

## **Uso Do Exoesqueleto De Membros Inferiores Na Reabilitação Em Lesados Medulares: Uma Revisão Integrativa**

### **Use of the Lower Limb Exoskeleton in Rehabilitation in Spinal Cord Injuries: An Integrative**

Valéria do Prado Greszeschen<sup>1</sup>, Anderson Bazo<sup>1</sup> e Patrícia Regina Righês Pereira<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidade de Caxias do Sul. Caxias do Sul, Brasil.

#### **RESUMO**

**Objetivo:** Identificar os benefícios do uso do exoesqueleto de membros inferiores na reabilitação de lesados medulares. **Materiais e métodos:** Trata-se de uma revisão integrativa, em que foram buscados materiais bibliográficos na base de dados PUBMED, através das palavras chaves selecionadas. **Resultados:** Através das informações obtidas, observou-se que todos os tipos de exoesqueletos trouxeram benefícios em pacientes com lesões medulares em relação a diminuição da espasticidade e dor, melhora da marcha independente, das funções vesicais e intestinais, equilíbrio e saúde mental, mesmo que os estudos apresentassem números de atendimentos dissemelhantes. **Conclusões:** Foi possível reconhecer a potencialidade dos exoesqueletos na reabilitação fisioterapêutica de pacientes com lesões medulares crônicas e agudas. No entanto, ainda há muitos desafios, visto que, é uma tecnologia recente e as áreas de robótica e engenharia encontram-se em constante evolução.

**Palavras-Chave:** Exoesqueletos; Neuroreabilitação, Tecnologia.

#### **ABSTRACT**

**Objective:** To identify the benefits of using lower limb exoskeleton in the rehabilitation of spinal cord injured patients. **Materials and methods:** This is an integrative review in which articles were searched in the PUBMED database, using the selected keywords. **Results:** Through the information obtained, it was observed that all types of exoskeletons brought benefits in patients with spinal cord injuries in relation to the decrease in spasticity and pain, improvement in independent walking, bladder and bowel functions, balance and mental health, even if the studies had different numbers of attendances. **Conclusions:** It was possible to recognize the potential of exoskeletons in the physiotherapeutic rehabilitation of patients with

chronic and acute spinal cord injuries. However, there are still many challenges, since it is a recent technology and the areas of robotics and engineering are constantly evolving.

**Keywords:** Exoskeletons; Neurorehabilitation; Technology.

## INTRODUÇÃO

A reabilitação fisioterapêutica neurofuncional em pacientes com lesão medular espinal (LM) é fundamental para otimizar função e promover a independência de cada paciente, pois a LM provoca um vasto comprometimento motor, sensorial e autônomo, impactando no âmbito biopsicossocial do indivíduo [1], [2].

No mundo, entre 250.000 e 500.000 pacientes, a cada ano, sofrem uma lesão na medula espinal, sendo que mais de 90% dos casos de LM são traumáticos e causados por incidentes como acidentes de trânsito ou quedas [2], [3], [4]. Dependendo da gravidade e localização da lesão, pode incluir perda parcial ou completa da função sensorial e/ou motora abaixo do nível da lesão [2], [3]. Sendo que lesões torácicas e abaixo desse nível podem causar paraplegia, enquanto que lesões em nível cervical estão associadas à tetraplegia [3].

A reabilitação de pacientes com LM é de suma importância, pois promove maior qualidade de vida e menor morbidade, dessa forma, se faz necessário trazer para prática clínica novas abordagens que possam potencializar a capacidade residual de cada paciente, e cada objetivo traçado no plano terapêutico. Sendo assim, o uso da tecnologia e inovação se torna cada vez mais visível nas reabilitações fisioterapêuticas, e por conta disso, um campo que vem chamando muita atenção.

Ao final da década de 60, o desenvolvimento de dispositivos de caminhada motorizados e robóticos começou a surgir [5]. Funcionam em grande parte detectando a intenção de movimento do usuário através dos sensores, e por meio de atuadores nas articulações dos membros, produzem e possibilitam o movimento [5]. São chamados de exoesqueletos, o termo vem de referência aos animais invertebrados, os moluscos e os artrópodes são exemplos, com suas conchas e carapaças, que funcionam como sendo um esqueleto externo que suporta o corpo desses animais [6]. Dessa forma, o dispositivo funciona como uma estrutura externa ao corpo humano, possuindo articulações energizadas, usados para aumentar a força e velocidade do usuário (por exemplo, aplicações militares e ergonômicas), como também, auxiliar na marcha humana. Nos últimos anos, evidências estão surgindo sobre os benefícios no uso dos exoesqueletos de membros inferiores na reabilitação de pessoas com LM [7].

Alguns artigos de revisão já mostraram os potenciais benefícios do uso dos exoesqueletos aliados na reabilitação neurológica, na dor, espasticidade, deambulação, qualidade de vida, funções vesico intestinais, sistema cardiovascular, e mudanças positivas no metabolismo, reduzindo assim, o risco de lesões secundárias em pacientes com lesões medulares crônicas e agudas [8], [9], [10]. Eles apontam que mais estudos são fundamentais para delinear alguns aspectos, como quantidade do uso e resultados, para que os fisioterapeutas entendam as suas limitações e oportunidades.

Dessa forma, há evidências que mostram os benefícios dos exoesqueletos, sendo que nos últimos anos, grandes melhorias foram feitas em relação ao desempenho, usabilidade e portabilidade para fins de assistência ao movimento. Considerando essa realidade, se faz necessário mais estudos, pois muitos desafios ainda permanecem, como no controle, mecânica e interface cérebro-máquina dos dispositivos, como também, na aplicação dos exoesqueletos na reabilitação e realidade clínica. Portanto, a presente revisão integrativa, tem como objetivo identificar os benefícios do uso do exoesqueleto de membros inferiores na reabilitação de lesados medulares.

## **METODOLOGIA**

Trata-se de uma revisão integrativa da literatura, com intuito de identificar, reunir e sintetizar conceitos e resultados [11]. Sendo assim, o objetivo do estudo foi analisar os benefícios do uso do exoesqueleto de membros inferiores na reabilitação de lesados medulares, aprofundando o conhecimento neste assunto, além de apontar possíveis lacunas existentes na literatura.

As buscas por materiais bibliográficos foram realizados através de artigos publicados na base de dado Pubmed, por meio das palavras chaves exoskeleton, technology, ReWalk, Indego, Ekso, REX, HAL, brain machine interface, locomotion, neurorehabilitation, além dos operadores booleanos “and”, “or” e “and not” que auxiliaram na combinação dos termos na busca da pesquisa. As coletas dos dados procederam-se no período de setembro de 2022 a outubro de 2022, sendo que entre março e julho, foram lidos os títulos e resumos dos artigos, e os mesmos lidos na íntegra, seguindo os critérios de inclusão e exclusão estabelecidos, em agosto e setembro de 2022.

