

MODULAÇÃO DA DOR POR EXERCÍCIO AERÓBICO COMBINADO À ESTIMULAÇÃO TRANSCRANIANA POR CORRENTE CONTÍNUA NA LOMBALGIA CRÔNICA INESPECÍFICA: ANÁLISE ELETROENCEFALOGRÁFICA

Universidade Presbiteriana Mackenzie

Coordenadoria de Fomento à Pesquisa –
Pró-reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação

Gabriel Janikian Leite
Apoio: *PIBIC Mackenzie*

Prof.^a Dra. Marília Lira da Silveira Coelho

Centro de Ciências Biológicas e da Saúde (CCBS)

<10410341@mackenzista.com.br>
<marilialira.coelho@mackenzie.br>

RESUMO

Introdução: A lombalgia crônica inespecífica envolve mecanismos complexos, incluindo hiperalgesia, sensibilização central e alterações na atividade cortical. A avaliação combinada da intensidade da dor (EVA), limiar de dor à pressão (algômetro), sensibilização central (BP-CSI) e eletroencefalografia (EEG) pode oferecer melhor compreensão dos efeitos de intervenções não farmacológicas. **Objetivo:** Avaliar os efeitos da combinação entre exercício aeróbico e estimulação transcraniana por corrente contínua (ETCC) sobre dor (EVA e algômetro), sensibilização central (BP-CSI) e atividade cortical (EEG) em indivíduos com lombalgia crônica inespecífica. **Métodos:** Dezenove participantes foram randomizados em dois grupos: exercício + ETCC ativa ($n = 10$) e exercício + ETCC placebo ($n = 9$). As avaliações foram realizadas no pré e pós-intervenção e incluíram intensidade da dor (EVA), limiar de dor à pressão (algômetro), sensibilização central (BP-CSI) e EEG em repouso, com análise das bandas alfa, delta e theta. **Resultados:** O exercício aeróbico promoveu redução significativa da dor e aumento do limiar de dor à pressão em ambos os grupos. A adição da ETCC não potencializou diretamente os efeitos analgésicos, mas reduziu significativamente os escores de sensibilização central no grupo ativo. Não foram observadas alterações médias nas bandas espectrais do EEG. **Conclusão:** O exercício aeróbico mostrou-se eficaz na redução da dor e no aumento da tolerância à pressão, enquanto sua combinação com a ETCC contribuiu para a modulação da sensibilização central.

Palavras-chave: lombalgia crônica; ETCC; EEG; exercício aeróbico; modulação cortical

ABSTRACT

Introduction: Nonspecific chronic low back pain involves complex mechanisms, including hyperalgesia, central sensitization, and changes in cortical activity. The combined assessment of pain intensity (VAS), pressure pain threshold (algometer), central sensitization (BP-CSI), and electroencephalography (EEG) may provide a broader understanding of the effects of non-pharmacological interventions. **Objective:** To evaluate the effects of combining aerobic exercise with transcranial direct current stimulation (tDCS) on pain (VAS and algometer), central sensitization (BP-CSI), and cortical activity (EEG) in individuals with nonspecific chronic low back pain. **Methods:** Nineteen participants were randomized into two groups: exercise + active tDCS ($n = 10$) and exercise + sham tDCS ($n = 9$). Assessments were conducted pre- and post-intervention and included pain intensity (VAS), pressure pain threshold (algometer), central sensitization (BP-CSI), and resting-state EEG, focusing on alpha, delta, and theta bands. **Results:** Aerobic exercise promoted a significant reduction in pain and an

increase in pressure pain threshold in both groups. The addition of tDCS did not further enhance analgesic effects but significantly reduced BP-CSI scores in the active group. No significant mean changes were observed in EEG spectral bands. Conclusion: Aerobic exercise proved effective in reducing pain and increasing pressure tolerance, while its combination with tDCS contributed to the modulation of central sensitization.

Keywords: chronic low back pain; tDCS; EEG; aerobic exercise; cortical modulation

1. INTRODUÇÃO

No cenário global, a lombalgia crônica inespecífica é considerada a principal causa de incapacidade e um dos maiores motivos de afastamento laboral, de acordo com o *Global Burden of Disease Study* (GBD, 2021). No Brasil, entre 2012 e 2016, a dor lombar foi responsável por uma média de 100 dias de absenteísmo por pessoa, resultando em aproximadamente 79% de perda de produtividade e custos estimados em 2,2 bilhões de dólares em insumos e tratamentos (Carregaro et al., 2020).

Além do impacto socioeconômico, a lombalgia crônica inespecífica está associada a alterações neurofisiológicas significativas. Indivíduos acometidos frequentemente apresentam hipersensibilização e hiperalgesia, que resultam em diminuição do limiar de dor, alterações na mielinização axonal e aumento do número de campos receptivos neuronais (Caumo et al., 2017). Essas modificações nas redes corticais, decorrentes da sensibilização do complexo da dor, afetam não apenas o funcionamento físico, mas também aspectos emocionais, agravando o quadro clínico.

