

A Neuromodulação Não Invasiva Pode Ser Um Recurso Para Aprimorar A Função Motora Em Pessoas Com Lesão Medular Incompleta? Uma Revisão De Literatura

Can Noninvasive Neuromodulation Improve Motor Function in People with Incomplete Spinal Cord Injury? A Literature Review

Estimulação Transespinhal Em Lesão Medular

Keyte Guedes da Silva¹, Lilian Viana Matias Lopes² (G45428-6)

Lilian Viana Matias Lopes

Travessa Miguel Guerra, Nº 12 - São Bernardo do Campo - SP

(11) 99771-5206

lilian.lobes10@aluno.unip.br

1. Pós-doutoranda em Ciências da Reabilitação Pela Universidade de São Paulo; Docente do Curso de Fisioterapia da Universidade Paulista (UNIP).

2. Graduanda do Curso de Fisioterapia da Universidade Paulista (UNIP)

Os autores declaram não haver conflito de interesse.

Universidade Paulista
Curso de Fisioterapia - Campus Anchieta

2025

**PROTOCOLO DE AVALIAÇÃO DA PRODUÇÃO TÉCNICO-CIENTÍFICA
INTERDISCIPLINAR**

NOME	RA	REGIME*	CAMPUS
Lillian Viana Matias Lopes	G45428-6	Regular	Anchieta


*Regular ou Tutelado

Orientador: Keyte Guedes da Silva

Título do trabalho: A Neuromodulação Não Invasiva Pode Ser Um Recurso Para Aprimorar A Função Motora Em Pessoas Com Lesão Medular Incompleta? Uma Revisão De Literatura

Tipo de trabalho: REVISÃO PESQUISA DE CAMPO

Tipo de apresentação: BANNER TEMA LIVRE

	Nota Orientador	Nota Apresentação	Nota PTCI	Nota Final
Banner	Dez (10,0) 	9,5	10,0	9,8

Keyte Guedes S.
Fisioterapeuta
CPF: 311131744-4

	Nota Orientador	Média Apresentação	Nota PTCI	Nota Final
Tema Livre				

Coordenação do Curso de Fisioterapia

RESUMO

A lesão medular espinhal (LME) é uma condição neurológica grave que compromete vias sensório-motoras e limita significativamente a função motora e a qualidade de vida. A neuromodulação não invasiva tem surgido como uma estratégia promissora para potencializar a neuroplasticidade e favorecer a recuperação motora em indivíduos com LME. Este estudo teve como objetivo investigar as evidências disponíveis na literatura sobre a eficácia da neuromodulação não invasiva na melhora da função motora em pessoas com lesão medular incompleta. Foi realizada uma revisão bibliográfica nas bases PubMed, ScienceDirect e PMC Central, entre fevereiro e outubro de 2025, utilizando descritores em português e inglês relacionados a eletroestimulação transespinhal e corrente contínua, com inclusão de estudos publicados entre 2015 e 2024. Treze artigos atenderam aos critérios de inclusão. Os resultados apontaram que as técnicas de estimulação transespinhal (tSCS) e estimulação transespinhal por corrente contínua (tsDCS), quando associadas ao treino locomotor, promoveram melhorias significativas na força muscular, na velocidade e resistência da marcha, na postura e na ativação da musculatura voluntária, indicando efeitos positivos. Concluindo que a neuromodulação não invasiva é um recurso promissor para aprimorar a função motora em indivíduos com LME incompleta, especialmente quando combinadas a terapias baseadas em atividades motoras. Porém, ainda são necessários mais estudos com maiores amostras, parâmetros de estimulação, acompanhamento a longo prazo e mais ensaios clínicos randomizados para consolidação de protocolos eficazes.

Descritores: Lesão medular, Neuromodulação não invasiva, Eletroestimulação transespinhal, Corrente contínua, Função motora.

ABSTRACT

Spinal cord injury (SCI) is a severe neurological condition that compromises sensory and motor pathways, resulting in significant functional limitations and reduced quality of life. Non-invasive neuromodulation has emerged as a promising strategy to enhance neuroplasticity and promote motor recovery in individuals with SCI. This study aimed to investigate the available evidence in the literature regarding the effectiveness of non-invasive neuromodulation in improving motor function in individuals with incomplete spinal cord injury. A literature review was conducted in the PubMed, ScienceDirect, and PMC Central databases between February and October 2025, using Portuguese and English descriptors related to transspinal stimulation and direct current stimulation, including studies published between 2015 and 2024. Thirteen studies met the inclusion criteria. The results indicated that transspinal stimulation (tSCS) and transspinal direct current stimulation (tsDCS) techniques, when combined with locomotor training, promoted significant improvements in muscle strength, gait speed and endurance, posture, and voluntary muscle activation, suggesting positive effects on functional recovery. It is concluded that non-invasive neuromodulation represents a promising approach to enhance motor function in individuals with incomplete SCI, especially when combined with activity-based motor therapies. However, further research with larger sample sizes, standardized stimulation parameters, long-term follow-up, and additional randomized clinical trials is still needed to establish effective and consolidated protocols.

Descriptors: Spinal cord injury; Noninvasive neuromodulation; Transspinal electrical stimulation; Direct current; Motor function.