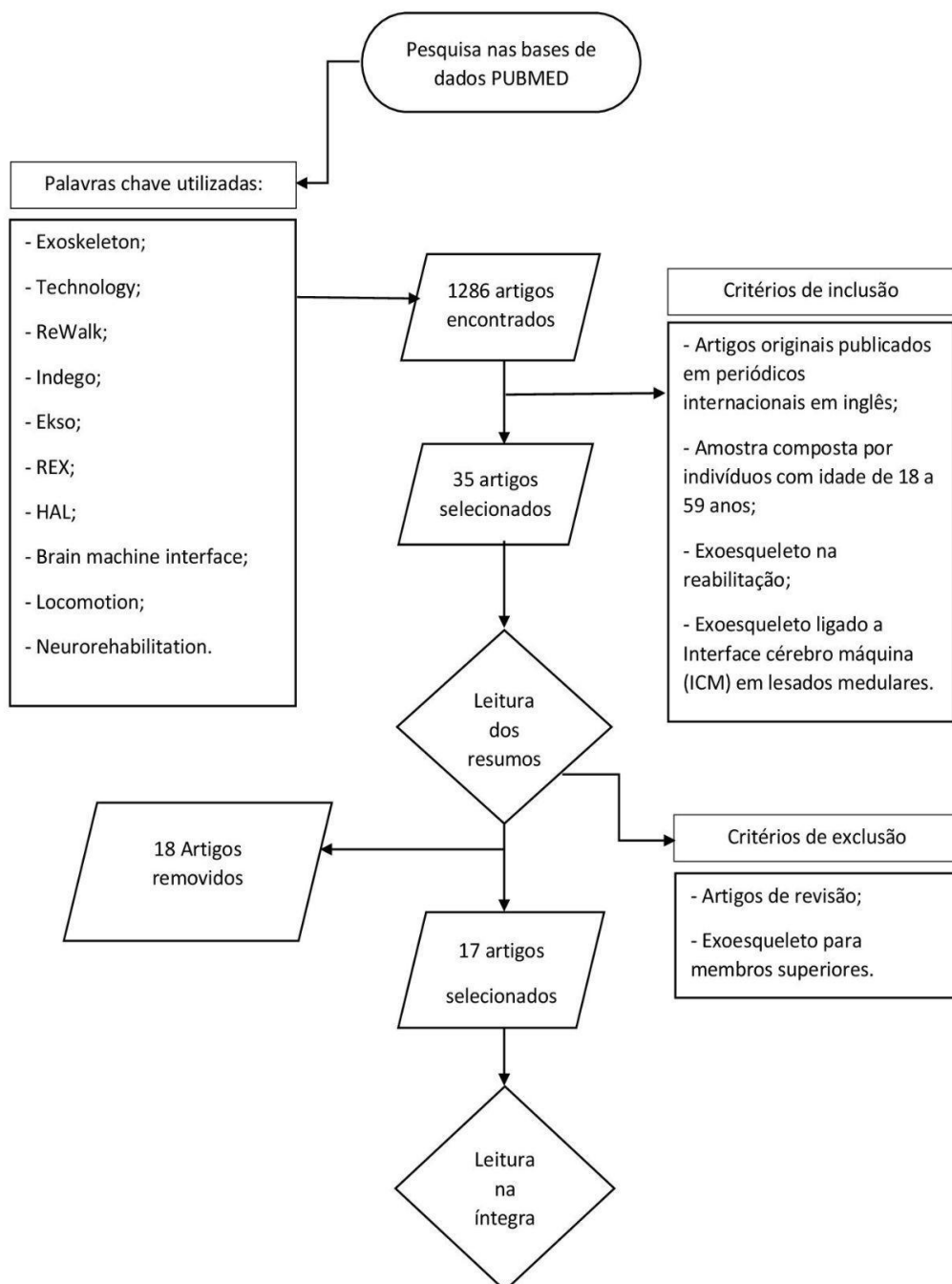
O recorte temporal foi de 2016 a 2022. Para atender os critérios de inclusão os artigos deveriam ser originais publicados em periódicos internacionais em inglês, ter uma amostra composta por indivíduos com idade de 18 à 59 anos, que usassem o exoesqueleto na reabilitação, ou o exoesqueleto ligado a Interface cérebro máquina (ICM) em lesados

medulares. Já os critérios de exclusão foram o uso de exoesqueleto para membros superiores e artigos de revisão.

## RESULTADOS

O fluxograma de seleção dos artigos encontra-se abaixo, mostra todo o processo de seleção e exclusão, constituindo como etapa final a análise crítica de todos os artigos, alcançando assim, o número total de 17 artigos selecionados (Figura 1). No quadro 1 contém a síntese dos periódicos e características da amostra, e no quadro 2 encontra-se a síntese dos principais achados sobre atendimentos, benefícios do exoesqueleto e instrumentos de avaliação.

**Figura 1.** Fluxograma da seleção dos estudos incluídos na revisão integrativa.



**Quadro 1.** Síntese dos periódicos e características da amostra.

Título	Autores	Periódico	Ano	País de desenvolvimento	EXO	Sexo e idade	ASIA	Nº de sujeitos	Nível da lesão
1. Effects of training with the ReWalk exoskeleton on quality of life in incomplete spinal cord injury: a single case study	Raab <i>et al.</i> (2016)	Spinal Cord Ser Cases	2016	Alemanha	ReWalk	1 homem/ 22 anos	C	1	T11
2. Perspectives of people with spinal cord injury learning to walk using a powered exoskeleton	Manns <i>et al.</i> (2019)	Journal Neuroeng Rehabil	2019	Canadá	ReWalk	4 homens 7 mulheres  Faixa etária: 5: 18 a 30 4: 31 a 50 2: 50 a 65	não avaliado	11	não mostrado
3. Retraining walking over ground in a powered exoskeleton after spinal cord injury: a prospective cohort study to examine functional gains and neuroplasticity	Khan <i>et al.</i> (2019)	Journal Neuroeng Rehabil	2019	Canadá	ReWalk	8 homens 4 mulheres  Faixa etária: 5: 18 a 30 5: 31 a 50 2: 50 a 65	1: D 2: B 3: C 6: A	12	Entre C7 e T10
4.Exoskeletal-assisted walking may improve	Tsai <i>et al.</i>	Spinal Cord Series and Cases	2021	EUA	ReWalk	6 homens 1 mulher	7: A 1: B	8	Entre T1 e T11