Nesse contexto, o exercício físico tem sido amplamente estudado como uma intervenção não farmacológica eficaz para a modulação da dor. Atividades aeróbicas, de força e de resistência promovem analgesia induzida pelo exercício, além de desencadear adaptações fisiológicas e bioquímicas que contribuem para a redução da dor crônica. Entre os mecanismos envolvidos destacam-se a liberação de endorfinas, que interagem com receptores opióides do sistema nervoso central, a melhora da circulação sanguínea, a redução da rigidez muscular e a diminuição de processos inflamatórios (Xiao et al., 2020; Lesnak & Sluka, 2020). Tais efeitos favorecem a reconceitualização da experiência dolorosa e a quebra do ciclo vicioso de incapacidade e conduta evitativa.

Paralelamente, a Estimulação Transcraniana por Corrente Contínua (ETCC) vem se consolidando como estratégia complementar para o manejo da dor crônica. Quando aplicada

sobre o córtex motor primário (M1), a técnica é capaz de promover neuroplasticidade e modular a excitabilidade cortical, interferindo positivamente nas redes neurais envolvidas no processamento nociceptivo (Caumo et al., 2017). A combinação entre ETCC e exercício físico tem se mostrado promissora para potencializar os efeitos analgésicos e ampliar a durabilidade dos resultados.

Para investigar os mecanismos cerebrais subjacentes à dor crônica, a eletroencefalografia (EEG) surge como uma ferramenta valiosa por sua alta sensibilidade na detecção de padrões oscilatórios corticais. Em especial, a atividade em ondas alfa apresenta diferenças significativas em indivíduos com dor crônica, principalmente entre as condições de olhos abertos e fechados, o que reforça seu potencial como biomarcador neurofisiológico.

Diante desse cenário, torna-se fundamental compreender como intervenções não farmacológicas e acessíveis, como o exercício aeróbico e a ETCC, podem atuar na modulação da dor em indivíduos com lombalgia crônica inespecífica. O presente estudo teve como objetivo investigar os efeitos da combinação dessas estratégias sobre a dor e a atividade neural, analisada por meio da EEG, com ênfase em padrões de ondas alfa. Além de contribuir para a compreensão dos mecanismos envolvidos, este estudo busca suprir a lacuna existente na literatura sobre a integração dessas abordagens, fortalecendo sua relevância para o desenvolvimento de terapias mais eficazes e baseadas em evidências.

REFERENCIAL TEÓRICO

Casos de lombalgia crônica primária tendem a ser classificados como de origem inespecífica em mais de 85% das ocorrências, apresentando maior prevalência entre mulheres. Entre os fatores frequentemente associados destacam-se sobrepeso, alterações posturais, inatividade física, flutuações hormonais e gravidez. Essa condição compromete as atividades da vida diária e, em muitos casos, evolui para distúrbios do sono e redução significativa da qualidade de vida e da capacidade funcional (Sonmezer et al., 2021). Em 2020, aproximadamente 619 milhões de pessoas foram afetadas, com projeção de que esse número alcance cerca de 843 milhões em 2050, representando um aumento de 36% em decorrência do crescimento populacional e do aumento da expectativa de vida (Ferreira et al., 2023).

A dor lombar inespecífica é caracterizada como dor localizada entre a margem costal inferior (abaixo da 12ª costela) e a crista ilíaca, podendo ou não irradiar para os membros inferiores. Trata-se de uma condição multifatorial, que envolve a interação de aspectos biológicos, psicológicos e sociais (Knezevic et al., 2021). Para ser considerada crônica, a dor

deve persistir por mais de 12 semanas sem associação com doença subjacente específica. Sua manutenção pode ser explicada por processos de maladaptação neural, que vão desde alterações nos receptores periféricos até o córtex cerebral, mesmo na ausência de estímulos nociceptivos. Esse processo de hipersensibilização está associado à redução do limiar de dor, hiperalgesia e, em alguns casos, à sensibilização central, com alterações estruturais e funcionais nos circuitos neurais, como aumento do número de campos receptivos neuronais (Caumo et al., 2017).

Entre os tratamentos não farmacológicos mais investigados, destacam-se o exercício físico aeróbico, o treino de força e o treino resistido, que têm demonstrado eficácia na redução da dor em quadros de lombalgia crônica, conforme evidenciado em revisões sistemáticas e meta-análises (Owen et al., 2020). A prática regular de exercícios contribui para a melhora da força muscular e da funcionalidade, além de reduzir sintomas dolorosos e melhorar a qualidade de vida. Esse efeito é explicado, em parte, pela analgesia induzida pelo exercício, caracterizada por alterações nos neurotransmissores e na modulação cortical, refletidas no aumento do limiar de dor.

A analgesia induzida pelo exercício envolve mecanismos centrais e periféricos. No sistema nervoso central, a ativação dos tratos descendentes promove a liberação de opioides endógenos, noradrenalina, serotonina, encefalinas e dopamina, que modulam a percepção da dor. No sistema nervoso periférico, substâncias como bradicinina, prostaglandinas e serotonina também contribuem para o controle inibitório da nocicepção, exercendo influência adicional sobre a percepção psicológica da dor (Lesnak & Sluka, 2020).

