécnico de Lisboa. catarinafariasa@gmail.com

2. Unidade de Ortoprotésia, Centro de Medicina de Reabilitação do Alcoitão.

3. Área Científica de Fisioterapia, Escola Superior de Tecnologia da Saúde de Lisboa, Instituto Politécnico de Lisboa.

RESUMO: Introdução – Os componentes protésicos têm um papel fundamental na eficiência energética da marcha dos indivíduos amputados. Esta é uma área de conhecimento ainda em desenvolvimento, onde a investigação desempenha um papel central.

Objetivos – Comparar e analisar o efeito de dois joelhos protésicos, 3R34, monocêntrico modular, de fricção constante, com auxiliar de extensão incorporado (A) e 3R92, monocêntrico modular, com travão de fricção e controlo pneumático da fase de balanço (B) no consumo energético e eficiência da marcha. **Metodologia** – Um indivíduo do sexo masculino de 27 anos, com amputação transfemural longa, foi sujeito a um protocolo submáximo de avaliação da resposta ao exercício em passadeira rolante (*HIP/Cosmos(R) Mercury*), através de um sistema de análise de gases *breath-by-breath* (*Cosmed Quark PFT Ergo*). Foi efetuado o mesmo protocolo com intervalo de dois dias, primeiro utilizando o joelho A e depois o B. As variáveis analisadas foram o consumo de O_2 (VO_2), o equivalente metabólico (MET) e a eficiência energética da marcha (Quociente de VO_2 esperado de um indivíduo saudável e o VO_2 do indivíduo em estudo). O esforço percebido foi medido com a escala RPE de Borg.

Resultados – O consumo energético com o joelho A (24,2 ml O_2 /kg/min; 6,9 MET) foi inferior ao obtido com o joelho B (28,68 ml O_2 /kg/min; 8,2 MET). A eficiência energética da marcha foi mais elevada para o joelho A (43%) do que para o joelho B (39%). **Conclusão** – A utilização do joelho A na prótese do indivíduo em estudo resulta numa marcha de menor consumo energético e maior eficiência. No entanto, este valor poderá estar influenciado pelo curto período de adaptação ao joelho B, sendo necessários mais estudos para confirmar os resultados do estudo e a influência deste fator.

Palavras-chave: consumo de oxigénio (VO_2), joelhos mecânicos, amputação transfemural, consumo energético, eficiência energética

Gait energy consumption and gait efficiency with two different models of prosthetics knees: a single case report

ABSTRACT: Background – Prosthetic components have a crucial role in the energy efficiency of amputee's gait. This is an area of knowledge still in development, where research plays a central role. **Objective** – The purpose of this case study is to compare the impact in energy consumption of two prosthetic knees, titanium single-axis constant friction knee joint with internal extension assist, 3R34 (A) and a single-axis pneumatic swing phase control, 3R92 (B). **Methodology** – The participant was a transtibial amputee, male, with 27 years old, with no other clinical or functional impairments. To measure the energy expenditure a submaximal treadmill (*HIP/Cosmos(R) Mercury*) exercise stress test combined with a breath-by-breath analysis system (*Cosmed Quark PFT Ergo*) was used. The same test was applied to both knees, separated by two days. The analyzed variables were O_2 consumption (VO_2), metabolic equivalent (MET) and gait efficiency (VO_2 ratio expected from a healthy individual and the studied individual). A rate of perceived exertion (Borg's Scale) was used.

Results – The results were favorable to knee A (24.2 ml O_2 /kg/min; 6.9 MET, 43% efficiency) compared with knee B (28.68 ml O_2 /kg/min; 8.2 MET, 39% efficiency). **Conclusion** – In this case, a less energy consumption gait corresponds to the prosthesis with knee A. These values may be influenced by the short adaptation period with knee B, so it's necessary to perform more studies to confirm the previous results and to understand the truly impact of correct adaptation factor to the best prosthetics components for different patients.

