

Teste cardiopulmonar em exoesqueleto para marcha robotizada em esteira rolante com suspensão do peso corporal: uma opção para avaliação de pessoas com tetraplegia - relato de caso

Cardiopulmonary test using a robotic exoskeleton with body weight support: an option for evaluating people with tetraplegia - case report

André Tadeu Sugawara^{1,2}, Paulo Yazbek Júnior¹, Denise Matheus¹, Linamara Rizzo Battistella²

RESUMO

A lesão medular (LM), que envolve dano à medula espinhal por trauma, doença ou degeneração, tem permitido um aumento na expectativa de vida devido aos avanços no tratamento. No entanto, isso tem resultado em maior exposição aos fatores de risco, aumentando a morbidade de doenças não comunicáveis, especialmente as cardiovasculares. **Objetivo:** Descrever o uso do exoesqueleto para marcha robotizada em esteira rolante com suspensão do peso corporal (TCP) para avaliar pacientes com tetraplegia. Apresentação do Caso: Um paciente de 55 anos com tetraplegia C4 AIS B, incapaz de andar, foi submetido ao TCP para determinar gasto energético e limiares ventilatórios de treinamento. Utilizou-se um sistema portátil de ergoespirometria para medir o consumo máximo de oxigênio (VO₂ Max) durante o teste. **Resultados:** Durante o TCP, o traçado eletrocardiográfico não indicou alterações isquêmicas, mantendo-se em ritmo sinusal. Houve aumento da frequência cardíaca durante o esforço físico, mas as trocas gasosas foram adequadas, indicando aumento na demanda metabólica suprida por adaptações respiratórias. **Discussão:** Pacientes com tetraplegia frequentemente apresentam padrões ventilatórios alterados que podem limitar sua capacidade aeróbica. O uso do exoesqueleto tanto para avaliação quanto para treinamento simplifica o tratamento, reduzindo deslocamentos e melhorando a segurança e comparabilidade dos resultados. **Conclusão:** A utilização do exoesqueleto para TCP oferece uma abordagem integrada e eficaz para pacientes com LM, replicando a atividade naturalística de andar durante o treinamento cardiovascular e de reabilitação.

Palavras-chaves: Marcha, Exoesqueleto Energizado, Quadriplegia, Reabilitação

ABSTRACT

The life expectancy of people with spinal cord injury (SCI) has increased. Ageing has greater exposure to risk factors, increasing the morbidity of non-communicable diseases, especially cardiovascular. **Objective:** To describe the use of a robotic exoskeleton for robotic walking on a treadmill with body weight support to evaluate patients with tetraplegia during a cardiopulmonary exercise test (CPET). Case presentation: 55-year-old woman with tetraplegia C4 AIS B, unable to walk, she underwent CPET to determine ventilatory training Threshold and energy expenditure. A portable ergospirometry system was used to measure maximum oxygen consumption (VO₂ Max) during the test. **Results:** During CPET, the electrocardiographic tracing did not indicate ischemic changes, remaining in sinus rhythm. There was an increase in heart rate during physical exertion, but gas exchange was adequate, indicating an increase in the metabolic demand supplied through respiratory adaptations. **Discussion:** Patients with tetraplegia often have altered ventilation patterns that can limit their aerobic capacity. Using the exoskeleton for both assessment and training simplifies the treatment, reducing displacements and improving the safety and comparability of results. **Conclusion:** The use of the exoskeleton for CPET offers an integrated effective approach for SCI patients, replicating the naturalistic activity of walking during cardiovascular and rehabilitation training.

Keywords: Gait, Exoskeleton Device, Quadriplegia, Rehabilitation

¹Instituto de Medicina Física e Reabilitação IMREA, Hospital das Clínicas, Faculdade de Medicina, Universidade de São Paulo HCFMUSP

²Departamento da Medicina Legal, Bioética, Medicina do Trabalho e Medicina Física e Reabilitação, Faculdade de Medicina, Universidade de São Paulo

Autor Correspondente

André Tadeu Sugawara
E-mail: andre.sugawara@hc.fm.usp.br

Conflito de Interesses

Nada a declarar

Submetido: 10 abril 2024

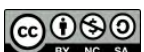
Aceito: 10 setembro 2024

Como citar

Sugawara AT, Yazbek Junior P, Matheus D, Battistella LR. Teste cardiopulmonar em exoesqueleto para marcha robotizada em esteira rolante com suspensão do peso corporal: uma opção para avaliação de pessoas com tetraplegia - relato de caso. Acta Fisiatr. 2024;31(4):271-274.