Assim, o exercício físico é considerado uma intervenção com alto nível de evidência científica no manejo da lombalgia crônica. Contudo, estudos apontam que a combinação de diferentes modalidades terapêuticas pode potencializar os resultados e proporcionar uma abordagem mais holística e eficaz. Dessa forma, o tratamento deve ser adaptativo e multidisciplinar, visando maximizar os benefícios terapêuticos e reduzir a dependência de recursos farmacológicos (Koltyn, 2020). Entre as estratégias combinadas mais promissoras está a associação entre exercício físico e Estimulação Transcraniana por Corrente Contínua (ETCC), que, em conjunto, podem potencializar os efeitos analgésicos e prolongar sua duração (Caumo et al., 2017).

A ETCC aplicada sobre o córtex motor primário (M1) tem se mostrado uma ferramenta promissora no controle da dor crônica. Em curto prazo, promove a liberação de ácido gama-aminobutírico (GABA), que reduz a hiperexcitabilidade cortical; em longo prazo, a estimulação anódica induz neuroplasticidade e modula o processamento nociceptivo, diminuindo as respostas pós-sinápticas (Pacheco-Barrios et al., 2020). Uma meta-análise específica sobre dor

lombar crônica, que incluiu 27 estudos com 747 participantes, identificou diferenças significativas entre estimulação ativa e placebo em relação à intensidade da dor na primeira semana, correspondendo a uma redução de 17% considerada clinicamente relevante (Knotkova et al., 2021).

Além disso, condições de dor crônica têm sido associadas a alterações específicas em frequências de ondas cerebrais, sobretudo nas ondas alfa (8–13 Hz). Essas oscilações, que refletem um estado de desaceleração da atividade cortical, são geradas em regiões mais superficiais do córtex e podem ser monitoradas de forma objetiva por meio da eletroencefalografia (EEG) (Teixeira et al., 2022). Alterações na frequência e amplitude das ondas alfa podem indicar padrões anormais de processamento nociceptivo em indivíduos com dor lombar crônica. A compreensão dessas alterações contribui para o desenvolvimento de intervenções mais precisas, como a neuromodulação direcionada.

O monitoramento contínuo das ondas alfa via EEG pode, portanto, constituir um biomarcador valioso para avaliar a resposta do paciente às intervenções terapêuticas. Essa métrica objetiva possibilita ajustes personalizados no tratamento, maximizando a eficácia e minimizando efeitos adversos. Assim, o presente estudo se propôs a investigar o efeito da combinação entre exercício aeróbico e ETCC em indivíduos com lombalgia crônica inespecífica, integrando medidas eletrofisiológicas de EEG para analisar alterações nos padrões de ondas alfa antes e após a intervenção.

1. METODOLOGIA

Um ensaio clínico randomizado cego e controlado com placebo foi proposto e realizado na Clínica Escola do Curso de Fisioterapia e no Laboratório de Neurociência Cognitiva e Social da Universidade Presbiteriana Mackenzie. O recrutamento dos participantes ocorreu por meio de mídias sociais (WhatsApp, Instagram e Facebook) e de divulgações dentro da Universidade Presbiteriana Mackenzie. Os participantes interessados preencheram um questionário online com nome, telefone de contato e e-mail. Os participantes foram contatados via telefone ou WhatsApp para explicação dos objetivos e fazer a primeira triagem de critérios de inclusão e exclusão. Caso o participante fosse elegível, foi agendado um encontro presencial para informações adicionais sobre o estudo e procedimento experimental, e esclarecimento de possíveis dúvidas. Foram convidados participantes dos sexos feminino e masculino, com faixa etária de 18 a 59 anos, que apresentavam lombalgia inespecífica há mais de 3 meses.

Foram excluídos: participantes que apresentassem enfermidades prévias que interferiram na utilização da ETCC e na execução do treino aeróbico de intensidade moderada como doenças cardiovasculares; doenças respiratórias; bloqueio articular; histórico de epilepsia; neurocirurgias e implante de marca-passo; dependência química; portadores de doenças neurológicas ou psiquiátricas; mulheres grávidas ou amamentando; alteração cognitiva ou que não consigam entender as atividades propostas no estudo.

Abordando critérios de alocação e randomização, foram selecionados ao total 19 participantes, 10 para o experimento 1 e 9 para o experimento 2. Estes foram randomizados em dois grupos, de maneira contrabalançada por site randon.org: 10 participantes participaram do grupo intervenção (ETCC anódica + exercício aeróbico) e 9 participantes fizeram parte do grupo controle (ETCC placebo + exercícios aeróbicos).