Keywords: O_2 consumption (VO_2), mechanical prosthetic knee, transfemural amputation, energy expenditure, gait efficiency

Introdução

Desde o ano de 1959 que se conhece investigação sobre o consumo energético da marcha com referência à utilização de dispositivos biomecânicos¹. Em 1976, Waters, et al² desenvolveram um trabalho que analisava o consumo energético da marcha consoante o nível de amputação, contribuindo assim para uma percepção mais exata do dispêndio energético dos utilizadores de diferentes tipos de prótese. Mais tarde, em 1988, Nielsen, et al³ estudaram a influência do tipo de dispositivo terminal (pé protésico) sobre o consumo energético. Estudos posteriores centraram-se na comparação do consumo energético entre indivíduos com amputação e indivíduos não amputados (Mattes, et al⁴, Rietman, et al⁵, Bussmann, et al⁶) e na análise dos joelhos de controlo por microprocessador (Johansson, et al⁷, Hafner, et al⁸, Kaufman, et al⁹).

A medição do consumo energético adaptado à reabilitação é um método de avaliação funcional adotado para estudar os efeitos funcionais da deficiência na marcha¹⁰. Na área da Ortoprotésia indica o esforço despendido na utilização de dispositivos biomecânicos, permitindo perceber a eficácia dos dispositivos e dos seus componentes.

Objectivo

O objectivo deste estudo é comparar e analisar o efeito no consumo energético e eficiência da marcha em dois tipos de joelhos protésicos da *Otto Bockâ*: o 3R34 joelho mecânico modular monocêntrico em titânio (joelho A) e o 3R92 joelho pneumático modular monocêntrico (joelho B) num indivíduo com amputação ao nível transfemural.

Material/Métodos

Amostra

Um indivíduo do sexo masculino, 27 anos de idade (1,67m de altura e 48,8 kg sem prótese), dextro, aceitou a participar no estudo após consentimento informado. Para a sua seleção respeitaram-se os seguintes fatores, de forma a cumprir os requisitos de segurança: a ausência de contra-indicações à realização do teste de exercício¹¹, ser independente, autónomo no quotidiano e ter capacidade de marcha sem auxiliares.

O nível de atividade do indivíduo é K4, caracterizando-se por um potencial para a marcha que excede os níveis básicos para amputados, apresentando um maior impacto e maior exigência energética. Característico da criança, adulto ativo ou atleta¹². O indivíduo apresentava uma malformação congénita do membro inferior esquerdo à nascença. Posteriormente foi submetido a uma cirurgia de desarticulação do joelho, sendo classificada pelos profissionais que o acompanharam como amputação transfemural longa.

O dispositivo biomecânico que o indivíduo utiliza classifica-se como prótese transfemural endoesquelética, com encaixe de contenção isquiática, joelho protésico

3R34, pilão de duralumínio e pé dinâmico com lâminas de carbono. Para o estudo utilizou-se esta prótese, apenas substituindo o joelho.

Variáveis Dependentes

Teste de exercício

As variáveis metabólicas (VO_2 , MET) foram fornecidas pelo sistema de análise de gases metabólicos (Quark PFT Ergo da COSMED), tanto em repouso como em exercício em passadeira rolante (H/P/Cosmos(R) Mercury). O consumo de oxigénio na marcha (VO_2 na marcha) é obtido através do quociente entre o VO_2 e a velocidade a que se obteve este valor. A eficiência energética na marcha é o quociente, em percentagem, entre o consumo de O_2 de um indivíduo não amputado e o consumo de O_2 do indivíduo a analisar obtido durante a marcha.

Avaliação da percepção subjetiva da prótese

Antes do início do teste, o participante foi questionado relativamente ao grau de satisfação com a prótese que habitualmente utiliza (joelho 3R34).