DOI: 10.11606/issn.23170190.v31i4a230168

ISSN 2317-0190 | Copyright © 2024 | Acta Fisiátrica
Instituto de Medicina Física e Reabilitação - HCFMUSP



Este trabalho está licenciado com uma licença
Creative Commons - Atribuição 4.0 Internacional

INTRODUÇÃO

A lesão medular (LM), definida como dano à medula espinhal resultante de trauma, doença ou degeneração,¹ conquistou aumento da expectativa de vida, pelo sucesso de medidas anteriormente adotadas. Viver mais também significou maior exposição aos fatores de risco, com aumento da morbidade associada às doenças não comunicáveis, particularmente, as cardiovasculares.² Atualmente, estas são uma das principais causas de morte nestes pacientes, que apresentam o triplo de risco de morte por doenças cardiovasculares que a população geral.^{2,3}

Dentre os fatores modificáveis, o exercício físico é uma das estratégias mais acessíveis e recomendadas por diversos órgãos, incluindo a Organização Mundial da Saúde para promover saúde e prevenir doenças. Pode modificar padrões de expressão geneticamente determinados através de mudanças epigenéticas no sentido de reduzir a frequência ou gravidade das doenças não comunicáveis e, assim, minimizar os efeitos das deficiências e o risco cardiovascular.⁴⁻⁶ Apesar dos reconhecidos benefícios do exercício físico para a prevenção e tratamento das doenças, a prevalência do sedentarismo se mantém constantemente elevada, admitindo-se que a pactuação para reduzir a inatividade física em 10% até 2025 não será alcançada.⁷

O comportamento sedentário imposto ou adotado é democrático e inclui as pessoas com LM, onde o grau de paralisia dos membros limita ou impossibilita o exercício voluntário, que aliado às diversas barreiras atitudinais, pessoais, físicas, financeiras, arquitetônicas mantém a inatividade física. Mesmo quando os pacientes a realizam, a intensidade do exercício é insuficiente para gerar adaptações cardiovasculares, tornando o teste cardiopulmonar (TCP) essencial para determinação dos limites de treinamento para adequação das intervenções.⁸

Uma das principais consequências da LM é a paralisia que limita ou impossibilita a marcha e no caso da tetraplegia adiciona-se a paralisia dos membros superiores, não permitindo a tarefa de caminhar, pedalar com os membros inferiores ou superiores.⁸

Assim, cresce o desafio de como prover treinamentos aeróbios que efetivamente promovam a saúde e previnam doenças nas pessoas com tetraplegia, dado que a cicloergometria com os membros superiores não é suficiente para melhorar a eficiência cardiovascular, em especial o consumo máximo de oxigênio (VO_2 máx).⁹

Considerando o menor acesso e oportunidades de treinamento aeróbio para pessoas com deficiência, quando este ocorre, precisa ser efetivo para gerar condicionamento cardiorespiratório, tornando o TCP importante para a prescrição de treinamentos com objetivos cardiovasculares, dada a maior exposição aos riscos à saúde das pessoas com LM.¹⁰ O TCP é a associação de um teste ergométrico convencional com a análise do ar expirado pelo paciente. Fornece medidas diretas de parâmetros respiratórios, como a capacidade de consumo de oxigênio pelos pulmões, produção de gás carbônico, frequência respiratória e ventilação pulmonar, revelando o real grau de condicionamento físico. Quando disponível, é recomendado como avaliação inicial para iniciar um programa de exercícios físicos de qualquer natureza, pois identifica a faixa ideal para o condicionamento aeróbio.¹¹

OBJETIVO

Descrever o TCP com estresse cardíaco por caminhada artifici-

almente gerada em exoesqueleto para marcha robotizada em esteira rolante com suspensão do peso corporal, na determinação das variáveis cardiorespiratórias do treinamento físico em paciente com LM alta, onde somente o teste farmacológico seria uma alternativa.

APRESENTAÇÃO DO CASO

Paciente de 55 anos, com tetraplegia C4 AIS B, sem capacidade de andar, foi submetido ao TCP para determinação do gasto energético e limites ventilatórios de treinamento. Foi empregado um sistema portátil de ergoespirometria de alta resolução com tecnologia respiração a respiração que realiza análise dos gases respiratórios em repouso ou sob estresse, para obtenção direta do consumo máximo de oxigênio (VO_2 Max). A Figura 1 revela o arranjo do paciente com a máscara coletora de gases, no exoesqueleto para marcha robotizada em esteira rolante com suspensão do peso corporal.