INTRODUÇÃO

A lesão da medula espinhal (LME) é uma condição grave que afeta a integridade das vias neurais ascendentes e descendentes, resultando em comprometimento sensório-motor.¹ Trata-se de uma lesão caracterizada por perda funcional abaixo do nível da lesão, devido à destruição direta de estruturas neuronais, gliais e axonais, além de múltiplos eventos bioquímicos secundários desencadeados da lesão primária, como formação do tecido cicatricial, e desmielinização ao redor do local da lesão.¹⁻²

Essa condição pode ser ocasionada por uma lesão externa de origem traumática ou por condições congênitas/ processos patológicos de origem não traumática.³ A LME causa alteração no funcionamento sensorial, motor e autonômico, afetando a qualidade de vida e autonomia dos pacientes.⁴ Essas alterações afetam diretamente o bem estar físico, psicológico e social negativamente, deixando-os mais propensos a desenvolver complicações, e provocando limitação na execução das atividades básicas de vida diária.⁵

Apesar das limitações impostas pela LME, o cérebro e a medula espinhal possuem a capacidade de realizar alterações funcionais e estruturais, sendo capazes de modificar as redes neurais envolvidas no controle motor.⁶ Essas mudanças são conhecidas como plasticidade neuronal e podem ser induzidas por tecnologias de neuromodulação, incluindo modalidade de estimulação que visam a excitabilidade cortical (estimulação cerebral não invasiva), ou que visam indiretamente os circuitos corticais usando estimulação nervosa periférica (estimulação transespinhal por corrente contínua).⁷ Estas abordagens modulam as vias na medula espinhal, com o objetivo de facilitar a plasticidade espinhal e promover a reabilitação após a lesão neural da medula.⁸

A estimulação transespinhal por corrente contínua (tsDCS) produz neuromodulação em amplas redes neurais espinhais, facilitando a recuperação da função motora, aumentando a excitabilidade das redes espinhais privadas de entrada descendentes e potencializando a resposta aos sinais provenientes das vias descendentes ao retorno das informações sensoriais.⁹ A corrente de forma contínua pode ser administrada de forma transcutânea (não invasiva) ou epidural (invasiva), sendo capaz de gerar potenciais evocados transespinhal (TEPs) nos músculos dos membros superiores e inferiores. Esses TEPs têm características

neurofisiológicas específicas, sendo mediados por mecanismos de ativação não sináptica direta dos motoneurônios e pela excitação transsináptica indireta de vias descendentes e interneurônios espinhais locais.⁶

A estimulação transcutânea da medula espinhal (tSCS) é utilizada através de impulsos elétricos para regular a atividade neural, estimulando os neurônios dentro da medula espinhal mediante correntes elétricas, modificando suas propriedades eletrofisiológicas e tendo influência sobre a função dos nervos subsequentes. A tSCS pode ajustar as redes neurais da medula espinhal através da estimulação contínua e pulsada, otimizando as capacidades motoras e sensoriais, ativando as vias nervosas e espinhais remanescentes, aumentando a recuperação da função motora. Quando combinada com a estimulação magnética transcraniana (TMS), podem estimular os neurônios, melhorar a passagem de sinais neurais e estimular a recuperação da função neurológica.¹⁰

A estimulação espinhal transcutânea (TSS) pode ser compreendida como uma forma de estimulação do nervo periférico, uma vez que seus principais efeitos ocorrem sobre as fibras aferentes de grande calibre das raízes nervosas espinhais. Evidências indicam que esse tipo de estimulação pode promover melhora na cinemática da marcha e potencializar os efeitos do treinamento locomotor em indivíduos com LME incompleta. Ensaios clínicos randomizados sugerem que a plasticidade depende do uso, e quando associada a estimulação neuromodulatória, pode influenciar positivamente o desempenho de tarefas motoras, além de modular a excitabilidade neural relacionada a espasticidade e a dor.¹¹

Estudos têm demonstrado que a estimulação transespinhal pode promover a ativação dos músculos paralisados, induzindo padrões rítmicos semelhantes de locomoção e promovendo respostas motoras em músculos antes inativos durante a marcha assistida por robôs em pacientes com LME.^{6,12} Evidências indicam que os efeitos motores induzidos pela estimulação transespinhal podem estar associados a processos de neuroplasticidade em níveis cortical, córticoespinhal e espinhal.⁶ Resultados de estudos recentes indicam que ambos os tipos de correntes (transcutânea ou epidural) em combinação com programas de reabilitação baseados em atividades podem melhorar a função motora após LME.¹²

Embora os estudos sejam promissores, há lacunas importantes presentes na literatura. Não há consenso sobre os parâmetros ideais para a estimulação (intensidade, frequência, duração e posicionamento dos eletrodos), nem sobre a melhor aplicação para diferentes perfis e fatores clínicos como o tempo e gravidade da lesão. A grande maioria dos estudos é abordada em adultos jovens com lesões motoras completas e incompletas. Além disso, são escassos os dados sobre os efeitos da estimulação a longo prazo e a eficácia da estimulação transespinhal por corrente contínua na região lombar, deixando evidente a necessidade de reunir, analisar e discutir os dados disponíveis.

Portanto, esta revisão teve como objetivo investigar as evidências disponíveis na literatura científica sobre a neuromodulação não invasiva como recurso terapêutico na LME considerando a análise de parâmetros e seus efeitos sobre a função motora.

MÉTODOS

Este trabalho consistiu em uma revisão bibliográfica sobre a aplicação da neuromodulação não invasiva para tratamento motor em indivíduos com LME. O estudo foi conduzido a partir da análise de artigos científicos disponíveis em bases de dados conhecidas na área da saúde.

A pesquisa foi realizada nas bases de dados PubMed, ScienceDirect, PMC Central, utilizando os seguintes descritores em português: “Eletroestimulação Transespinal”, “Corrente Contínua”, “Lesão Medular”, “Neuromodulação Não Invasiva” e “Eletroestimulação Transespinal Lombar”. E os seguintes descritores em inglês: “Trans-spinal Electrical Stimulation”, “Spinal Cord Injury”, “Spinal Cord Stimulation”, “Noninvasive Neuromodulation” and “Lumbar Trans-spinal Electrical Stimulation”. Para aumentar a precisão da busca, foram aplicados operadores booleanos em inglês, como AND e OR, conforme necessário.