seated balance in persons with chronic spinal cord injury: a pilot study	(2021)					Mediana para idade: 53, varia de 37 a 64			
5. Improvement of quality of life after 2-month exoskeleton training in patients with chronic spinal cord injury	Nes <i>et al.</i> (2022)	The Journal of Spinal Cord Medicine	2022	Holanda	ReWalk	13 homens 8 mulheres  Mediana para idade: 36, varia de 24 a 57	20: A 1: B	21	Entre T3 e L1
6. Walking with a powered robotic exoskeleton: Subjective experience, spasticity and pain in spinal cord injured persons	Stampacchia <i>et al.</i> (2016)	Neurorehabilitation Journal	2016	Itália	Ekso	4 mulheres e 17 homens faixa etária 21-68 anos	12: A 2: B 7: D	21	C7: 4 Dorsal: 13 Lombar L1-L2: 4
7. Overground walking with a robotic exoskeleton elicits trunk muscle activity in people with high-thoracic motor-complete spinal cord injury	Alamro <i>et al.</i> (2018)	J Neuroeng Rehabil	2018	Canadá	Ekso e Lokomat	7 homens 1 mulheres Idade: entre 33 e 52 anos	6: A 2: B	8	Entre C7 e T4
8. Physiotherapy using a free-standing robotic exoskeleton for patients with spinal cord injury: a feasibility study	Postol <i>et al.</i> (2021)	J Neuroeng Rehabil	2021	Austrália	REX	2 mulheres 25/53 (idade respec) 1 homem 30 anos	1: A 1: C 1: B	3	C5 L3 C6
9. Exoskeleton gait training after spinal cord	Baunsgaard	J Rehabil Med	2018	Dinamarca,	Ekso	36 homens	Não	52	C1-C4

injury: An exploratory study on secondary health conditions	<i>et al.</i> (2018)			Alemanha, Holanda, Noruega, Espanha, Suécia e Suíça.		16 mulheres Mediana para idade 35.8 (27.5–52.6)	informado.		(n°4) C5-C8 (n°29) T1-S5 (n°19)
10. Changes in Bowel Function Following Exoskeletal-Assisted Walking in Persons with Spinal Cord Injury: An Observational Pilot Study	Chun <i>et al.</i> (2020)	The International Spinal Cord Society	2020	EUA	ReWalk	10 homens 1 mulher (31-65 anos)	9: A 2: B	11	Entre T2-T11
11. Examining the Effects of a Powered Exoskeleton on Quality of Life and Secondary Impairments in People Living With Spinal Cord Injury	Juszczak <i>et al.</i> (2018)	Top Spinal Cord Inj Rehabil	2018	EUA	Indego	37 homens 8 mulheres  35 anos mediana	A: 30 B: 5 C: 10	45	T1-T8 (n=27) T9-L2 (n=18)
12. Hybrid Assistive Limb Exoskeleton HAL in the Rehabilitation of Chronic Spinal Cord Injury: Proof of Concept; the Results in 21 Patients	Jansen <i>et al.</i> (2018)	World Neurosurgery	2018	Alemanha	HAL BWSTT	15 homens 6 mulheres  Idade: 44.8 DP	A: 10 B: 1 C: 7 D: 3	21	Entre C4 e L3
13. Rehabilitation of Acute Vs. Chronic Patients With Spinal Cord Injury With a Neurologically Controlled Hybrid Assistive Limb Exoskeleton: Is There a Difference in	Zieriacks <i>et al.</i> (2021)	Frontiers in Neurorobotics	2021	Alemanha	HAL BWSTT	89 homens (44.3 idade) 31 mulheres (16-74 anos)	A: 24 C: 61 D: 36	121	Cervical Torácico Lombar

Outcome?									
14. Influence of Locomotion Therapy With the Wearable Cyborg HAL on Bladder and Bowel Function in Acute and Chronic SCI Patients.	Brinkemper <i>et al.</i> (2021)	Global Spine Journal	2021	Alemanha	HAL	homens n = 26, mulheres n = 9  idade média de 46,85 ± 13,98 anos	A: 5 B:1 C: 22 D: 7	35	não mostrado
15. Long-Term Training with a Brain-Machine Interface-Based Gait Protocol Induces Partial Neurological Recovery in Paraplegic Patients	Donati <i>et al.</i> (2016)	Scientific Reports	2016	EUA	EXO + ICM	6 homens 2 mulheres Entre 26 e 36 anos	7: A 1: B	8	Entre T4 e T11
16. Training with brain-machine interfaces, visuo-tactile feedback and assisted locomotion improves sensorimotor, visceral, and psychological signs in chronic paraplegic patients	Shokur <i>et al.</i> (2018)	Plos One	2018	EUA	EXO + ICM	6 homens e 2 mulheres Entre 27–38 anos	7: A 1: B	8	Entre T4 e T11
17. Exoskeleton home and community use in people with complete spinal cord injury	Dijsseldonk <i>et al.</i> (2020)	Scientific Reports	2020	Holanda	ReWalk	7 homens e 7 mulheres Entre 24–49	13: A 1: B	14	Entre T1 e L1

**Legenda:** ASIA: (American Spinal Injury Association). ASIA “A” = Lesão Completa, sem preservação das funções motora e sensitiva no segmento sacral S4 – S5. ASIA “B” = Lesão Incompleta, perda da função motora, porém função sensitiva preservada abaixo do nível neurológico e inclui sensibilidade do segmento sacral S4-S5. ASIA “C” = Lesão Incompleta: função motora preservada abaixo do nível neurológico, e mais da metade dos músculos-chave abaixo do nível neurológico possuem grau de força inferior a 3 (apesar de haver contração muscular, não são capazes de vencer a gravidade). ASIA “D” = Lesão Incompleta: função motora preservada abaixo do nível neurológico, e mais da metade dos músculos-



chave abaixo do nível neurológico possuem grau de força igual ou superior a 3. ASIA “E” = Lesão Incompleta: função Motora e sensitiva são normais; Nível da lesão: C (cervical), T (torácico), L (lombar) e S (sacral); Exoesqueleto: HAL (Hybrid Assistive Limb) e REX (Exoesqueleto Rex Bionics); ICM: Interface Cérebro Máquina; BWSTT: Body Weight Supported Treadmill Training.