Figura 1. Paciente usando a máscara coletora de gases e posicionado no exoesqueleto para marcha robotizada em esteira rolante com suspensão do peso corporal

Para gerar estresse cardiovascular foi utilizado um exoesqueleto robótico automatizado que substituiu a movimentação espontânea do quadril e joelho com 80% de suspensão do peso corporal em esteira rolante, permitindo marcha com incrementos na velocidade e descarga de peso no solo, mesmo em pacientes com limitação ou impossibilidade para andar.¹²

RESULTADOS

O teste ergoespirométrico durou 20 minutos, com incremento progressivo de velocidade, com medida dos gases respiratórios, conforme a Tabela 1.

Tabela 1. Dados Metabólicos do teste cardiopulmonar em marcha artificialmente gerada por exoesqueleto robótico

V mph	T min	FC bpm	VE BTPS l/min	VO ₂ STPD l/min	VCO ₂ STPD l/min	VCO ₂ Rel ml/kg/min	VCO ₂ Rel ml/kg/min	Cal Tot kcal	VE/VO ₂	VE/VCO ₂	VO ₂ /FC ml/b
1,5	1	67	12,9	0,37	0,27	5,66	4,08	1,8	28,8	40	5,6
1,5	2	58	9,4	0,26	0,19	3,95	2,83	1,2	27,2	38,1	4,5
1,5	3	64	8,4	0,26	0,18	4,02	2,65	1,2	24,2	36,6	4,1
1,5	4	72	7,9	0,27	0,17	4,12	2,62	1,3	22,9	36	3,8
1,5	5	69	10,6	0,36	0,22	5,5	3,35	1,7	23,7	38,9	5,3
1,5	6	74	12,4	0,41	0,26	6,26	3,98	1,9	24,8	39,1	5,6
1,5	7	60	11,3	0,35	0,24	5,26	3,62	1,6	26,8	38,9	5,8
1,5	8	71	9,7	0,32	0,21	4,82	3,2	1,5	24	36,1	4,5
1,5	9	61	11,3	0,35	0,24	5,36	3,61	1,7	25,8	38,3	5,8
1,5	10	58	11	0,36	0,24	5,47	3,61	1,7	24,9	37,7	6,2
2	11	70	8,3	0,29	0,18	4,38	2,71	1,4	22,4	36,2	4,1
2	12	69	8,7	0,3	0,19	4,58	2,83	1,4	22,5	36,5	4,4
2	13	78	7,9	0,26	0,16	4,02	2,44	1,2	22,1	36,4	3,4
2	14	67	11	0,38	0,23	5,78	3,41	1,8	23,3	39,6	5,7
2	15	72	11,4	0,4	0,25	6,08	3,82	1,9	23,8	37,9	5,6
2	16	72	10	0,34	0,22	5,17	3,27	1,6	24,1	38,1	4,7
2	17	74	11,9	0,48	0,28	7,34	4,19	2,3	21,1	36,9	6,5
2	18	67	16,2	0,58	0,36	8,86	5,4	2,7	24,9	40,8	8,7
2	19	58	10,5	0,34	0,22	5,12	3,39	1,6	25,7	38,9	5,8
2	20	78	8,9	0,3	0,19	4,56	2,93	1,4	23,4	36,5	3,9

V, velocidade (mph); T, tempo (min); FC, frequência cardíaca; VE, Ventilação de oxigênio; BTPS, Body Temperature Pressure Saturated; VO₂, volume de oxigênio consumido; STPD, Standard Temperature Pressure Dry; VCO₂, volume de CO₂ expirado; Rel, relativo (considera o peso corporal em quilos); CAL TOT, Gasto energético. **Nota 1:** mph, milhas por hora; min, minutos; bpm, batidas por minuto; l/min; litros por minuto; ml/kg.min, mililitros por quilograma-minuto; Kcal, quilocaloria; ml/b, mililitros por batimento cardíaco; **Nota 2:** Variação VE/VCO₂ de 36,0 a 40,80 – Equivalente respiratório de dióxido de carbono / Variação VE/VO₂ de 21,10 a 28,80 – Equivalente respiratório de oxigênio

O traçado eletrocardiográfico não revelou alterações isquêmicas durante todo o tempo, mantendo-se em sinusal. Houve um incremento oscilante da frequência cardíaca, mas as trocas gasosas aconteceram durante o esforço físico, permitindo afirmar que houve aumento da demanda metabólica que foi suprida por adaptações respiratórias.