Os critérios de inclusão foram artigos de ensaios clínicos, artigos de estudos clínicos randomizados e artigos de estudos de casos, disponíveis em português e inglês, e que abordam o uso da neuromodulação não invasiva na capacidade motora de indivíduos com lesão medular, englobando os seus efeitos sobre o sistema musculoesquelético e sistema neuromuscular, publicados entre os anos de 2015 e 2025. Estudos de revisão literária, revisões sistemáticas, artigos de meta-análise e artigos que não abordassem diretamente a temática foram excluídos.

A busca e análise dos artigos ocorreram entre fevereiro e outubro de 2025, seguindo um processo sistemático de leitura e seleção dos conteúdos mais relevantes.

Os artigos foram organizados e analisados inicialmente quanto ao título e resumo, considerando os objetivos, métodos e principais achados de cada estudo. Os resultados foram categorizados de acordo com a abordagem terapêutica utilizada e seus efeitos sobre a capacidade motora da população específica do estudo.

RESULTADOS

Foram encontrados nas bases de dados 196 artigos. Deste foram excluídos 183 artigos por motivo de duplicação (n=05), tempo de publicação superior a 10 anos (n=90), artigos revisão sistemática (n=37), meta-análise (n=11), ou que não abordaram a eletroestimulação transespinal como tratamento (n=29), artigos que abordaram apenas lesões completas (n=9), artigos de projeto de estudo (n=2). Como resultado, 13 artigos foram incluídos na análise no presente estudo. O fluxograma abaixo demonstra detalhadamente o processo descrito (Figura 1).

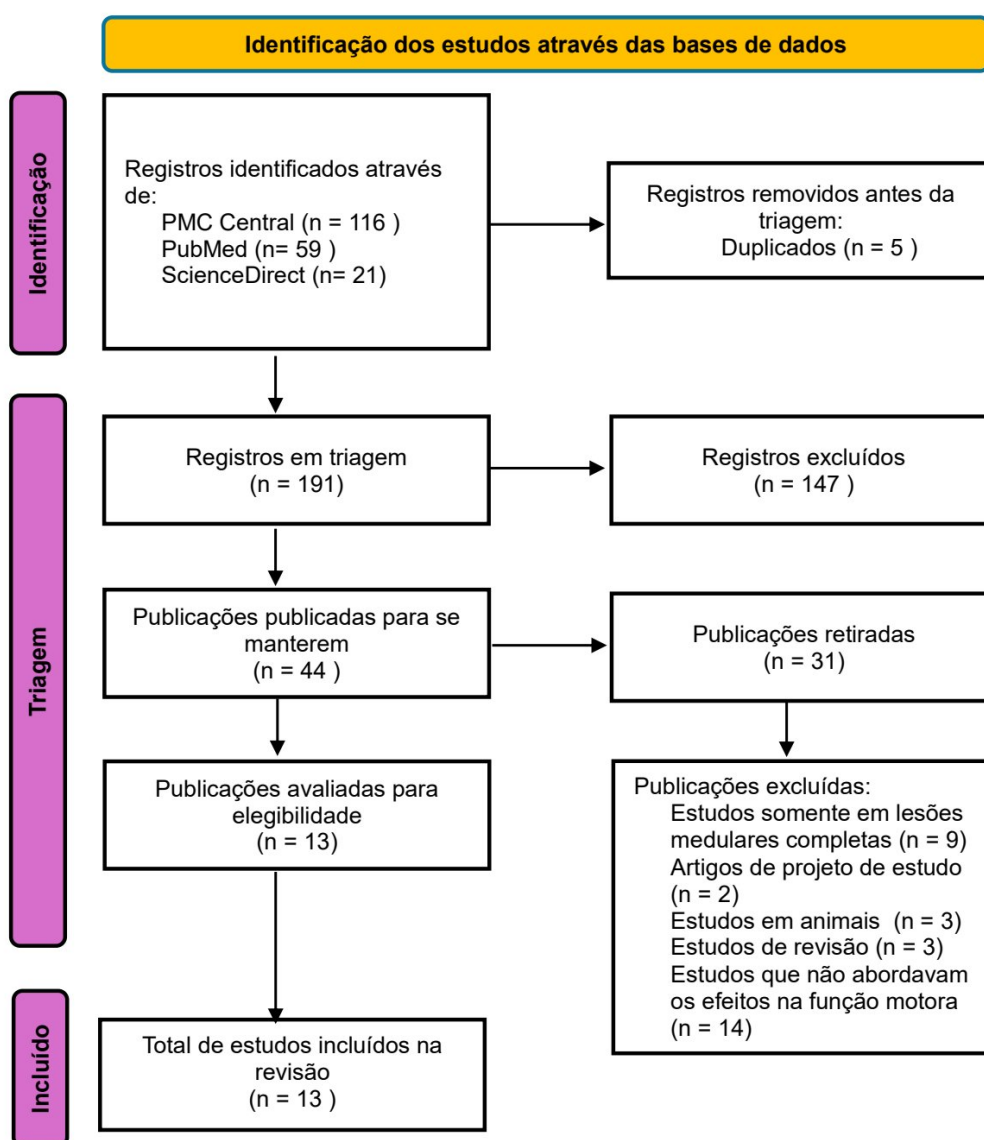


Figura 1. Fluxograma de seleção dos artigos para revisão bibliográfica. n= número. Fonte: PRISMA.

Os artigos incluídos estão brevemente descritos no Quadro 1.

QUADRO 1. Extração de dados de acordo com o tipo de estimulação.