Para avaliação inicial, o participante estava posicionado em uma cadeira (ajustada conforme sua altura) confortavelmente, com braços apoiados na mesa e pés apoiados no chão e era colhida a assinatura para o TCLE. A ficha de informações pessoais e de saúde, inventário de sensibilização central eram preenchidos via Google Forms, por link enviado pelo WhatsApp. A avaliação da dor foi realizada pela EVA e algômetro de pressão, referente aos quatro quadrantes da região lombar (superior direita, superior esquerda, inferior direita, inferior esquerda), além da avaliação da atividade cerebral pelo EEG.

Etapas inicial e final: O participante era conduzido à uma sala preparada com o equipamento de EEG (Software NetStation®), e posicionado em uma poltrona de forma confortável com colocação da touca no escalpe para início da tarefa. A tarefa consistia em manter os olhos fechados e o corpo relaxado durante 5 min, e em seguida, manter os olhos abertos em estado de alerta por mais 5 min, totalizando 10 minutos de experimento. Essa medida era realizada antes e depois do período de intervenção para efeitos comparativos.

Intervenção: O participante recebia a ETCC (ativo ou placebo), conforme o método explicado previamente, por 20 minutos combinado ao treino aeróbico realizado em bicicleta ergométrica, onde a velocidade era aumentada até que o participante atingisse 60% a 80% da frequência cardíaca máxima ($FC_{\text{máx}}$) prevista para sua idade, seguindo a fórmula $FC_{\text{máx}} = 220 - (\text{idade})$. As sessões ocorreram 3 vezes por semana, intervaladas em 48 horas entre cada aplicação, com as terapias combinadas. A intensidade do exercício era monitorada individualmente por meio da classificação do esforço percebido pela escala de Borg modificada. Após o término do exercício, o estimulador ETCC era desligado e, em seguida, o participante respondia

verbalmente o questionário para controle de efeitos colaterais da ETCC. Antes e depois da intervenção era avaliada, a Frequência Cardíaca (FC) e Pressão Arterial (PA) do participante.

Para fins comparativos, ao final das 12 sessões foram realizadas reavaliações dos mesmos parâmetros iniciais: Avaliação da percepção de dor (EVA e algômetro de pressão), inventário de sensibilização central e a avaliação da atividade cerebral pelo EEG.

Aquisição e Processamento de dados do EEG: O EEG contínuo foi registrado com touca geodésica de 128 canais (Electrical Geodesics Inc., Eugene, EUA), mantendo-se a impedância abaixo de 50 k Ω . O pré-processamento incluiu: filtro passa-baixa de 30 Hz, segmentação temporal com base no início da tarefa, detecção e remoção de artefatos (piscadas >140 μ V, movimentos oculares >80 μ V, amplitudes >200 μ V), exclusão de canais com >20% de ruído ou segmentos com >10 canais comprometidos. Os dados foram corrigidos pela linha de base e inspecionados visualmente para seleção das janelas de tempo dos componentes de interesse. A amplitude média foi extraída por participante e posteriormente agrupada em conjuntos de canais das regiões direita e esquerda, de acordo com a literatura e inspeção visual.

2. RESULTADO

A amostra coletada foi composta por 19 participantes, distribuídos entre o grupo intervenção ($n = 10$) e o grupo controle ($n = 9$). A idade média foi de $25,9 \pm 9,9$ anos, sem diferença significativa entre os grupos (intervenção: $29,3 \pm 12,0$ anos; controle: $22,2 \pm 5,4$ anos; $t_{(17)} = 1,62$, $p = 0,123$). A maioria dos participantes era do sexo feminino (78,9%), com distribuição semelhante entre grupos ($\chi^2 = 0,014$, $p = 0,906$). Quanto ao grau de escolaridade, 84,2% possuíam ensino superior em andamento ou completo, sem diferenças significativas entre grupos ($\chi^2 = 3,21$, $p = 0,361$). O uso regular de medicamentos foi relatado por 31,6% da amostra, também sem diferença entre grupos ($\chi^2 = 1,31$, $p = 0,252$).

No momento inicial, a intensidade média da dor autorreferida pela EVA foi de $5,6 \pm 1,9$ (intervenção: $5,9 \pm 2,0$; controle: $5,2 \pm 1,8$; $p = 0,410$). O limiar de dor à pressão (algômetro) apresentou média geral de $2,9 \pm 1,3$ kgf, sem diferença entre grupos ($p = 0,365$). A sensibilização central (BP-CSI) apresentou média de $42,9 \pm 15,1$ pontos, com o grupo intervenção exibindo valores iniciais mais altos, embora sem significância estatística global ($p = 0,065$). (TABELA 1).