DISCUSSÃO

A realização do TCP na LM, no caso específico de tetraplegia, requer um preparo especial por apresentarem padrões ventilatórios alterados, caracterizados por volume corrente reduzido, maior frequência respiratória com hiperinsuflação dinâmica que podem contribuir para a redução observada da capacidade de exercício aeróbico.

No começo do teste, a paciente apresentava-se ansiosa pela máscara coletora de gases e pelo início dos exames, além de dificuldades inerentes à tetraplegia, justificando o aumento inicial da FC, que aos poucos foi se dissipando no transcorrer do tempo.

Contudo, a resposta cardíaca foi baixa diante do esforço. A literatura aponta que as pessoas com LM acima de T6 apresentam alterações simpáticas que interrompem a comunicação nervosa com o coração alterando a resposta cardiorrespiratória frente ao exercício.

Assim, os métodos indiretos de avaliação do consumo de oxigênio (VO₂), do gasto energético e a determinação dos limiares ventilatórios ficam dificultados pela razão de obter-se incremento de parâmetros cardiovasculares, tanto pela paralisia dos membros quanto pelas alterações autonômicas, restando como única alternativa os testes farmacológicos de estresse cardíaco.¹⁴ A literatura prévia sobre TCP convencional, para pessoas

com lesão medular, revela a preferência por protocolos de teste incremental com incrementos pequenos e individualizados por estágio para testar a capacidade aeróbica máxima. O teste submáximo é relevante para avaliar o desempenho nas intensidades da vida diária e para estimar o pico de VO₂. O teste de ergometria incremental de braço com pequenos incrementos por estágio é mais relevante para a avaliação do pico da capacidade cardiovascular. Para a avaliação do funcionamento da vida diária, o teste submáximo do ergômetro em cadeira de rodas é preferível.^{13,14} Mas há uma lacuna sobre TCP e formas para treinamento em tetraplégicos altos, sem movimentos de membros inferiores e superiores, onde o ciclismo manual e a impulsão de uma cadeira de rodas não são possíveis.

Por se tratar do primeiro caso na literatura da TCP em esteira rolante com exoesqueleto robotizado, o importante nesta avaliação foi observar a presença de comprometimento cardiopulmonar que implicaria na estabilidade de troca gasosa e consequentemente alterações na ventilação (alterações nos Equivalentes respiratórios) e no VO₂/FC (quantidade de O₂ transportada por volume sistólico). No caso, a paciente realiza o esforço físico de forma incremental progressiva e leve, e apresenta modificações da dinâmica pulmonar, refletida pela mensuração dos gases, ou seja, houve resposta respiratória adaptativa frente ao esforço físico artificialmente gerado pelo robô.

Desta forma, o exoesqueleto para marcha robotizada em esteira rolante com suspensão do peso corporal, pode ser uma alternativa não somente para treinamento¹⁵ mas também como tecnologia para se realizar um TCP em tetraplégicos com alto grau de comprometimento motor dos membros, contribuindo com parâmetros de estimativa de segurança para que estes pacientes possam realizar a reabilitação sem dificuldades ou

sintomas como dispneia, taquicardia ou lipotimia que ocorreriam em comprometimento mais acentuado.

CONCLUSÃO

O uso do mesmo equipamento (exoesqueleto para marcha robotizada em esteira rolante com suspensão do peso corporal) para duas finalidades distintas (avaliação do TCP e treinamento) pode facilitar o tratamento, pela menor necessidade de locomoção e agendamentos múltiplos, melhorar a comparabilidade dos resultados, com maior segurança, pois o TCP acontece numa atividade naturalística (andar) da mesma forma em que se pretende realizar o treinamento cardiovascular e de reabilitação. Este uso permite maior facilidade para a testar regularmente a capacidade cardiovascular durante a reabilitação da LM melhorando a comparabilidade dos resultados e o monitoramento do impacto das intervenções de reabilitação.