**Quadro 2.** Síntese dos principais achados sobre atendimentos, benefícios do exoesqueleto e instrumentos de avaliação.

<b>Título</b>	<b>Tempo de lesão</b>	<b>Total de Atendimentos/tempo</b>	<b>Benefícios do EXO</b>	<b>Instrumentos de avaliação</b>
1. Effects of training with the ReWalk exoskeleton on quality of life in incomplete spinal cord injury: a single case study	1 ano	120 atendimentos	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Recuperação parcial no controle das funções intestinais e da bexiga;</li> <li>- Andar de forma independente;</li> <li>- Aumento de ADM de flexão de quadril;</li> <li>- Movimento de extensão de joelho ativa;</li> <li>- Melhora da condição física.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Quality of life survey SF-36;</li> <li>- Goal attainment scale (GAS);</li> <li>- ASIA;</li> <li>- Modified Berg-Balance-Scale;</li> <li>- Aferição de sinais vitais (PA/FR);</li> <li>- Dynamic Gait Index.</li> </ul>
2. Perspectives of people with spinal cord injury learning to walk using a powered exoskeleton	entre 1 a 24 anos	12 atendimentos	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Quatro participantes tiveram diminuição em sua espasticidade;</li> <li>- Dois participantes referiram que a dor neuropática diminuiu durante o treinamento;</li> <li>- Melhora no bem-estar mental e emocional;</li> <li>- Interação social.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Questionário elaborado pelo próprio estudo.</li> </ul>
3. Retraining walking over ground in a powered exoskeleton after spinal cord injury: a prospective cohort study to	entre 1 a 24 anos	45 atendimentos	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aumento do equilíbrio estático e dinâmico em sedestação;</li> <li>- Aumento das sensações táteis;</li> <li>- Dor neuropática foi diminuída.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 10-Meter Walk Test;</li> <li>- The 6-Minute Walk Test;</li> <li>- International Standards for Neurological Classification of</li> </ul>

examine functional gains and neuroplasticity				<p>Spinal Med Injury;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Spinal Cord Assessment Tool for Spasticity;</li> <li>- McGill Pain Questionnaire Pain Rating Index.</li> </ul>
4.Exoskeletal-assisted walking may improve seated balance in persons with chronic spinal cord injury: a pilot study	entre 1 a 18 anos	30 atendimentos	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Melhora do equilíbrio estático e dinâmico em sedestação em pacientes com lesão medular crônica.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Seated balance testing;</li> <li>- Modified functional reach test.</li> </ul>
5. Improvement of quality of life after 2-month exoskeleton training in patients with chronic spinal cord injury	mais de 4 anos	24 atendimentos	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Redução da dor;</li> <li>- Melhora das funções da bexiga;</li> <li>- Melhora da qualidade de vida;</li> <li>- Melhora no bem-estar mental e emocional.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Short Form-36 with Walk Wheel modification;</li> <li>- Neurogenic Bladder Symptom Score;</li> <li>- Neurogenic Bowel Dysfunction Score;</li> <li>- Modified Ashworth Scale</li> </ul>
6. Walking with a powered robotic exoskeleton: Subjective experience, spasticity and pain in spinal cord injured persons	mais de 4 anos	9 atendimentos	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Redução da espasticidade;</li> <li>- Redução da dor;</li> <li>- Interação positiva robô-paciente;</li> <li>- Aceitabilidade do EXO.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pain assessed using a Numeric Rating Scale (NRS);</li> <li>- Ashworth;</li> <li>- Escala de Penn;</li> </ul>

				<ul style="list-style-type: none"> <li>- The patient's global impression of change.</li> </ul>
7. Overground walking with a robotic exoskeleton elicits trunk muscle activity in people with high-thoracic motor-complete spinal cord injury	entre 1 a 25 anos	5 atendimentos	<ul style="list-style-type: none"> <li>- A caminhada assistida por Ekso provocou maior ativação dos músculos do tronco (Reto abdominal, oblíquos externos, eretores da espinha).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Eletromiografia de superfície</li> </ul>
8. Physiotherapy using a free-standing robotic exoskeleton for patients with spinal cord injury: a feasibility study	não mostrado	24 atendimentos	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Melhora na qualidade de vida, humor e fadiga;</li> <li>- Aumento da força de quadríceps;</li> <li>- Melhora da massa corporal magra.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- The lower extremity motor scale <ul style="list-style-type: none"> <li>- The Tardieu scale</li> </ul> </li> <li>- The Five Times Sit to Stand Test <ul style="list-style-type: none"> <li>- The functional reach test <ul style="list-style-type: none"> <li>- Dinamômetro</li> </ul> </li> <li>- Biodynamics BIA 450</li> </ul> </li> </ul>
9. Exoskeleton gait training after spinal cord injury: An exploratory study on secondary health conditions	menos que 1 ano e até 2 anos	24 atendimentos	<ul style="list-style-type: none"> <li>- A espasticidade diminui;</li> <li>- Diminuição da dor;</li> <li>- Aumento da qualidade de vida em pacientes com lesão medular crônica.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ashworth Scale;</li> <li>- Spinal Cord Independence Measure;</li> <li>- Lower urinary tract;</li> <li>- Spasticity, range of motion;</li> <li>- Quality of life (questionnaire).</li> </ul>
10. Changes in Bowel Function Following Exoskeletal-Assisted	1 a 15 anos	25 atendimentos	<ul style="list-style-type: none"> <li>- melhora na frequência de evacuações intestinais;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- SCI-QOL Bowel Management Difficulties Short Form;</li> </ul>

Walking in Persons with Spinal Cord Injury: An Observational Pilot Study			<ul style="list-style-type: none"> <li>- redução do tempo gasto para evacuar por dia;</li> <li>- diminuição da frequência de uso de laxantes;</li> <li>- melhora na qualidade de vida relacionada à função intestinal.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Modified Lynch Gastrointestinal;</li> <li>- Bristol Stool Scale.</li> </ul>
11. Examining the Effects of a Powered Exoskeleton on Quality of Life and Secondary Impairments in People Living With Spinal Cord Injury	mais que 4 anos	26 atendimentos	<ul style="list-style-type: none"> <li>- apresentaram diminuição na espasticidade; <ul style="list-style-type: none"> <li>- diminuição da dor;</li> <li>- melhora das funções da bexiga</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Satisfaction with Life Scale;</li> <li>- Borg Scale of Perceived Exertion;</li> <li>- Ashworth Scale.</li> </ul>
12. Hybrid Assistive Limb Exoskeleton HAL in the Rehabilitation of Chronic Spinal Cord Injury: Proof of Concept; the Results in 21 Patients	entre 1 a 19 anos	60 atendimentos	<ul style="list-style-type: none"> <li>- melhora de suas disfunções intestinais e vesicais, sendo que dois pacientes foram capazes de interromper o autocateterismo;</li> <li>- aumento da força muscular de MsIs;</li> <li>- melhora da marcha sem o exoesqueleto.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Lower extremity motor score;</li> <li>- 10-meter walk test;</li> <li>- 6-minute walk test;</li> <li>- Timed up and go.</li> </ul>
13. Rehabilitation of Acute Vs. Chronic Patients With Spinal Cord Injury With a Neurologically Controlled Hybrid Assistive Limb Exoskeleton: Is There a Difference in Outcome?	menos de 1 ano e até 5 anos	60 atendimentos	<ul style="list-style-type: none"> <li>- melhora da marcha sem o exoesqueleto;</li> <li>- aumento da força muscular de MsIs</li> <li>- melhora do desempenho (tempo e distância) de caminhada com o exoesqueleto na esteira;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 10-meter walk test;</li> <li>- 6-minute walk test;</li> <li>- Walking index for spinal cord injury;</li> <li>- Lower extremity motor score.</li> </ul>
14. Influence of Locomotion Therapy With the Wearable Cyborg HAL on Bladder and Bowel Function in Acute	menos de 1 ano e até 5 anos	60 atendimentos	<ul style="list-style-type: none"> <li>- melhora da função vesical e intestinal (frequência, sensibilidade, consistência das fezes, uso de fraldas).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Wexner Score;</li> <li>- Cleveland Clinic Constipation Scoring System;</li> </ul>