TABELA 1. Caracterização da amostra no momento basal

Variável	Total (n=19)	Grupo intervenção (n=10)	Grupo controle (n=9)	p-valor
Idade, média (DP), anos	25,9 ($\pm 9,9$)	29,3 ($\pm 12,0$)	22,2 ($\pm 5,4$)	0,123
Sexo feminino, n (%)	15 (78,9)	8 (80,0)	7 (77,8)	0,906
Ensino superior em andamento/completo, n (%)	16 (84,2)	9 (90,0)	7 (77,8)	0,361
Uso regular de medicamentos, n (%)	6 (31,6)	5 (50,0)	1 (11,1)	0,252
EVA, média (DP)	5,6 ($\pm 1,9$)	5,9 ($\pm 2,0$)	5,2 ($\pm 1,8$)	0,410
Limiar de dor à pressão (kgf), média (DP)	2,9 ($\pm 1,3$)	2,7 ($\pm 1,4$)	3,1 ($\pm 1,3$)	0,365

A análise da dor, mensurada pela Escala Visual Analógica (EVA), revelou um efeito principal significativo do tempo ($F_{(1,17)} = 9.602$, $p = 0.007$, $\eta^2p = 0.361$), indicando redução significativa da dor após o período de intervenção. No entanto, não foram observados efeitos significativos de interação Tempo $\times$ Grupo ($p = 0.708$), nem diferenças entre os grupos ($p = 0.399$), sugerindo que ambos os grupos (ETCC ativa e placebo) apresentaram reduções similares na intensidade da dor ao longo do tempo. Especificamente, o grupo intervenção apresentou redução média de 2.78 pontos e o grupo controle, 2.17 pontos na escala EVA. Esses achados indicam um efeito clínico relevante da intervenção multimodal, porém não específico do grupo com ETCC ativa.

A análise do limiar de dor à pressão, avaliado pelo algômetro de pressão, revelou um efeito principal altamente significativo do tempo ($F_{(1,17)} = 165.51$, $p < .001$, $\eta^2p = 0.907$), com aumento acentuado do limiar após a intervenção em ambos os grupos. Também foi observada uma interação significativa entre tempo e grupo ($F_{(1,17)} = 4.78$, $p = 0.043$, $\eta^2p = 0.219$), indicando que os grupos evoluíram de maneira diferente ao longo do tempo. As análises post hoc revelaram que ambos os grupos apresentaram aumentos significativos no limiar de dor ($p < 0.001$), com valores médios passando de 4.73 para 12.93 no grupo ETCC e de 4.21 para 15.78 no grupo placebo. No entanto, não houve diferença estatisticamente significativa entre os grupos no pós-teste ($p = 0.573$). Esses resultados sugerem que o exercício aeróbico foi

altamente eficaz para promover analgesia, e que a ETCC não produziu efeito aditivo no limiar de dor.

Esses resultados em conjunto revelam que ambos os grupos apresentaram melhora clínica na dor, evidenciada pela redução na EVA e pelo aumento do limiar de dor à pressão. Esses achados indicam um efeito analgésico robusto do exercício aeróbico, enquanto a adição da ETCC não demonstrou impacto clínico adicional consistente sobre a dor.

A análise da sensibilização central, avaliada pelo questionário BP-CSI, indicou um efeito principal significativo do tempo ($F_{(1,17)} = 9.07$, $p = 0.008$, $\eta^2p = 0.348$), bem como uma interação significativa entre tempo e grupo ($F_{(1,17)} = 6.79$, $p = 0.018$, $\eta^2p = 0.285$). Apenas o grupo intervenção apresentou redução significativa nos escores (de 48.8 para 36.5; $p = 0.004$), enquanto o grupo controle manteve-se estável (de 36.1 para 35.2; $p = 0.998$). Esses achados indicam que a intervenção com ETCC ativa associada ao exercício aeróbico reduziu de forma significativa os sintomas relacionados à sensibilização central, reforçando seu potencial efeito modulador sobre o sistema nervoso central.

Potência relativa as bandas do EEG

A atividade cortical foi analisada por meio da potência relativa das bandas alfa (8–12 Hz), teta (4–7 Hz) e delta (0,5–3,5 Hz), registradas em repouso nas condições de olhos abertos e fechados (FIGURA 01).

A ANOVA de medidas repetidas revelou um efeito principal significativo da condição, com maior potência relativa das bandas alfa ($F_{(1,18)} = 28.87$; $p < 0.001$; $\eta^2p = 0.616$), delta ($F_{(1,18)} = 34.20$; $p < 0.001$; $\eta^2p = 0.655$) e teta ($F_{(1,18)} = 8.14$; $p = 0.011$; $\eta^2p = 0.311$) durante a condição de olhos fechados, em comparação com olhos abertos. Esses achados refletem o padrão neurofisiológico esperado para o repouso com olhos fechados, validando o protocolo de aquisição.

Não foram observados efeitos significativos de tempo (pré vs. pós-intervenção), grupo (ETCC ativa vs. placebo) ou interações entre os fatores, sugerindo que a intervenção não promoveu alterações médias detectáveis na potência relativa das bandas analisadas.