Autores /Ano	Tipo de Estudo	Característica da Amostra	Tipos de Intervenção	Principais Variáveis Analisadas	Resultados Significativos
Estimulação Transespinal (tSCS)					
Kumru et al ¹³ (2024)	Estudo randomizado	N=10 Indivíduos - LMI crônica AIS D Idade Média = 43,3 anos	- tSCS segmentar ou multisegmentar aplicada em C5, L1, Coc1, C5+L1, C5+Coc1, L1+Coc1, C5+L1+Coc1 - Parâmetros: 30Hz, 1ms, 50 à 60mA - Tempo de aplicação: 2 Minutos	- Marcha: TC6 - Força muscular quadríceps e TA -Excitabilidade espinal Razão Hmáx/Mmáx	A tSCS aplicada em (C5-L1-Coc1) melhorou o tempo de caminhada, aumentou a força do músculo TA e reduziu a excitabilidade espinal (Hmáx/Mmáx), de forma similar ou superior à estimulação em segmentos únicos ou duplos.
Tefertiller et al ¹⁴ (2022)	Série de casos prospectivos	N=7 Indivíduos - LM Crônica 4= LMC, 3= LMI 4 AIS B, 3 AIS C-D Idade Média= 27,7 anos	- tSCS+ treino: 1,5h de treino de membros superiores + 1,5h de treino de membros inferiores, com tSCS aplicada na coluna cervical e toracolombar - Parâmetros: 30Hz, 1ms - Tempo de aplicação: 60 minutos	- Função de MS CUE-T, UEMS - Função de MI LEMS, TC10m, TC6 - Sensação - Escala de incapacidade AIS - Teste de nove buracos - Teste de ficar em pé por 5 minutos	Melhorias na função de MS CUE-T) em todos os participantes. 2 participantes melhoraram sua classificação AIS (B para C, C para D), e 2 melhoraram seu nível neurológico de lesão (C4 para C5, C5 para C6).A sensibilidade melhorou em 5 participantes e todos os 4 com AIS B ativaram voluntariamente os MI durante a estimulação.
Pulverenti et al ¹⁵ (2022)	Ensaio clínico randomizado simples-cego	N=10 Indivíduos - LMI e LMC crônica Idade Média = 43,2 anos	- Treino locomotor Lokomat + estimulação pareada - EMT - tSCS - Parâmetros: 31 à 45mA, 13 à 20ms - Tempo de aplicação: 40 minutos	- EMG, TEPs modulados por fase durante a marcha assistida.	Ambos os protocolos aumentaram a produção de neurônios motores. Os efeitos foram maiores nos músculos extensores. Aumento da produção motora extensora do joelho durante a fase de apoio e a transição do balanço para o apoio.
Pulverenti et al ¹⁶ (2021)	Ensaio clínico randomizado simples-cego	N=14 Indivíduos - LMI e LMC crônica AIS A-D	- Treino locomotor com Lokomat + PAS - TMS - tSCS	- Modulação do reflexo H do sóleo - Atividade EMG muscular	PAS Transespinal, TMS + treino promoveu depressão do reflexo H à direita na fase de balanço. PAS, TMS,

		Idade Média = 43,3 anos	<ul style="list-style-type: none"> - Parâmetros: 1ms - Tempo de aplicação: 40 minutos 		Transespinhal+ treino, promoveu facilitação do reflexo H esquerdo durante a postura intermediária e balanço inicial. Melhora na modulação da EMG muscular durante a marcha.
Al'Joboori et al ¹⁷ (2020)	Estudo de coorte.	<p>N=7 Indivíduos</p> <ul style="list-style-type: none"> - LMI e LMC Crônica AIS A à D <p>Idade entre= 28 à 69 anos</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Grupo STIM: treino + tSCS - Grupo: NÃO-STIM apenas treino - Treino de sentar e levantar - Parâmetros: 30Hz, 1ms, 40 e 110mA - Tempo de aplicação: 40 minutos 	<ul style="list-style-type: none"> - Avaliação ISNCSCI - BMCA - Atividade EMG de membros inferiores - Qualidade de vida SF-36 - Independência funcional SCIM 	Participantes com LMI no grupo STIM aumentaram os escores motores ISNCSCI e melhoraram consideravelmente a atividade muscular voluntária com controle da flexão e extensão da perna esquerda e a capacidade de mover livremente o pé direito. Nenhuma mudança no grupo NÃO-STIM. Melhora em subcategorias do SF-36 no grupo STIM.
McHugh et al ¹⁸ (2020)	Série de casos prospectivos	<p>N=10 Indivíduos</p> <ul style="list-style-type: none"> - LMI Crônica AIS C-D <p>Idade entre = 22 à 64 anos</p>	<ul style="list-style-type: none"> - tSCS - Fisioterapia baseada em caminhada - Parâmetros: 50Hz, 1ms, 20à 80mA - Tempo de aplicação: 30 minutos 	<ul style="list-style-type: none"> - Viabilidade - Dor - Eventos adversos - Resposta cutânea - TC10m - TC6m - TUG - WISCI-II. 	Melhoras significativas em todas as medidas de função de caminhada: velocidade da marcha (TC10m), resistência (TC6m), mobilidade funcional e na pontuação no WISCI-II.
Murray & Knikou ¹⁹ (2019)	Estudo experimental	<p>N=10 Indivíduos</p> <ul style="list-style-type: none"> - LMI e LMC 5 AIS C-D, 5 AIS A-B <p>- 10 Indivíduos controle saudáveis</p> <p>Idade entre = 19 à 51 anos</p>	<ul style="list-style-type: none"> - tSCS de baixa frequência na região toracolombar - Parâmetros: 0,2Hz, 1ms - Tempo de aplicação: 40 minutos 	<ul style="list-style-type: none"> - EMG, TEPs em sóleo, Gastrocnêmio Medial, fibular longo, TA, isquiotibiais medial e lateral, reto femoral e grácil - Depressão homosináptica. 	A tSCS aumentou a responsividade do neurônio motor em participantes com LMI e LMC. Melhora músculos do joelho em controles e LMC AIS A-B, e em músculos do tornozelo e joelho em LMI AIS C-D. A depressão homosináptica e pos-ativação das TEPs foram observados no grupo controle.
Sayenko et al ²⁰ (2019)	Estudo duplo-cego, cruzado e controlado.	N=15 Indivíduos	- tSCS em T11-T12 ou L1-L2	- Capacidade de manter a postura em pé autoassistida	Todos os participantes conseguiram ficar em pé com