and Chronic SCI Patients.				<ul style="list-style-type: none"> <li>- Self-developed questionnaire.</li> </ul>
<p>15. Long-Term Training with a Brain-Machine Interface-Based Gait Protocol Induces Partial Neurological Recovery in Paraplegic Patients</p>	entre 3 a 13 anos	2052 atendimentos	<ul style="list-style-type: none"> <li>- melhora da sensação somática (percepção tátil, proprioceptiva, vibratória e nociceptiva);</li> <li>- recuperação do controle motor voluntário abaixo do nível; <ul style="list-style-type: none"> <li>- melhora no índice de caminhada;</li> </ul> </li> <li>- 50% dos pacientes foram atualizados para uma classificação de paraplegia incompleta;</li> <li>- melhora na função gastrointestinal e na condição geral da pele;</li> <li>- melhora na força e estabilidade toraco-lombar; <ul style="list-style-type: none"> <li>- melhora sensório-motora;</li> <li>- diminuição da espasticidade;</li> <li>- melhora da independência funcional.</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- EEG;</li> <li>- ASIA;</li> <li>- Impairment Scale;</li> <li>- Semmes-Weinstein Monofilament Test;</li> <li>- Avaliação da temperatura, vibração, propriocepção e sensibilidade à pressão profunda;</li> <li>- Teste de força muscular;</li> <li>- Thoracic-Lumbar Scale;</li> <li>- Walking Index Spinal Cord Injury II;</li> <li>- Spinal Cord Independence Measurement III;</li> <li>- McGill Pain Questionnaire;</li> <li>- Visual Analogue Scale;</li> <li>- Medical Research Council; <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ashworth Scale;</li> </ul> </li> <li>- Lokomat L-stiff Evaluation for spasticity;</li> <li>- World Health Organization Quality of Life Assessment Instrument-Bref;</li> </ul>

				<ul style="list-style-type: none"> <li>- Rosenberg Self-Esteem Scale;</li> <li>- Beck Depression Inventory.</li> </ul>
16. Training with brain-machine interfaces, visuo-tactile feedback and assisted locomotion improves sensorimotor, visceral, and psychological signs in chronic paraplegic patients	entre 3 a 13 anos	Não informado	<ul style="list-style-type: none"> <li>- melhoras na função nociceptiva, tátil e proprioceptiva;</li> <li>- melhora em várias funções viscerais (bexiga, função intestinal e funções sexuais);</li> <li>- ganho no controle motor voluntário dos membros inferiores;</li> <li>- melhora significativa nos aspectos psicológicos;</li> <li>- atualização no grau da ASIA.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Escore somatossensorial;</li> <li>- Medidas de propriocepção;</li> <li>- Medição de vibração (diapasão);</li> <li>- Quality of life assessment</li> <li>- WHOQOL-BREF.</li> </ul>
17. Exoskeleton home and community use in people with complete spinal cord injury	igual ou mais que 6 meses	9 atendimentos	<ul style="list-style-type: none"> <li>- interação social ao nível dos olhos;</li> <li>- diminuição da espasticidade;</li> <li>- redução da dor neuropática</li> <li>- aumento da amplitude de movimento do quadril e do tronco.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Quebec User Evaluation of Satisfaction with assistive Technology (D-QUEST);</li> <li>- System Usability Scal.</li> </ul>

**Legenda:** ASIA: (American Spinal Injury Association). ASIA “A” = Lesão Completa, sem preservação das funções motora e sensitiva no segmento sacral S4 – S5. ASIA “B” = Lesão Incompleta, perda da função motora, porém função sensitiva preservada abaixo do nível neurológico e inclui sensibilidade do segmento sacral S4-S5. ASIA “C” = Lesão Incompleta: função motora preservada abaixo do nível neurológico, e mais da metade dos músculos-chave abaixo do nível neurológico possuem grau de força inferior a 3 (apesar de haver contração muscular, não são capazes de vencer a gravidade). ASIA “D” = Lesão Incompleta: função motora preservada abaixo do nível neurológico, e mais da metade dos músculos-chave abaixo do nível neurológico possuem grau de força igual ou superior a 3. ASIA “E” = Lesão Incompleta: função Motora e sensitiva são normais; ADM: Amplitude de movimento; EEG: Eletroencefalograma; MsIs: Membros inferiores.

## DISCUSSÃO

Na lesão medular a extensão dos acometimentos varia dependendo do nível e grau de lesão, podendo levar à paralisia ou paresia dos membros, alteração de tônus muscular, alteração dos reflexos superficiais e profundos, alteração ou perda das diferentes sensibilidades e efeitos na função intestinal, vesical, sexual e cardiovascular, trazendo um grande impacto na vida do ser humano pela repercussão física, psíquica, social e econômica [1]. Sendo assim, a mobilidade limitada e a função de marcha prejudicada são um dos grandes desafios na reabilitação neurológica. O treinamento intensivo e repetitivo específico, como na fisioterapia convencional gera vários benefícios, proporcionando mais autonomia ao indivíduo. No entanto, os exoesqueletos robóticos permitem uma experiência de caminhada e reabilitação mais eficaz, por justamente fornecer maior constância e precisão da deambulação, permitindo uma marcha mais próxima à marcha natural em comparação com a terapia de marcha convencional, inovação nos exercícios terapêuticos, inúmeros efeitos positivos nas funções fisiológicas, biológicas e psicológicas do lesado medular, além de reduzir a carga do terapeuta [12]. Desse modo, o objetivo geral do artigo foi avaliar os benefícios do exoesqueleto de membros inferiores na reabilitação de lesados medulares.