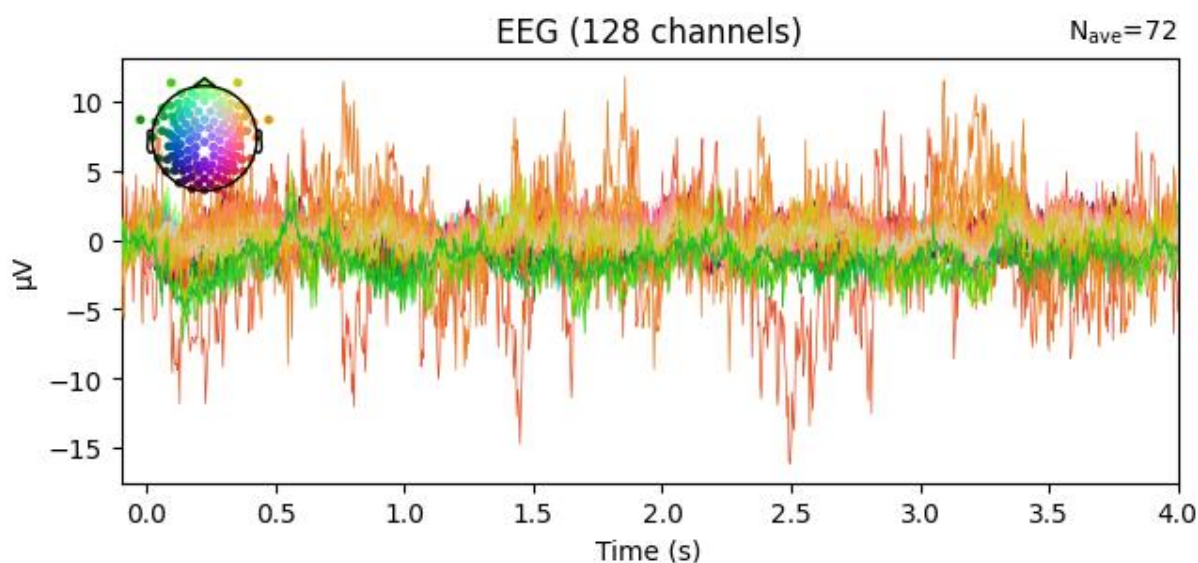


Figura 01. Sinais de EEG obtidos de 128 canais durante registro em repouso ($N = 72$ segmentos médios). Cada linha representa a atividade elétrica cerebral registrada em um eletrodo, em microvolts (μV), ao longo de 4 segundos. O mapa inserido no canto superior esquerdo ilustra a distribuição espacial dos eletrodos no escalpo, conforme o sistema de 128 canais.

Correlações entre os desfechos clínicos e a variação na potência relativa as bandas do EEG

A análise de correlação indicou que não houve associação significativa entre a variação na EVA e o limiar de dor à pressão ($r = 0,05$; $p = 0,822$), nem entre a EVA e a sensibilização central ($r = 0,11$; $p = 0,648$). A variação no limiar de dor à pressão apresentou correlação positiva, embora não significativa, com a redução da sensibilização central (BP-CSI) ($r = 0,347$; $p = 0,146$). Apesar de não ter atingido significância estatística, esse padrão sugere uma possível relação entre maior tolerância à pressão e melhora na modulação central da dor, hipótese que merece investigação em estudos futuros com amostras mais amplas.

Não foram observadas correlações adicionais significativas entre os desfechos de dor (EVA e limiar de dor por algometria) e a sensibilização central, o que indica que, no tamanho amostral estudado, as relações entre esses parâmetros foram limitadas.

As análises de correlação também exploraram as relações entre mudanças nas variáveis clínicas de dor (EVA e limiar de dor à pressão), sensibilização central (BP-CSI) e variações na potência relativa das bandas alfa, theta e delta em repouso (condição de olhos fechados). Não foram identificadas associações significativas entre a variação da EVA e qualquer banda de EEG ($p \geq 0,269$), nem entre o limiar de dor à pressão e as bandas de EEG ($p \geq 0,293$). De forma

semelhante, as mudanças na sensibilização central não se correlacionaram significativamente com as bandas alfa, theta ou delta ($p \geq 0,696$).

Esses resultados sugerem que, no presente estudo, as modificações clínicas na dor e na sensibilização central não estiveram diretamente associadas a alterações médias nas potências relativas das bandas de EEG. Contudo, não se pode descartar a possibilidade de relações mais complexas ou não lineares, que poderão ser melhor exploradas em futuras investigações com maior poder amostral.

3. DISCUSSÃO

O presente estudo teve como objetivo investigar os efeitos da combinação entre exercício aeróbico e estimulação transcraniana por corrente contínua (ETCC) na modulação da dor em indivíduos com lombalgia crônica inespecífica, bem como integrar o uso da eletroencefalografia (EEG) como biomarcador fisiológico para monitorar alterações nas ondas alfa antes e após a intervenção. A seguir serão apresentados os principais achados.

Em relação à dor, avaliada pela EVA e pelo algômetro de pressão, foi observada redução significativa da dor autorreferida (EVA) ao longo do tempo em ambos os grupos, indicando um efeito robusto do exercício aeróbico. O limiar de dor à pressão apresentou melhora com tendência de interação tempo $\times$ grupo, sugerindo possível modulação adicional pela ETCC, embora sem confirmação estatística robusta. Esses achados reforçam o papel do exercício aeróbico como intervenção eficaz no manejo da dor lombar crônica.