		<p>- LMI e LMC AIS A à C crônica</p> <p>Idade entre = 23 à 53 anos</p>	<p>- Durante a postura em pé autoassistida.</p> <p>- Parâmetros: 0,2 à 30Hz, 1ms, 150mA</p> <p>- Sem informações adicionais a respeito da dosagem de aplicação</p>	<p>ou minimamente assistida</p> <p>- Atividade EMG de membros inferiores</p> <p>-Deslocamento do centro de pressão COP</p>	<p>assistência mínima ou auto assistida apenas durante a tSCS eficaz, com controle de equilíbrio durante a postura em pé, melhorando a qualidade do controle postural com o treino. A atividade muscular das pernas emergiu durante a tSCS e dependeu da carga de peso.</p>
Estimulação Espinhal Transcutânea (TSS)					
Krenn et al ²¹ (2023)	Estudo Experimental	<p>N= 9 Indivíduos</p> <p>-LMI crônica AIS C/D</p> <p>Idade entre = 21 à 57 anos</p>	<p>- TSS contínua</p> <p>- Durante marcha robótica Lokomat</p> <p>- Parâmetros: 1 à 100Hz, 1ms, Intensidade definida individual</p> <p>- Sem informações adicionais a respeito da dosagem de aplicação</p>	<p>- Torque robótico quadril/joelho</p> <p>- Atividade EMG em Reto femoral, Isquiotibiais mediais, tibial anterior, Sóleo</p>	<p>Foram identificados 4 grupos de perfis motores com mudanças dependentes da frequência e fase da marcha. 4 participantes tiveram mudanças nos torques robóticos que foram maiores com o aumento da frequência de estimulação e coincidiram com a diminuição do EMG.</p>
Finn et al ²² (2023)	Estudo Experimental metodológico	<p>N=9 Indivíduos</p> <p>- LMI e LMC AIS A-D</p> <p>- 9 sem LME</p> <p>Idade Média = 42 anos</p>	<p>- TSS em T11-linha média, L1-linha média, L1-EIAS</p> <p>- Parâmetros: Estímulos de pulso único ou sequência de pulso 1ms, 20Hz, 100à 400mA</p> <p>- Sem informações adicionais a respeito da dosagem de aplicação</p>	<p>- Intensidade do limiar, classificação, latência</p> <p>- Amplitude do sEMR e EMG nos músculos VM, Isquiotibial, TA e Gastrocnêmio Medial</p>	<p>Os limiares e resposta motora evocadas espinhal foi 13% menor com pulso único em participantes sem LM, mas não alterou nos participantes com LM. A incidência de sEMR foi menor com sequências de estimulação em ambos os grupos devido à intolerância à estimulação.</p>
Calvert et al ²³ (2021)	Estudo experimental.	<p>N=9 Indivíduos</p> <p>- LMI e LMC Crônica AIS A à C</p> <p>Idade entre= 22 à 36 anos</p>	<p>- EES</p> <p>- TSS</p> <p>- Parâmetros: 0,2 à 2Hz, 1ms, 0-150mA</p>	<p>- Respostas motoras evocadas</p> <p>- EMG em vasto lateral, Isquiotibial, tibial anterior, e</p>	<p>Inibição significativa das respostas evocadas em todos os músculos EMG registrados durante as tentativas voluntárias de realizar a flexão da</p>

			<ul style="list-style-type: none"> - Aplicada em repouso e durante tentativa de contração voluntária. - Sem informações adicionais da dosagem de aplicação 	sóleo durante relaxamento e contração voluntária.	perna em comparação a quando estava relaxada. Redução das respostas evocadas em participantes com LMI (AIS B/C) com TSS e em AIS A com EES.
Estimulação Transespinal por Corrente Contínua (tsDCS)					
Adeel et al ²⁴ (2022)	Estudo controlado randomizado, simples-cego.	<p>N=9 Indivíduos</p> <ul style="list-style-type: none"> - LMI crônica AIS B-D <p>Idade Média = 54,22 anos</p>	<ul style="list-style-type: none"> - rTMS - tsDCS - iTBS <p>1- Grupo controle (rTMS e tsDCS + ciclismo)</p> <p>2- rTMS 20Hz + tsDCS + ciclismo</p> <p>3- rTMS+ iTBS + tsDCS + ciclismo</p> <ul style="list-style-type: none"> - Parâmetros: 2,5mA - Tempo de aplicação: 20 minutos 	<ul style="list-style-type: none"> - Limiar motor em repouso - Latência e amplitude do MEP - Latência do reflexo-H - LEMS - Escala de Ashworth Modificada 	rTMS-20Hz/tsDCS e rTMS-iTBS/tsDCS melhoraram significativamente a latência do MEP. rTMS-20Hz/tsDCS melhorou a amplitude do MEP de forma significativa. rTMS-iTBS/tsDCS melhorou significativamente o LEMS
Hawkins et al ²⁵ (2022)	Estudo de viabilidade, randomizado cego	<p>N=8 Indivíduos</p> <ul style="list-style-type: none"> - LMI Crônica AIS C-D <p>Idade Média = 52,8 anos</p>	<ul style="list-style-type: none"> - tsDCS+ treino locomotor - Sham+ treino locomotor - Parâmetros: 2,5mA - Tempo de aplicação: 30 minutos 	<ul style="list-style-type: none"> - Segurança e tolerabilidade - Realização do protocolo - TC10m - TC6m 	3 de 4 participantes no grupo tsDCS+TL atingiram uma diferença clinicamente importante para velocidade de marcha, contra 1 de 4 no grupo sham+TL.