Protocolo

Para cada joelho protésico foi realizado, com dois dias de intervalo, um teste de resposta ao exercício com espirometria em circuito fechado, adaptando o protocolo de Nielsen, et al³, iniciado após 15 minutos de repouso do indivíduo para medição dos valores basais de VO_2 . Definiram-se seis velocidades (2,4; 3,2; 4,0; 4,8; 5,6; 6,4 km/h), com 5 minutos de marcha cada. Em cada patamar foi medida a pressão arterial (PA) e questionado o nível de percepção subjetiva de esforço (escala RPE 6-20 de Borg). Para critério de segurança de paragem do teste foi escolhido o nível de pressão arterial (PA) acima dos 200/100 ou o valor de 85% da frequência cardíaca máxima esperada para a idade (168 bpm) (o que ocorresse primeiro).

Variáveis independentes

- *Joelhos protésicos Joelho A*
O indivíduo utiliza há cinco anos um joelho monocêntrico modular, de fricção constante, com auxiliar de extensão incorporado (3R34 da *Otto Bockâ*).
- *Joelho B*
Joelho monocêntrico modular, com travão de fricção e controlo pneumático da fase de balanço (3R92 da *Otto Bockâ*).

A opção pelo joelho B justifica-se pela fácil adaptabilidade aos componentes existentes na prótese, mantendo o mesmo alinhamento e altura da base ao eixo, bem como por ter características mecânicas diferentes (controlo pneumático da fase de balanço e travão de fricção) com efeitos díspares na marcha.

Resultados

Teste de exercício

Os valores em repouso obtidos durante o teste ao nível do consumo de O₂ com o joelho A foi de 4,13 ml/kg/min e com o joelho B foi de 3,21ml/kg/min. Ao nível do equivalente metabólico foi de 1,17 MET com o joelho A e 1,09 MET com o joelho B.

Relativamente aos valores para o pico do VO₂, com o joelho A foi de 24,2 ml/kg/min, comparativamente com 28,68 ml/kg/min do joelho B. O equivalente metabólico

com joelho A comparativamente com o joelho B foi de 6,9 MET e 8,2 MET, respetivamente.

O tempo de duração da prova em passadeira com o A foi de 31,5 minutos e com o B foi de 31 minutos. A velocidade a que o VO₂ pico foi obtido com o joelho A foi de 5,6 Km/h e com o joelho B foi de 6,4 Km/h (cf. Quadro 1).

Na velocidade máxima atingida obteve-se o valor de 17 na escala de Borg, representando um esforço muito intenso (cf. Quadro 2).

Em qualquer das provas, o indivíduo não atingiu o critério de paragem para os valores da pressão arterial (cf. Quadro 3).

Quadro 1: Valores obtidos nos diferentes parâmetros avaliados durante o teste de marcha com análise de gases expirados

		Joelhos protésicos	
		Joelho A	Joelho B
Valores em repouso	Consumo de O ₂ (ml/kg/min)	4,13	3,21
	MET	1,17	1,09
	Frequência cardíaca (bpm)	99,6	83,5
Valores para VO ₂ pico	Consumo de O ₂ (ml/kg/min)	24,2	28,68
	MET	6,9	8,2
	Consumo de O ₂ (ml/kg/min)	151	167,5
	Pressão arterial	150/70	160/60
Tempo de duração da prova em passadeira (minutos)		31,5	31

Quadro 2: Valores obtidos na escala de esforço percecionado de Borg

	2,4 km/h	3,2 km/h	4,0 km/h	4,8 km/h	5,6 km/h	6,4 km/h
Joelho A	-					17
Joelho B	9	10-9	11-10	12-11	14-13	17-16

Quadro 3: Valores obtidos na medição da pressão arterial

	2,4 km/h	3,2 km/h	4,0 km/h	4,8 km/h	5,6 km/h	6,4 km/h
Joelho A	120 /80	150 /70	160 /70	150 /70	150 /70	150 /70
Joelho B	115 /70	130 /60	150 /70	150 /60	-	160 /60

Avaliação da percepção subjectiva da prótese

O indivíduo referiu um grau de satisfação muito elevado com a prótese que habitualmente utiliza.