Ensaio clínico recentes corroboram os achados deste estudo, demonstrando que programas aeróbicos, como caminhada ou ciclismo em intensidade submáxima progressiva, reduzem a intensidade da dor e sua interferência nas atividades diárias. Parte desses benefícios é atribuída à modulação endógena da dor, com aumento da analgesia mediada por opioides após o treinamento. Em um ensaio clínico randomizado de seis semanas (18 sessões), BRUEHL et al. observaram reduções mais expressivas da dor crônica e da dor evocada no grupo exercício em comparação ao controle, com relação dose-resposta à intensidade do treino e maior efeito de analgesia endógena, especialmente em mulheres, mecanismo biológico que pode explicar a melhora observada no presente estudo.

Em relação aos efeitos agudos de exercícios aeróbicos, entretanto, a evidência permanece heterogênea. Uma revisão sistemática recente (TAN et al., 2022), incluindo 11 estudos de condições musculoesqueléticas, entre elas a dor lombar crônica, mostrou que sessões aeróbicas únicas (4–60 min de caminhada ou ciclismo, 50–75% do $VO_{2\text{máx}}$ ou 40–85% da

frequência cardíaca de reserva) tendem a elevar o limiar de dor à pressão e/ou reduzir a dor referida, caracterizando a hipoalgesia induzida por exercício, efeito também sustentado após 2–12 semanas em ensaios clínicos.

Em relação à sensibilização central, avaliada pelo BP-CSI, verificou-se redução significativa apenas no grupo ETCC. Esse resultado sugere que a estimulação ativa promoveu efeitos mais específicos sobre ajustes neuroplásticos nos mecanismos centrais de processamento nociceptivo, corroborando evidências de revisões que destacam a capacidade da ETCC em M1 de modular redes neurais do complexo da dor (Pacheco-Barrios et al., 2020).

Evidências recentes também apontam que intervenções físicas podem reduzir sintomas de sensibilização central. Verbrugghe et al. (2023) observaram melhora significativa do escore de CSI após 12 semanas de treinamento aeróbico de alta intensidade em indivíduos com lombalgia crônica inespecífica, especialmente naqueles com maior sensibilização basal. Esse achado complementa nossos resultados, reforçando que diferentes modalidades terapêuticas podem atuar sobre mecanismos de sensibilização central, embora, no presente estudo, tal efeito tenha sido mais evidente com a ETCC.

Por outro lado, uma revisão sistemática e meta-análise conduzida por Alwardat et al. (2020), envolvendo ensaios clínicos de tDCS em lombalgia crônica inespecífica, não encontrou evidência robusta de redução consistente da dor ou incapacidade quando a técnica foi utilizada isoladamente. Esses resultados contrastantes reforçam a hipótese de que a ETCC pode apresentar maior impacto quando associada a outras intervenções, como o exercício aeróbico, e quando acompanhada de biomarcadores fisiológicos, como o EEG, para melhor compreender sua ação sobre a sensibilização central.

Quanto à atividade eletroencefalográfica, não foram observados efeitos principais ou alterações significativas intra ou entre grupos nas bandas analisadas, tampouco correlações com os parâmetros clínicos de dor (EVA e algometria) ou com a sensibilização central (BP-CSI). Apenas um aumento fisiológico esperado em ondas alfa, beta e theta foi observado. Estudos prévios sugerem que bandas lentas, especialmente theta e delta, podem estar aumentadas em indivíduos com dor crônica, sendo associadas a reorganização cortical e disfunções em redes tálamo-corticais, refletindo maior estado de hipervigilância ou falhas na inibição descendente. Essa relação foi descrita, por exemplo, em registros de pacientes com dor lombar crônica e fibromialgia, nos quais a maior potência em theta/delta esteve vinculada à intensidade da dor e a déficits cognitivos (Larrie et al., 2023).

Contudo, há crescente evidência de que a resposta eletroencefalográfica à dor crônica é heterogênea, variando conforme fatores individuais, como duração da dor, grau de

sensibilização central e até perfis fenotípicos de processamento nociceptivo. Nesse sentido, a ausência de alterações específicas nas bandas lentas em nosso estudo pode indicar que o exercício aeróbico e a ETCC não promoveram reorganização cortical detectável por EEG no curto prazo. Investigações futuras, com maior poder amostral e análise de subgrupos, poderão esclarecer se determinados perfis de pacientes apresentam mudanças mais expressivas nas bandas lentas em resposta a intervenções multimodais.

Algumas limitações devem ser consideradas. O tamanho reduzido da amostra pode ter limitado o poder estatístico, especialmente nas correlações entre variáveis clínicas e eletrofisiológicas, o que pode explicar a ausência de associações significativas em alguns desfechos. A duração relativamente curta da intervenção também pode não ter sido suficiente para induzir mudanças neurofisiológicas detectáveis pelo EEG, sobretudo em bandas lentas, associadas a processos de reorganização cortical de longo prazo. Além disso, a heterogeneidade clínica da amostra, sem estratificação por fatores como nível basal de sensibilização central, tempo de dor crônica, pode ter mascarado efeitos relevantes em subgrupos específicos.