Abreviações: LME- lesão da medula espinhal, AIS- Escala de deficiência da American Spinal Injury Association, tSCS- estimulação transcutânea da medula espinhal, TC6- teste de caminhada de 6 minutos, CVM- contração voluntária máxima, TA- tibial anterior, Hmáx/Mmáx- reflexo H máximo/resposta M máxima, TSS- Estimulação medular transcutânea, EMG- eletromiografia, sEMR- resposta motora evocadas pela medula, LMC- lesão medular completa, LMI- lesão medular incompleta, CUE-T – teste de capacidades dos membros superiores, LEMS- pontuação motora LE, UEMS- pontuação motora UE, TC10m- teste de caminhada de 10 metros, tsDCS- estimulação transespinal por corrente contínua, rTMS- estimulação magnética transcraniana repetitiva, iTBS- estimulação intermitente de explosão teta, MEP- potencial evocado motor, TEPs- potenciais evocadas transespinais, PAS- estimulação associativa pareada, EES- estimulação espinhal epidural, ISNCSCI- avaliação dos padrões internacionais para classificação neurológica de lesão medular, BMCA- avaliação do controle motor cerebral, SCIM- medida de independência da medula espinhal, WISCI-II- índice de caminhada para lesão medular II, TUG- timed up and go.

DISCUSSÃO

Esta revisão teve como objetivo investigar as evidências disponíveis na literatura sobre a neuromodulação não invasiva, como recurso terapêutico em lesão medular incompleta, com análise de parâmetros e seus efeitos sobre a função motora. Foram analisados estudos que utilizaram diferentes tipos de neuromodulação não invasiva e diferentes protocolos, obtendo resultados promissores na recuperação motora pós-LME.

Estudos como de Tefertiller et al¹⁴(2022), McHugh et al¹⁸(2020) e Al'Joboori et al¹⁷(2020), aplicaram a tSCS lombar durante treinos funcionais de marcha ou sentar e levantar e observaram melhorias significativas em parâmetros motores e funcionais. Neste estudo, os autores observaram melhorias na capacidade dos membros superiores avaliado pelo CUE-T, escores motores, sensação e classificação ASIA. Similarmente, Al'Joboori et al¹⁷(2020) relataram aumentos nos escores motores da ASIA, bem como da ativação muscular voluntária e melhora na qualidade de vida (SF-36), enquanto McHugh et al¹⁸(2020) demonstraram melhorias clinicamente significativas na velocidade e resistência da marcha (TC10M, T6M). Em comum os três estudos citados utilizaram a tSCS como modalidade de neuromodulação com largura de pulsos de 1ms de duração, com frequência variando entre 30 e 50Hz, e intensidade ajustadas ao limiar motor ou de parestesia e demonstrando consistência nos efeitos positivos da corrente, assim como destacando sua capacidade de potencializar o recrutamento motor e sensorial quando aplicado de forma simultânea ao treinamento locomotor.^{14,17,18}

De forma semelhante, Sayenko et al²⁰(2019) e Kumru et al¹³(2024) aplicaram a tSCS em segmentos lombares e cervicais, reforçando os resultados da tSCS observados nos estudos citados anteriormente na facilitação de padrões motores como manter a postura ereta e marcha. Tais autores utilizaram tSCS bifásica e monofásica, com frequência de 0,2 a 30Hz, largura de pulsos de 1ms e intensidade até 150mA em T11-L2 para estimulação da ativação muscular para extensão de joelhos e quadris, promovendo a postura ereta independente ou com mínimo auxílio. No entanto, no estudo os autores não especificam o tempo de aplicação e o período do treinamento, dificultando a reprodução do mesmo.^{13,20}

Outros autores observaram melhora da ativação muscular dos membros inferiores e um impacto positivo da tSCS na marcha. Segundo Kumru et al¹³(2024), a tSCS segmentar e multissegmentar em C5-L1-Coc1, com frequência de 30Hz e largura de pulsos de 1ms, por curtos períodos, proporcionou melhora no tempo total de caminhada e na força do tibial anterior, por meio da redução na excitabilidade espinhal e aumento de força muscular. Apesar da similaridade de utilização da tSCS entre os estudos, ambos tiveram respostas diferentes devido ao posicionamento dos eletrodos, tempo de aplicação e o objetivo funcional do estudo, porém convergem com a ideia de que a modulação segmentar e multissegmentar permite recrutar diferentes circuitos espinhais, otimizando a recuperação funcional.¹³

Krenn et al²¹(2023) e Finn et al²²(2023) mostraram em seus estudos as variações na TSS para marcha e respostas motoras, explorando a variação de frequência e posicionamento dos eletrodos. Krenn et al²¹(2023) aplicaram TSS contínua com frequência de 1-100Hz e largura de pulsos de 1ms, durante marcha robótica, reduzindo torque robótico e clônus em fases de balanço, promovendo um padrão mais fisiológico de contração. E, Finn et al²²(2023) aplicaram a TSS em T11-linha média, L1-linha média e L1-EIAS, porém a aplicação em L1-linha média, se mostrou significativamente superior exigindo menores intensidades de corrente para eliciar respostas motoras evocadas (sEMR). Os trens de pulsos resultaram em um limiar de excitabilidade 13% menor do que os pulsos únicos no grupo de participantes sem LME, mas não alteraram em participantes com LME. Ambos avaliaram a EMG e obtiveram resultados positivos, Finn et al²²(2023) nos parâmetros neurofisiológicos de excitabilidade e Krenn et al²¹(2023) no desempenho funcional durante a marcha robótica.²¹⁻²²