Discussão

Características do teste de exercício

O protocolo utilizado foi adaptado de Nielsen, et al³, que o aplicou em indivíduos amputados de membro inferior pelo nível transtibial. Considerou-se, no entanto, a utilidade deste protocolo por ter sido aplicado a amputados. Foi igualmente de fácil compreensão os procedi-

mentos, em comparação com outras pesquisas: Kaufman, et al⁹, Gailey, et al¹⁴.

Por não se ter verificado *steady-state* nos testes realizados, para a medição dos diferentes parâmetros utilizou-se a média dos dois/três valores pico mais próximos.

Segundo Traballes, et al¹⁵, sobre o custo energético da marcha em amputados de membro inferior, os resultados do consumo energético obtidos com recurso a um teste em passadeira são superiores aos obtidos no solo, independentemente do nível de amputação. Como tal, a marcha em passadeira pode não representar verdadeiramente a eficiência energética na marcha.

A utilização de um valor pico para obtenção do consumo energético, em vez de um valor máximo, advém da opção por um teste submáximo por não haver recursos humanos e materiais para a realização de um teste máximo. Este último teste implicaria exigir ao indivíduo que alcançasse a sua frequência cardíaca máxima, procedimento este de elevado risco cardíaco. Por razões de segurança e como critério de paragem do teste, estipulou-se então um teste submáximo a terminar a 85% da frequência cardíaca máxima esperada para a idade, registando-se os valores pretendidos nesse momento, os mais aproximados dos valores ideais. Ademais, previamente ao teste foram aplicadas questões ao indivíduo para estratificação do risco cardiovascular, tendo este sido classificado como de baixo risco. Os testes foram realizados em dias diferentes. O primeiro teste numa sexta-feira e o segundo na segunda-feira seguinte, cumprindo-se os mesmos parâmetros quanto à hora de início do teste. O facto de o segundo teste ter sido realizado após dois dias de maior descanso (fim-de-semana) pode ter influenciado positivamente os valores obtidos, apesar de o indivíduo referir não ter havido discrepâncias entre o nível de atividade nos dois dias anteriores a qualquer um dos testes. No dia do segundo teste (joelho B), a temperatura ambiente estava mais elevada, cerca de 3° C, o que fisiologicamente poderá provocar maior fadiga pelo aumento de temperatura corporal.

O facto de não se colocarem aumentos de inclinação na passadeira, como no protocolo de Bruce (normalmente usado em conjugação com testes de passadeira) e de cada patamar ter um tempo considerável de duração (5 minutos), evitou que o indivíduo chegasse à exaustão mais rapidamente e permitiu a adaptação da marcha ao incremento de velocidade, o que se repercutiu em valores metabólicos mais fidedignos e objetivos pela maior quantidade e qualidade dos mesmos. Considera-se então este protocolo adequado à mensuração do consumo energético em passadeira em indivíduos amputados unilateralmente de membro inferior pelo nível transfemural.

Na velocidade mais elevada do teste, o indivíduo referiu uma percepção subjetiva de esforço (RPE de Borg) de nível intenso, no entanto, no final do teste, referiu estar longe da exaustão.

Nos valores obtidos para a escala de Borg não foram registados os valores dos patamares 1 a 5, pois o indivíduo não compreendeu corretamente o significado da escala, indicando valores inadequados.

Características dos dispositivos protésicos

A primeira consideração a ser feita sobre as características dos dispositivos e a sua influência sobre os resultados é a diferença bastante elevada da adaptação do indivíduo aos joelhos.

O joelho A, sendo o joelho prescrito para a prótese que o indivíduo utiliza, tem uma utilização de cinco anos, o que resulta num nível máximo de adaptação, estando a marcha ajustada às propriedades do mesmo.

O joelho B, escolhido para a investigação, nunca foi usado pelo indivíduo, tendo quinze minutos de utilização antes de o teste decorrer. Este joelho tem características diferentes, nomeadamente o travão de fricção, que levaram o indivíduo a adaptar a sua marcha. O valor mais elevado de consumo energético na marcha registado no teste com o joelho B pode ter como influência esta situação, o que torna menos objetiva a avaliação do consumo energético.