Dessa maneira, foi no século XXI que muitos estudos clínicos começaram a investigar a eficácia desses dispositivos na prática clínica, demonstrando os efeitos benéficos dos exoesqueletos na prevenção e desaceleração da progressão das complicações após lesão medular e posterior imobilização [13]. Sendo que somente a partir de 2014 os primeiros exoesqueletos motorizados, como o ReWalk e Indego puderam ser comercializados e aprovados para uso clínico pela Food and Drug Administration, órgão americano de regulamentação e fiscalização.

O estudo de *Khan et al* (2019)<sup>14</sup> mostrou que o uso do ReWalk em 45 sessões de treinamento em 12 lesados medulares crônicos, com nível de lesão entre C7 e T10, houve aumento da percepção de sensação tátil, e os participantes relataram níveis médios mais baixos de dor após cada sessão de treinamento. Ao final do treinamento todos os pacientes foram capazes de caminhar no ReWalk por cerca de 1 km sem descanso. Além disso, observou-se o aumento do equilíbrio estático e dinâmico em sedestação. Corroborando com o estudo de *Tsai et al.* (2021)<sup>15</sup> que teve como objetivo avaliar estes efeitos, em 8 lesados medulares crônicos, mas com nível de lesão em região torácica, durante uma média de 30 sessões, viu-se assim, que os participantes obtiveram melhora em seus testes de equilíbrio sentado após o treinamento com o ReWalk.

Já o estudo de Donati *et al.* (2016)<sup>16</sup>, utilizando a interface cérebro-máquina (ICM) em conjunto com o exoesqueleto, além da melhora na força e estabilidade tóraco-lombar de pacientes com lesão medular crônica e completa, em nível de região torácica, observou-se melhora da sensação somática (percepção tátil, propioceptiva, vibratória e nociceptiva), na recuperação do controle motor voluntário abaixo do nível da lesão, na melhora no índice de caminhada, melhora na função gastrointestinal, na qualidade de vida e diminuição da espasticidade, sendo que 50% dos pacientes foram atualizados para uma classificação de paraplegia incompleta, em 2052 atendimentos. Mais um estudo utilizando a ICM de Shokur *et al.* (2019)<sup>17</sup> com o mesmo protocolo, em pacientes com lesão medular crônica completa, em nível de região torácica, mostrou melhoras nestes mesmos aspectos, mas o total de atendimentos não foi apresentado pelo estudo, sendo a única diferença entre o estudo de Donati *et al.* (2016)<sup>16</sup>, é que Shokur *et al.* (2019)<sup>17</sup> se preocuparam em trazer resultados em relação a qualidade de vida mental dos participantes, se atendendo aos aspectos psicológicos, no qual, notaram melhora.

Todos os artigos que não utilizaram a interface cérebro máquina em conjunto com o exoesqueleto, não viu-se uma melhora em sensação somática (percepção tátil, propioceptiva, vibratória e nociceptiva), salvo o estudo de Khan *et al.* (2019)<sup>18</sup>, ora já mencionado, que percebeu-se melhora significativa em relação a percepção da sensação tátil, no qual, especularam que seria devido a necessidade impulsionada pela demanda por atender a todas as informações sensoriais residuais para caminhar com sucesso no ReWalk. Entretanto, no protocolo da ICM envolvia um treinamento em controle cerebral não invasivo de avatares virtuais com rico feedback visual e tátil, por meio da combinação de múltiplos sensores, pensa-se que por isso estes estudos mostraram uma melhora clínica consistente na sensação somática e no controle motor voluntário dos músculos abaixo da lesão medular, concluindo que a prática de longo prazo da neuroreabilitação integrada ao IMC pode promover a plasticidade cortical e espinhal [16], [17].

Dijsseldonk *et al.* (2020)<sup>19</sup> e Manns *et al.* (2019)<sup>20</sup>, utilizaram o ReWalk em pacientes com lesão crônica, e observaram maior interação social, redução da dor neuropática, melhora da qualidade de vida e conseqüentemente melhora no bem-estar mental e emocional. No entanto, o estudo de Dijsseldonk *et al.* (2020)<sup>19</sup>, também teve melhora das funções da bexiga e foi em 24 atendimentos em pacientes com nível de lesão entre T1 e L1, sendo que Manns *et al.* (2019)<sup>20</sup> o total de atendimentos foi 12 e o nível de lesão medular não foi mostrado.

Rabb *et al.* (2016)<sup>21</sup>, usaram o ReWalk em somente um paciente, com lesão crônica em região torácica, no total de 120 atendimentos, perceberam que ele recuperou parcialmente o



controle das funções intestinais e da bexiga, como também, aumento da sua amplitude de movimento em membros inferiores, e concomitante, melhora da condição física. Convergindo com os achados de Chun *et al* (2020)<sup>22</sup>, que tiveram como objetivo de estudo, explorar os efeitos do ReWalk na função intestinal em pessoas com lesão medular, verificando assim, melhora na frequência de evacuações intestinais, diminuição da frequência de uso de laxantes e melhora na qualidade de vida relacionada à função intestinal, em 25 atendimentos nos pacientes com lesão crônica em nível torácico.

Mais um estudo teve como objetivo explorar a influência da terapia de locomoção, mas dessa vez, com o Hybrid Assistive Limb Exoskeleton (HAL) de Brinkemper *et al* (2021)<sup>23</sup>, em um número amostral de 35 lesados medulares crônicos e agudos, num total de 60 atendimentos, expôs em seu artigo que todos melhoraram a função da bexiga em 28,24%, 31,43% dos pacientes crônicos e 23,08% dos pacientes agudos, pelo questionário que os pesquisadores desenvolveram.

Outros estudos, de Jansen *et al.* (2018)<sup>24</sup> e Zieriacks *et al.* (2021)<sup>25</sup>, utilizando o HAL em conjunto com a esteira com suporte de peso corporal, em um total de 60 atendimentos, constataram que houve melhora da marcha dos participantes sem o exoesqueleto, porém no artigo de Zieriacks *et al* (2021) eles avaliaram os resultados em 121 participantes com lesões agudas e crônicas, sendo que no estudo de Jansen *et al* (2018)<sup>24</sup> só haviam pacientes crônicos, ambas pesquisas demonstraram que os participantes se beneficiaram em todos os testes realizados, mas no estudo de Zieriacks *et al.* (2021)<sup>25</sup> os pacientes agudos obtiveram melhores resultados em relação a distância percorrida, quando comparados com os lesados crônicos. As duas pesquisas pontuaram melhora significativa dos participantes para a Lower Extremity Motor Score.