REFERÊNCIAS

- American Spinal Cord Injury Association [homepage on the Internet]. Richmond: The American Spinal Injury Association; c2023 [cited 2023 Oct 22]. Available from: <https://asia-spinalinjury.org/>
- Peterson MD, Berri M, Lin P, Kamdar N, Rodriguez G, Mahmoudi E, et al. Cardiovascular and metabolic morbidity following spinal cord injury. *Spine J.* 2021;21(9):1520-1527. Doi: [10.1016/j.spinee.2021.05.014](https://doi.org/10.1016/j.spinee.2021.05.014)
- DeVivo MJ, Chen Y, Wen H. Cause of death trends among persons with spinal cord injury in the United States: 1960-2017. *Arch Phys Med Rehabil.* 2022;103(4):634-41. Doi: [10.1016/j.apmr.2021.09.019](https://doi.org/10.1016/j.apmr.2021.09.019)
- Steinacker JM, van Mechelen W, Bloch W, Börjesson M, Casasco M, Wolfarth B, et al. Global Alliance for the Promotion of Physical Activity: the Hamburg Declaration. *BMJ Open Sport Exerc Med.* 2023;9(3):e001626. Doi: [10.1136/bmjsem-2023-001626](https://doi.org/10.1136/bmjsem-2023-001626)
- World Health Organization. Global status report on physical activity 2022. Geneva: WHO; 2022.
- Rimmer JH, Riley B, Wang E, Rauworth A, Jurkowski J. Physical activity participation among persons with disabilities: barriers and facilitators. *Am J Prev Med.* 2004;26(5):419-25. Doi: [10.1016/j.amepre.2004.02.002](https://doi.org/10.1016/j.amepre.2004.02.002)
- Guthold R, Stevens GA, Riley LM, Bull FC. Worldwide trends in insufficient physical activity from 2001 to 2016: a pooled analysis of 358 population-based surveys with 1.9 million participants. *Lancet Glob Health.* 2018;6(10):e1077-e1086. Doi: [10.1016/S2214-109X\(18\)30357-7](https://doi.org/10.1016/S2214-109X(18)30357-7)
- Dorton MC, Kramer JK, de Groot S, Post MWM, Claydon VE. Relationships between cardiovascular disease risk, neuropathic pain, mental health, and autonomic function in chronic spinal cord injury. *Spinal Cord.* 2023;61(10):548-555. Doi: [10.1038/s41393-023-00933-y](https://doi.org/10.1038/s41393-023-00933-y)
- Obaya HE, El-Moneim Abd El-Hakim AA, Fares HM, Eldin Saad MK, Abo Elyazed TI. Effect of different types of aerobic training on peak VO₂ and ejection fraction for diastolic heart failure patients; a comparative randomized control trial. *Physiother Res Int.* 2024;29(1):e2044. Doi: [10.1002/pri.2044](https://doi.org/10.1002/pri.2044)
- Lagu T, Schroth SL, Haywood C, Heinemann A, Kessler A, Morse L, et al. Diagnosis and management of cardiovascular risk in individuals with spinal cord injury: a narrative review. *Circulation.* 2023;148(3):268-277. Doi: [10.1161/CIRCULATIONAHA.123.064859](https://doi.org/10.1161/CIRCULATIONAHA.123.064859)
- Herdy AH, Ritt LE, Stein R, Araújo CG, Milani M, Meneghelo RS, et al. Cardiopulmonary Exercise Test: background, applicability and interpretation. *Arq Bras Cardiol.* 2016;107(5):467-481. Doi: [10.5935/abc.20160171](https://doi.org/10.5935/abc.20160171)
- Hidler J, Neckel N. Inverse-dynamics based assessment of gait using a robotic orthosis. *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc.* 2006;2006:185-8. Doi: [10.1109/IEMBS.2006.259392](https://doi.org/10.1109/IEMBS.2006.259392)
- Eerden S, Dekker R, Hetinga FJ. Maximal and submaximal aerobic tests for wheelchair-dependent persons with spinal cord injury: a systematic review to summarize and identify useful applications for clinical rehabilitation. *Disabil Rehabil.* 2018;40(5):497-521. Doi: [10.1080/09638288.2017.1287623](https://doi.org/10.1080/09638288.2017.1287623)
- Maher JL, McMillan DW, Nash MS. Exercise and health-related risks of physical deconditioning after spinal cord injury. *Top Spinal Cord Inj Rehabil.* 2017;23(3):175-187. Doi: [10.1310/sci2303-175](https://doi.org/10.1310/sci2303-175)
- Jack LP, Allan DB, Hunt KJ. Cardiopulmonary exercise testing during body weight supported treadmill exercise in incomplete spinal cord injury: a feasibility study. *Technol Health Care.* 2009;17(1):13-23. Doi: [10.3233/THC-2009-0528](https://doi.org/10.3233/THC-2009-0528)