Considerações

No presente estudo, podemos verificar que o participante manteve uma velocidade semelhante aos indivíduos não amputados e superior aos valores médios dos amputados transfemorais. O participante, para manter estas velocidades semelhantes às dos indivíduos não amputados, teve que gastar aproximadamente o dobro da energia e como tal consumir o dobro do oxigénio (cf. Quadro 4).

Quadro 4: Comparação de dados obtidos com valores de referência¹⁷

	Velocidade (m/min)	Frequência cardíaca (BPM)	Consumo de O ₂ (ml/kg/min)	Consumo de O ₂ na marcha (ml/kg/m)	Eficiência energética na marcha (%)	MET
Indivíduos não amputados	80	99	12.1	0.15	–	3.5
<i>Amputados traumáticos</i>						
Amputados Transfemorais ¹⁷	52	111	10.3	0.20	75%	2,9
<i>Caso Clínico</i>						
Joelho A	69	135	24.2	0.35	43%	6,9
Joelho B	75	120	28.6	0.38	39%	8,2

Os resultados da análise de gases no joelho A, comparativamente com o joelho B, foram inferiores no que toca ao consumo de oxigénio e ao consumo de oxigénio na marcha. Como tal, poder-se-á afirmar que o joelho A, no presente caso, obteve uma maior eficiência energética que o joelho B (cf. Quadro 4).

Segundo McArdle¹⁶, a intensidade do esforço físico, visível pela leitura do equivalente metabólico (MET), foi classificada de intensa (6,4) no primeiro teste e, no segundo, a intensidade do esforço físico foi classificada de muito intensa (8,2) (cf. Quadro 4). Estes valores são compatíveis com os resultados obtidos na escala de Borg e a percepção subjetiva do esforço referida pelo indivíduo no final do teste.

Os valores dos equivalentes metabólicos em repouso, em ambos os testes, são superiores aos valores para a taxa metabólica em repouso para o indivíduo não amputado (1MET), pois os estímulos exteriores não estavam completamente ausentes. Podemos ainda salientar que o participante obteve resultados do consumo energético superiores aos dos indivíduos amputados transfemorais, muito provavelmente devido à maior velocidade em que foram registados estes valores do que a efetuada no teste no nosso estudo (cf. Quadro 4).

Conclusão

O objetivo de analisar as diferenças de consumo e eficiência energética entre dois tipos de joelhos protésicos, joelho A e joelho B, durante a marcha em passadeira, foi alcançado, sendo visível nos resultados fiáveis e no protocolo adequado.

O valor do equivalente metabólico, que indica o consumo energético, para a prótese com o joelho A foi inferior em relação à prótese com o joelho B. Este resultado repercutiu-se na eficiência energética, em que o joelho A obteve um resultado mais satisfatório. Verifica-se então que, para o indivíduo em estudo, o joelho mais indicado é o que o indivíduo utiliza (joelho A). No entanto, os resultados poderão estar influenciados pela pouca adaptação ao joelho B.

Salienta-se a percepção do indivíduo como um parâmetro a considerar na análise dos componentes. A sua aceitação é tão importante como a funcionalidade que pode oferecer a quem os utiliza. O participante indicou a sua preferência pelo joelho A, ao qual está mais adaptado.

De forma a comprovar esta conclusão futuros estudos terão de ser realizados, com testes mais sensíveis e controlados e, sobretudo, com uma amostra populacional maior, de modo a verificar a generalização ou não à população que poderá utilizar este tipo de próteses.

Considerações Finais

Numa primeira fase, o protocolo deveria ter sido avaliado em indivíduos não amputados, com as mesmas características do participante (idade, peso, hábitos quotidianos), de modo a estabelecer valores de comparação obtidos para o mesmo protocolo.

Um período mais alargado de adaptação ao joelho protésico B seria desejável para tornar os dados mais sensíveis, possibilitando uma comparação mais objetiva.

O protocolo adotado foi confirmado como adequado para indivíduos com amputações transfemorais, sendo passível de ser aplicado em futuros trabalhos.