Nes Van *et al.* (2018)<sup>26</sup>, examinaram os efeitos do exoesqueleto Indego nas condições secundárias associados à lesão medular, bem como seu potencial impacto na qualidade de vida, dessa forma, os 45 participantes com lesão medular crônica, entre T1 e L2, apresentaram diminuição na espasticidade, melhora das funções da bexiga e diminuição da dor, mas nenhum impacto substancial na função intestinal, surpreendentemente, apesar da melhora substancial nas condições secundárias, não viu-se um impacto significativo na qualidade de vida geral dos participantes, através da escala de satisfação com a vida, concluíram que, embora haja melhorias na espasticidade, dor e função urinária, não é indicativo que isso resulte em uma melhora significativa na qualidade de vida.

Em consonância com o estudo de Baunsgaard *et al.* (2018)<sup>27</sup>, que apesar de utilizar outro tipo de exoesqueleto, Ekso, em 52 pacientes, lesados medulares crônicos e agudos entre C1 e

S5, também mostrou diminuição na espasticidade e nenhuma mudança significativa em função intestinal, mas notou-se o aumento da qualidade de vida, somente no grupo de lesão medular crônica, nos lesados medulares agudos nenhuma mudança significativa ocorreu, uma explicação poderia ser que a qualidade de vida é conhecida por melhorar nos anos seguintes à lesão. Na revisão integrativa realizada, todos os artigos que analisaram a qualidade de vida em seus participantes, tiveram resultados positivos, porém os pacientes eram lesados medulares crônicos.

Stampacchia *et al.* (2016)<sup>28</sup>, usou o Ekso em 9 atendimentos nos 21 pacientes com lesão medular crônica entre C7 e L2, observando, em conformidade com Baunsgaard *et al.* (2018)<sup>27</sup>, redução da espasticidade, da dor, além da interação positiva robô paciente em relação a sua aceitabilidade. Alamro *et al.* (2018)<sup>29</sup> utilizou o Ekso em conjunto com o Lokomat (esteira com sustentação de peso) com o objetivo de comparar os padrões de ativação muscular do tronco entre as duas situações, em pessoas com lesão crônica entre C7 e T4 durante 5 atendimentos. Pois, ainda que usados para facilitar o treinamento de marcha, eles diferem na forma como fazem essa função. Dessa maneira, o Ekso provocou maior ativação dos músculos do tronco, em relação aos pacientes que usaram a esteira de suspensão, por conta que o Ekso requer uma participação ativa do usuário, em razão do deslocamento do peso corporal ao utilizar um auxiliar de marcha enquanto mantém o equilíbrio em ortostase.

O exoesqueleto REX atualmente é o único dispositivo comercialmente disponível, no qual não é necessário o uso de dispositivo auxiliar de marcha, Postol *et al.* (2021)<sup>7</sup> utilizaram o REX em 3 pacientes com lesão medular entre C5 e L3, durante 24 atendimentos, mostraram tendências positivas na funcionalidade, fadiga, qualidade de vida e humor, aumento da força de quadríceps, e melhora da massa corporal magra, evidenciando que o uso do REX, é aceitável, seguro e alcançável, no contexto de uma intervenção, principalmente em pacientes com lesão medular alta, no entanto, o número amostral foi pequeno, portanto mais estudos precisam explorar o REX que acaba se tornando único, no sentido de seu controle ser um joystick.

Apesar das diferenças entres os tipos de exoesqueletos, ReWalk, HAL, Indego e Ekso, todos mostraram benefícios, principalmente em relação a diminuição da espasticidade e dor, melhora da marcha independente, das funções vesicais e intestinais e equilíbrio, mesmo que os estudos apresentassem números de atendimentos dissemelhantes [22], [23], [24]. O único dispositivo que pode-se observar resultados mais diferentes foi em relação ao REX, acredita-se que seja pelo fato de não possuir dispositivo auxiliar de marcha, ser mais pesado em comparação aos demais, e por ter apenas poucos estudos em relação aos seus benefícios, justamente por requerer que tenha-se uma amostra com pacientes mais dependentes, entretanto,

sabe-se que é um exoesqueleto que possui potencial, exatamente por ser o único a não precisar de dispositivo auxiliar de marcha, permitindo que pacientes com lesões medulares mais altas e com pouco controle de tronco possam ficar em postura ortostática, e até mesmo deambular [7].

## CONCLUSÃO

No presente estudo, foi possível reconhecer a potencialidade dos exoesqueletos na reabilitação fisioterapêutica de pacientes com lesões medulares crônicas e agudas. Observou-se melhora na funcionalidade, força, mobilidade, equilíbrio, qualidade de vida, funções vesicais e intestinais, dor, espasticidade e saúde mental. No entanto, ainda encontram-se muitos desafios, visto que, é uma tecnologia recente e as áreas de robótica e engenharia encontram-se em constante evolução. Em meio a este receptivo cenário, as pesquisas com os exoesqueletos estão começando a surgir e demonstrar o seu potencial benefício na prática clínica. Desse modo, se torna evidente o fomento e a busca por estudos que investiguem as vantagens, como também, as carências e lacunas na usabilidade e portabilidade dos exos, descobrindo novos campos que a fisioterapia pode adentrar e novos caminhos que a reabilitação pode seguir. Tendo em vista a relevância do tema, esse estudo de revisão integrativa poderá servir como embasamento para futuras pesquisas na área de reabilitação através da robótica.

## REFERÊNCIAS

1. ARI, Karina Lourenço da Silva *et al.* **Técnicas fisioterapêuticas utilizadas na reabilitação de pacientes com lesão medular - estudo de revisão.** Connectionline. 2019 Jan 8; 2:15025. doi: 10.18312/connectionline.v0i20.1244.
2. JOE, Bennett *et al.* **Spinal Cord Injuries.** [Updated 2022 May 11]. In: StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2022 Jan. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK560721/>.
3. ALIZADEH, Arsalan *et al.* **Traumatic Spinal Cord Injury: An Overview of Pathophysiology, Models and Acute Injury Mechanisms.** Front Neurol. 2019 Mar 22;10:282. doi: 10.3389/fneur.2019.00282.
4. WHO, Who Health Organization. **Spinal cord injury.** 2013, November 19.