4. CONCLUSÃO

Com base nos achados, conclui-se que a combinação entre exercício aeróbico e ETCC apresentou efeitos complementares em indivíduos com lombalgia crônica inespecífica. O exercício aeróbico foi eficaz na redução da dor autorreferida e no aumento do limiar de dor por pressão, confirmando sua relevância como intervenção central no manejo da dor lombar. A ETCC, por sua vez, contribuiu de forma específica para a modulação de mecanismos de sensibilização central, reforçando seu potencial quando associada a outras modalidades terapêuticas. Estudos futuros, com amostras maiores e perfis clínicos mais diversificados, são necessários para aprofundar a compreensão das alterações corticais captadas pelo EEG em curto prazo.

5. REFERÊNCIAS

ALWARDAT, Mohammad et al. Is transcranial direct current stimulation (tDCS) effective for chronic low back pain? A systematic review and meta-analysis. **Journal of neural transmission**, v. 127, n. 9, p. 1257-1270, 2020.

BRUEHL, Stephen et al. Are endogenous opioid mechanisms involved in the effects of aerobic exercise training on chronic low back pain? A randomized controlled trial. **Pain**, v. 161, n. 12, p. 2887-2897, 2020.

CARREGARO, Rodrigo Luiz et al. Low back pain should be considered a health and research priority in Brazil: Lost productivity and healthcare costs between 2012 to 2016. **PloS one**, v. 15, n. 4, p. e0230902, 2020.

CAUMO, Wolnei et al. The Central Sensitization Inventory validated and adapted for a Brazilian population: psychometric properties and its relationship with brain-derived neurotrophic factor. **Journal of Pain Research**, p. 2109-2122, 2017.

FENG, Li et al. Low back pain assessment based on alpha oscillation changes in spontaneous electroencephalogram (EEG). **Neural plasticity**, v. 2021, 2021.

FERREIRA, Manuela L. et al. Global, regional, and national burden of low back pain, 1990–2020, its attributable risk factors, and projections to 2050: a systematic analysis of the Global Burden of Disease Study 2021. **The Lancet Rheumatology**, v. 5, n. 6, p. e316-e329, 2023.

KNEZEVIC, Nebojsa Nick et al. Low back pain: Epidemiology, mechanisms, and treatment. In: **Lancet-Seminar Series**. 2021.

KNOTKOVA, Helena et al. Neuromodulation for chronic pain. **The Lancet**, v. 397, n. 10289, p. 2111-2124, 2021.

KOLTYN, Kelli F. Analgesia following exercise: a review. **Sports medicine**, v. 29, p. 85-98, 2000.

LESNAK, Joseph B.; SLUKA, Kathleen A. Mechanism of exercise-induced analgesia: what we can learn from physically active animals. **Pain reports**, v. 5, n. 5, p. e850, 2020. OWEN, Patrick J. et al. Which specific modes of exercise training are most effective for treating low back pain? Network meta-analysis. **British journal of sports medicine**, v. 54, n. 21, p. 1279-1287, 2020.

PACHECO-BARRIOS, Kevin et al. Methods and strategies of tDCS for the treatment of pain: current status and future directions. **Expert review of medical devices**, v. 17, n. 9, p. 879898, 2020.

SONMEZER, Emel; ÖZKÖSLÜ, Manolya Acar; YOSMAOĞLU, Hayri Baran. The effects of clinical pilates exercises on functional disability, pain, quality of life and lumbopelvic stabilization in pregnant women with low back pain: A randomized controlled study. **Journal of back and musculoskeletal rehabilitation**, v. 34, n. 1, p. 69-76, 2021.

SOUZA, Juliana Barcellos de. Poderia a atividade física induzir analgesia em pacientes com dor crônica?. **Revista Brasileira de Medicina do Esporte**, v. 15, p. 145-150, 2009.

TAN, Lynn et al. Does aerobic exercise effect pain sensitisation in individuals with musculoskeletal pain? A systematic review. **BMC musculoskeletal disorders**, v. 23, n. 1, p. 1-21, 2022.

TEIXEIRA, Paulo EP et al. Electroencephalography signatures for conditioned pain modulation and pain perception in nonspecific chronic low back pain—an exploratory study. **Pain Medicine**, v. 23, n. 3, p. 558-570, 2022.

VERBRUGGHE, Jonas et al. High intensity training improves symptoms of central sensitization at six-month follow-up in persons with chronic nonspecific low back pain: Secondary analysis of a randomized controlled trial. **Brazilian Journal of Physical Therapy**, v. 27, n. 2, p. 100496, 2023.

WANG, Shan et al. Mechanisms of transcranial direct current stimulation (tDCS) for pain in patients with fibromyalgia syndrome. **Frontiers in Molecular Neuroscience**, v. 17, p. 1269636, 2024.

XIAO, Junjie (Ed.). **Physical exercise for human health**. Singapore: Springer, 2020.