Futuramente esperam-se investigações nesta área que apliquem estes procedimentos a um maior número de indivíduos e de instrumentos de análise e a um maior número de componentes, com a inclusão de novos testes de análise de metabolismo, como, por exemplo, a medição do consumo energético na marcha no solo e em atividades da vida diária e a análise de marcha em laboratório, de forma a trazer maior riqueza de resultados, podendo mesmo elaborar-se um conjunto de orientações válidas para a prescrição de componentes.

Referências Bibliográficas

1. Bard G, Ralston HJ. Measurement of energy expenditure during ambulation, with special reference to evaluation of assistive devices. *Arch Phys Med Rehabil.* 1959;40:415-20.
2. Waters RL, Perry J, Antonelli D, Hislop HJ. Energy cost of walking of amputees: the influence of level amputation. *J Bone Joint Surg.* 1976;58:42-6.
3. Nielsen DH, Shurr DG, Golden JC, Meier K. Comparison of energy cost and gait efficiency during ambulation in below-knee amputees using different prosthetic feet: a preliminary report. *J Prosthet Orthot.* 1988;1(1):24-31.
4. Mattes SJ, Martin PE, Royer TD. Walking symmetry and energy cost in persons with unilateral transtibial amputations: matching prosthetic and intact limb inertial properties. *Arch Phys Med Rehabil.* 2000;81(5):561-8.
5. Rietman JS, Postema K, Geertzen JH. Gait analysis in prosthetics: opinions, ideas and conclusions. *Prosthet Orthot Int.* 2002;26(1):50-7.
6. Bussmann JB, Schrauwen HJ, Stam HJ. Daily physical activity and heart rate response in people with a unilateral traumatic transtibial amputation. *Arch Phys Med Rehabil.* 2008;89(3):430-4.
7. Johansson JL, Sherrill DM, Riley PO, Bonato P, Herr H. A clinical comparison of variable-damping and mechanically passive prosthetic knee devices. *Am J Phys Med Rehabil.* 2005;84(8):563-75.
8. Hafner BJ, Willingham LL, Buell NC, Allyn KJ, Smith DG. Evaluation of function, performance and preference as transfemoral amputees transition from mechanical to microprocessor control of the prosthetic knee. *Arch Phys Med Rehabil.* 2007;88(2):207-17.
9. Kaufman KR, Levine JA, Brey RH, McCrady SK, Padgett DJ, Joyner MJ. Energy expenditure and activity of transfemoral amputees using mechanical and microprocessor-controlled prosthetic knees. *Arch Phys Med Rehabil.* 2008;89(7):1380-5.
10. Waters RL, Mulroy S. The energy expenditure of normal and pathologic gait. *Gait Posture.* 1999;9(3):207-31.

11. American College of Sports Medicine. ACSM's guidelines for exercise testing and prescription. 9th ed. Lippincott, Williams & Wilkins; 2010.
12. Fergason J. Prosthetic feet. In Lusardi MM, Nielsen CC, editors. Orthotics and prosthetics in reahabilitation. New York: Elsevier; 2007. p. 656.
13. Prosthetics Research Study. Prosthesis evaluation questionnaire. Seattle-WA: Author; 1998.
14. Gailey RS, Nash MS, Atchley TA, Zilmer RM, Moline-Little GR, Morris-Cresswell N, et al. The effects of prosthesis mass on metabolic cost of ambulation in non-vascular trans-tibial amputees. *Prosthet Orthot Int.* 1997;21(1):9-16.
15. Trallesi M, Porcaccia P, Aversa T, Brunelli S. Energy cost of walking measurements in subjects with lower limb. *Gait Posture.* 2008;27(1):70-5.
16. McArdle WD, Katch FL, KatchVL. Fisiologia do exercício. 5ª ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan; 2001. Portuguese
17. Waters RL. Gasto energético. In *Análise de marcha: sistemas de análise de marcha.* Barueri: Manole; 2005. p. 85-120. Portuguese

Artigo recebido em 01.04.2011 e aprovado em 11.10.2011.