5. MARCHAND, Dave K *et al.* **Motorized Walking Devices for Patients with Compromised Mobility: A Review of Clinical Effectiveness, Cost-Effectiveness, and Guidelines** [Internet]. Ottawa (ON): Canadian Agency for Drugs and Technologies in Health; 2019 Aug 22. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK549362/>.
6. BLANKENSTEYN, Arno. **Zoologia dos invertebrados II**. Florianópolis: Biologia/EaD/UFSC, 2010. Disponível em: <https://uab.ufsc.br/biologia/files/2020/08/Zoologia-de-Invertebrados-II.pdf>. Acesso em: 24 maio 2022.
7. POSTOL, Nicola *et al.* **Physiotherapy using a free-standing robotic exoskeleton for patients with spinal cord injury: a feasibility study**. J Neuroeng Rehabil. 2021 Dec 25;18(1):180. doi: 10.1186/s12984-021-00967-4.
8. JAYARAMAN, Arun *et al.* **Use of Lower-Limb Robotics to Enhance Practice and Participation in Individuals With Neurological Conditions**. Pediatr Phys Ther. 2017 Jul; 29 Suppl 3:S48-S56. doi: 10.1097/PEP.0000000000000379.
9. MEKKI, Marwa *et al.* **Robotic Rehabilitation and Spinal Cord Injury: a Narrative Review**. Neurotherapeutics. 2018 Jul; 15(3):604-617. doi: 10.1007/s13311-018-0642-3.
10. FEDERICI, Stefano *et al.* **The effectiveness of powered, active lower limb exoskeletons in neurorehabilitation: A systematic review**. NeuroRehabilitation. 2015; 37(3):321-40. doi: 10.3233/NRE-151265.
11. PAIVA, Marlla Rúbya Ferreira *et al.* **Metodologias ativas de ensino-aprendizagem: revisão integrativa**. SANARE [Internet]. 2017 Jan; 15(2). Disponível em: <https://sanare.emnuvens.com.br/sanare/article/view/1049>.
12. LUSARDI, Roberto *et al.* **Living With Assistive Robotics: Exploring the Everyday Use of Exoskeleton for Persons With Spinal Cord Injury**. Front Med Technol. 2021 Oct 8;3:747632. doi: 10.3389/fmedt.2021.747632.

13. RUTHENBERG, Benjamin *et al.* **An experimental device for investigating the force and power requirements of a powered gait orthosis.** *J Rehabil Res Dev.* 1997 Apr; 34(2):203-13.
14. RAAB, Katharina *et al.* **Effects of training with the ReWalk exoskeleton on quality of life in incomplete spinal cord injury: a single case study.** *Spinal Cord Ser Cases.* 2016 Jan 7; 2:15025. doi: 10.1038/scsandc.2015.25.
15. MANNS, Patricia J. **Perspectives of people with spinal cord injury learning to walk using a powered exoskeleton.** *J Neuroeng Rehabil.* 2019 Jul 19; 16(1):94. doi: 10.1186/s12984-019-0565-1.
16. DONATI, Ana R. C. *et al.* **Training with a Brain-Machine Interface-Based Gait Protocol Induces Partial Neurological Recovery in Paraplegic Patients.** *Sci Rep.* 2016 Aug 11; 6:30383. doi: 10.1038/srep30383.
17. SHOKUR, Solaiman *et al.* **Training with brain-machine interfaces, visuo-tactile feedback and assisted locomotion improves sensorimotor, visceral, and psychological signs in chronic paraplegic patients.** *PLoS One.* 2018 Nov 29; 13(11):e0206464. doi: 10.1371/journal.pone.0206464.
18. KHAN, Atif S. *et al.* **Retraining walking over ground in a powered exoskeleton after spinal cord injury: a prospective cohort study to examine functional gains and neuroplasticity.** *J Neuroeng Rehabil.* 2019 Nov 21; 16(1):145. doi: 10.1186/s12984-019-0585-x.
19. VAN DIJSSELDONK, Rosanne B. *et al.* **Improvement of quality of life after 2-month exoskeleton training in patients with chronic spinal cord injury.** *J Spinal Cord Med.* 2022 Apr 4: 1-7. doi: 10.1080/10790268.2022.2052502.
20. MANNS, Patricia J. *et al.* **Perspectives of people with spinal cord injury learning to walk using a powered exoskeleton.** *J Neuroeng Rehabil.* 2019 Jul 19; 16(1):94. doi: 10.1186/s12984-019-0565-1.

21. RAAB, Katharina *et al.* **Effects of training with the ReWalk exoskeleton on quality of life in incomplete spinal cord injury: a single case study.** Spinal Cord Ser Cases. 2016 Jan 7; 2:15025. doi: 10.1038/scsandc.2015.25.
22. CHUN, Audrey *et al.* **Changes in bowel function following exoskeletal-assisted walking in persons with spinal cord injury: an observational pilot study.** Spinal Cord. 2020 Apr; 58(4):459-466. doi: 10.1038/s41393-019-0392-z.
23. BRINKEMPER, Alexis *et al.* **Influence of Locomotion Therapy With the Wearable Cyborg HAL on Bladder and Bowel Function in Acute and Chronic SCI Patients.** Global Spine J. 2021 Apr 16:21925682211003851. doi: 10.1177/21925682211003851.
24. JANSEN, Oliver *et al.* **Hybrid Assistive Limb Exoskeleton HAL in the Rehabilitation of Chronic Spinal Cord Injury: Proof of Concept; the Results in 21 Patients.** World Neurosurg. 2018 Feb; 110:e73-e78. doi: 10.1016/j.wneu.2017.10.080.
25. ZIERIACKS, Amrei *et al.* **Rehabilitation of Acute Vs. Chronic Patients With Spinal Cord Injury With a Neurologically Controlled Hybrid Assistive Limb Exoskeleton: Is There a Difference in Outcome?** Front Neurobot. 2021 Oct 27; 15:728327. doi: 10.3389/fnbot.2021.728327.
26. VAN NES, Ilse J.W. *et al.* **Exoskeleton home and community use in people with complete spinal cord injury.** Sci Rep. 2020 Sep 24; 10(1):15600. doi: 10.1038/s41598-020-72397-6.
27. BAUNSGAARD, Carsten Bach *et al.* **Exoskeleton gait training after spinal cord injury: An exploratory study on secondary health conditions.** J Rehabil Med. 2018 Sep 28; 50(9):806-813. doi: 10.2340/16501977-2372.
28. STAMPACCHIA, Giulia *et al.* **Walking with a powered robotic exoskeleton: Subjective experience, spasticity and pain in spinal cord injured persons.** NeuroRehabilitation. 2016 Jun 27;39(2):277-83. doi: 10.3233/NRE-161358.

29. ALAMRO, Raed *et al.* **Overground walking with a robotic exoskeleton elicits trunk muscle activity in people with high-thoracic motor-complete spinal cord injury.** *J Neuroeng Rehabil.* 2018 Nov 20;15(1):109. doi: 10.1186/s12984-018-0453-0.