Os efeitos da TSS e da tSCS aplicados separadamente em baixa frequência foram analisados nos estudos conduzidos por Calvert et al²³(2021) e Murray & Knikou¹⁹(2019). Em ambos estudos a estimulação foi aplicada na região tóracolombar entre T10-L2 e na região entre abdome/crista ilíaca com frequências de 0,2-2,0Hz. Nos estudos citados, a largura de pulsos foi de 1ms e a EMG foi o principal método de avaliação. Calvert et al²³(2021) observaram uma inibição das respostas motoras evocadas durante contração voluntária. E,

Murray & Knikou¹⁹(2019) observaram que a estimulação aplicada em repouso resultou em aumento da excitabilidade e do ganho de recrutamento dos motoneurônios, evidenciado pela amplificação das TEPs, em músculos distais (sóleo e tibial anterior) de participantes com LME incompleta, e em músculos proximais de participantes com LME completa.^{19,23}

O estudo de Adell et al²⁴(2022) comparou o efeito da iTBS, rTMS/tsDCS ou rTMS de 20Hz pareada com a tsDCS em indivíduos com LME crônica incompleta e focaram em marcadores eletrofisiológicos como o potencial evocado motor (MEP), limiar motor de repouso (RTM) e H-reflex, evidenciando melhora significativa na amplitude, latência, e a LEMS. Adicionalmente, Hawkins et al²⁵(2022) aplicaram a tsDCS contínua durante treino locomotor, resultando em diferença clinicamente importante na velocidade da marcha em 3 de 4 participantes com LME incompleta crônica. Ambos os estudos utilizaram uma intensidade de 2,5mA aplicada por 20 a 30 minutos, sendo suficiente para gerar mudanças neurofisiológicas e funcionais. Os dois demonstraram efeitos positivos da tsDCS, especialmente quando associada a uma tarefa motora. Enquanto Hawkins et al²⁵(2022) demonstraram benefícios funcionais diretos sobre a marcha, Adell et al²⁴(2022) evidenciaram alterações neurofisiológicas compatíveis com processos de neuroplasticidade, podendo melhorar a função motora em indivíduos com LME crônica incompleta.

A estimulação associativa pareada (PAS) apresentada nos estudos de Pulverenti et al¹⁵ (2022) e Pulverenti et al¹⁶(2021), demonstram a estimulação magnética transcutânea (TMS) sincronizada com a estimulação Transespinhal (tSCS). Em ambos os estudos, a estimulação transespinhal (tSCS) foi aplicada de T10 a L1-L2 com catódo único e ânodos bilaterais no abdome ou sobre as cristas ilíacas, utilizando largura de pulso de 1ms e frequência de 0,2Hz. Em ambos os estudos o intervalo inter-estímulo (ISI) foi individualizado para cada participante. Pulverenti et al¹⁵(2022) aplicaram o protocolo PAS durante treino de marcha assistida, avaliando a modulação reflexa e observaram que a sequência TMS/transespinhal facilitou a excitabilidade espinhal na fase de apoio, enquanto a sequência Transespinhal/TMS promoveu depressão reflexa na fase de balanço.¹⁵

Já Pulverenti et al¹⁶(2021) aplicou a PAS combinada com treino locomotor robótico, e observaram uma modulação mais fisiológica, com aumento da produção motora em músculos extensores (sóleo e vasto lateral) durante a fase de apoio e redução da produção em flexores (isquiotibiais) durante a fase de balanço. Ambos os estudos analisaram a EMG e parâmetros neurofisiológicos relacionados a modulação do reflexo-H e os potenciais evocados durante diferentes fases da marcha. Os resultados dos dois estudos demonstram que a combinação sincronizada de TMS/tSCS, aplicada em baixa frequência e com ISI ajustado individualmente, pode ter bons resultados na ativação motora durante a marcha.¹⁶

Apesar dos resultados positivos observados nesta revisão, ainda existem limitações importantes quanto ao uso da neuromodulação não invasiva em lesões medulares incompletas. Entre as principais barreiras estão a falta de padronização dos protocolos com grande variação entre parâmetros, tempo e local de aplicação, acompanhada de pequenas amostras nos estudos e grande variabilidade metodológica. Sendo necessário mais pesquisas com amostras maiores, ensaios clínicos randomizados e a exploração dos tipos de neuromodulação não invasiva associadas a treinos funcionais e locomotores.

CONCLUSÃO

Os resultados desta revisão demonstraram que a neuromodulação não invasiva é eficaz na melhora da função motora em indivíduos com LME incompleta, principalmente quando associada a treinos funcionais e locomotores. Entre os tipos de estimulação utilizados estão a estimulação transcutânea da medula espinhal (tSCS), a estimulação transespinhal por corrente contínua (tsDCS), e a estimulação medular transcutânea (TSS), que demonstraram efeitos positivos na ativação muscular, controle postural e desempenho na marcha, deixando evidente a sua capacidade de modular circuitos espinhais sendo um recurso promissor para favorecer a reabilitação motora em pacientes com LME incompleta.

REFERÊNCIAS

1. Yari D, Saberian A, Salmasi Z, Ghoreish S, Etemad L, Movaffagh J, et al. Recent Advances in the Treatment of Spinal Cord Injury. *Arch Bone Jt Surg.* 2024; 12 (6): 380-399.
2. Marchesini N, Rubiano AM, Sala F, Demetriades AK, Alves OL. Secondary damage management of acute traumatic spinal cord injury in low and middle-income countries: A survey on a global scale (Part III). *Brain Spine.* 2022; 5 (2): 2-7.
3. Shepherd J, Tu K, Young J, Chishtie J, Craven BC, Moineddin R, et al. Identifying cases of Spinal Cord injury OR disease in a primary care Electronic medical Record database. *J Spinal Cord Med.* 2021; 44 (sup1): S28-S39.
4. Fehlings MG, Tetreault LA, Wilson JR, Kwon BK, Burns AS, Martin AR, et al. A Clinical Practice Guideline for the Management of Acute Spinal Cord Injury: Introduction, Rationale, and Scope. *Global Spine J.* 2017; 7 (3 suppl): 84S- 94S.
5. Rivers CS, Fallah N, Noonan VK, Whitehurst DG, Schwartz CE, Finkelstein JA, et al. Health Conditions: Effect on Function, Health-Related Quality, of Life, and Life Satisfaction After Traumatic Spinal Cord Injury. A Prospective Observational Registry Cohort Study. *Arch Phys Med Rehabil.* 2018; 99(3): 443-451.
6. Knikou M, Dixon L, Santora D, Ibrahim MM. Transspinal constant-current long-lasting Stimulation: a new method to induce cortical and corticospinal plasticity. *J Neurophysiol.* 2015; 114 (3): 1486-1499.
7. Noga B, Guest J. Combined neuromodulatory approaches in the central nervous system for treatment of spinal cord injury. *Curr Opin Neurol.* 2021; 34 (6): 804-811.
8. Kuck A, Stegeman D, Van der Kooij H, Van Asseldonk E. Changes in H-Reflex Recruitment After Trans-Spinal Direct Current Stimulation With Multiple Electrode Configurations. *Front Neurosci.* 2018; 12: 151.
9. Skiadopoulos A, Famodimu GO, Solomon SK, Agarwal P, Harel NY, Knikou M. Priming locomotor training with Transspinal stimulation in people with Spinal Cord injury: study protocol of a randomized Clinical trial. *Trials.* 2023; 24 (1): 145.
10. Wenqiang L, Zhian C, Hua L, Yang L, Yi C, Zhijun C. Neuromodulation techniques for the treatment of spinal cord injury: current progress, challenges, and future prospects. *Eur J Med Res.* 2025; 30 (1): 495.

11. Iddings JA, Zarkou A, Field-Fote EC. Non-Invasive Neuromodulation and Rehabilitation to Promote Functional Restoration In Persons With Spinal Cord Injury. *Curr Opin Neurol*. 2021; 34 (6): 812-818.
12. Abualait TS, Ibrahim AL. Spinal Direct current Stimulation with locomotor training in chronic Spinal Cord injury. *Saúde Med J*. 2020; 41 (1): 88-93.
13. Kumru H, Ros-Alsina A, Alén L, Vidal J, Gerasimenko Y, Hernandez A, et al. Improvement in motor and Walking Capacity During Multisegmental in Individuals With Incomplete Spinal Cord Injury. *Int J Mol SCI*. 2024; 25 (8): 4480.
14. Tefertiller C, Rozwod M, Vandegriend E, Bartelt P, Sevigny M, Smith A. Transcutaneous Electrical Spinal Cord Stimulation to Promote Recovery in Chronic Spinal Cord Injury. *Front Rehabil Sci*. 2021; 2 (1): 2-7.
15. Pulverenti M, Zaaya M, Grabowski E, Grabowski M, Knikou M. Brain and Spinal Cord paired stimulation coupled With locomotor Training facilitates motor output in human spinal Cord Injury. *Front Neurol*. 2022; 13 (1): 2-10.
16. Pulverenti T, Zaaya M, Grabowski M, Grabowski E, Islam M, Li J, et al. Neurophysiological changes after paired Brain and Spinal Cord Stimulation Coupled With Locomotor Training in Human Spinal Cord Injury. *Front Neurol*. 2021; 12 (1): 2-17.
17. Al'Joboori Y, Massey S, Knight S, Donaldson N, Duffell L. The Effects of Adding Transcutaneous Spinal Cord Stimulation (tSCS) to sit-to-stand Training in People With spinal Cord Injury: A Pilot Study. *J Clin Med*. 2020; 9 (9): 2765.
18. McHugh L, Miller A, Leech K, Salário C, Martins R. Feasibility and utility of transcutaneous Spinal Cord Stimulation combined With walking-based, therapy for people With motor incomplete Spinal Cord Injury. *Spinal Cord Series and Cases*. 2020; 6 (1): 104.
19. Murray L, Knikou M. Transspinal Stimulation increases motoneuron output of multiple segments in Human Spinal Cord Injury. *PLoS One*. 2019; 14 (3): e0213696.
20. Sayenko D, Rath M, Ferguson A, Budick J, Hhaviton L, Edgerton V, et al. Self-Assisted Standing Enabled by Non-Invasive Spinal Stimulation after Spinal Cord Injury. *Journal of Neurotrauma*. 2019; 36 (9): 1435-1450.
21. Krenn M, White J, Stokic D, Tansey K. Neuromodulation With transcutaneous Spinal stimulation reveals different groups of motor

- profiles During robot-guided stepping in humans Injury. *Exp Brain Res* 2023; 241 (2): 365-382.
22. Finn H, Bye E, Elphick T, Boswell-Ruys C, Gandevia S, Butler J, et al. Transcutaneous Spinal stimulation in people With and without Spinal Cord Injury: Effect of electrode placement and trains of stimulation on threshold intensity. *Physiol Rep.* 2023; 11 (11): e15692.
23. Calvert J, Gill M, Linde M, Veith D, Thoreson A, Lopez C, et al. Voluntary Modulation of Evoked Responses Generated by Epidural and Transcutaneous Spinal Stimulation in Humans With Spinal Cord Injury. *J Clin Med.* 2021; 10 (21): 4898.
24. Adeel M, Lai C, Lin B, Chan W, Liou J, Wu C, et al. Effects of paired stimulation With specific waveforms on cortical and Spinal plasticity in subjects With a Chronic Spinal Cord Injury. *Journal of the Formosan Medical Association.* 2022; 121 (10): 2044-2056.
25. Hawkins K, DeMark L, Vistamehr A, Snyder H, Conroy C, Wauneka C, et al. Feasibility of transcutaneous Spinal direct current stimulation combined With locomotor training after Spinal Cord Injury. *Spinal Cord.* 2022; 60 (11): 971-977.