

COMBINAÇÃO DE TREINO AERÓBICO E ETCC NA QUALIDADE DO SONO E DESEMPENHO FUNCIONAL NA LOMBALGIA CRÔNICA INESPECÍFICA: ANÁLISE POR ELETROENCEFALOGRAFIA (EEG)

Universidade Presbiteriana Mackenzie

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

Flávia Rafael de Souza¹

Apoio: *PIBIC Mackenzie*

Prof^ª Dra. Marília Lira da Silveira Coelho²

Centro de Ciências Biológicas e da Saúde (CCBS)¹

Unidade acadêmica e/ou Programa de Pós-graduação do Orientador²

<10388010@mackenzista.com.br>

<marilialira.coelho@mackenzie.br>

RESUMO

Introdução: A lombalgia crônica inespecífica é altamente prevalente e impacta negativamente a funcionalidade e a qualidade de vida. Estratégias não farmacológicas, como exercício aeróbico e neuromodulação, têm sido estudadas como alternativas de tratamento. **Objetivo:** Avaliar os efeitos da combinação entre exercício aeróbico e estimulação transcraniana por corrente contínua (ETCC) sobre sensibilização central, qualidade do sono, desempenho funcional e atividade cortical 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 incluíram incapacidade funcional (Roland-Morris), desempenho funcional (TC10m), qualidade do sono (PSQI), sensibilização central (BP-CSI) e eletroencefalografia (EEG) em repouso. **Resultados:** O exercício aeróbico promoveu melhora funcional, e a associação com ETCC reduziu significativamente a sensibilização central. Não foram observadas alterações médias nas bandas de EEG ou na qualidade do sono, mas houve associação entre aumento da potência theta e redução da incapacidade funcional. **Conclusão:** O exercício aeróbico foi eficaz para melhora funcional, enquanto a associação com ETCC contribuiu para a modulação da sensibilização central. O aumento da atividade theta mostrou-se associado à redução da incapacidade, sugerindo potencial como biomarcador clínico.

Palavras-chave: lombalgia. treino aeróbico. estimulação transcraniana (ETCC).

ABSTRACT

Introduction: Nonspecific chronic low back pain is highly prevalent and negatively impacts functionality and quality of life. Non-pharmacological strategies, such as aerobic exercise and neuromodulation, have been studied as alternative treatments. **Objective:** To evaluate the effects of combining aerobic exercise with transcranial direct current stimulation (tDCS) on central sensitization, sleep quality, functional performance, and cortical activity 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 included functional disability (Roland-Morris Questionnaire), functional performance (10-Meter Walk Test), sleep quality (PSQI), central sensitization (BP-CSI), and resting-state electroencephalography (EEG). **Results:** Aerobic exercise promoted functional improvement, and the association with tDCS significantly reduced central sensitization. No significant group-level changes were observed in EEG frequency bands or sleep quality; however, an association was found between increased theta power and reduced disability. **Conclusion:** Aerobic exercise was effective for improving function, while the combination with tDCS contributed to central sensitization modulation. Increased theta activity was associated with reduced disability, suggesting its potential as a clinical biomarker.

Keywords: low back pain. aerobic training. transcranial stimulation (tDCS).

1. INTRODUÇÃO

As dores crônicas afetam de forma significativa a população geral com impacto amplo na saúde e nos aspectos socioeconômicos. A lombalgia crônica é a disfunção de maior prevalência na população com maiores índices de afastamento de trabalho, de taxa de isolamento social e diminuição de qualidade de vida (YENG, 2004). Apesar de muito prevalente, aproximadamente 90% das lombalgias crônicas apresentam causas inespecíficas. (LIZIER et. al., 2012). Dessa forma, há interesse crescente na compreensão da causalidade e de biomarcadores que ajudem no acompanhamento para controle e tratamento dessa disfunção, com enfoque na melhora do bem-estar, incluindo a qualidade de sono.

Um dos modelos teóricos apontados pelos pesquisadores é a mudança das redes neurais corticais pela sensibilização central do complexo da dor, com repercussões emocional, físico e mental. Nessa linha, Tonial et al. (2014) apontaram a relação direta da dor crônica e da qualidade do sono, ou seja, quanto maior a intensidade da dor, maior o débito de sono, portanto, indivíduos com grau I e II de dor, apresentaram sono médio, grau III de dor, obtiveram sono médio e grave, enquanto, grau IV de dor, o sono foi classificado como gravíssimo. Nesse sentido, estudos que busquem avaliar biomarcadores de dor, por meio da avaliação da atividade cerebral, podem ajudar a compreender a relação dessas mudanças na atividade neural e nos padrões de sono em indivíduos com dor crônica.

A eletroencefalografia tem sido apontada como promissora para investigar padrões cerebrais em dor crônica. Desta forma, uma revisão sistêmica, Zebhauser et. al. (2022) avaliou diversos estudos que abordavam o uso do EEG na dor e mostraram o grande potencial da técnica para ser usada como biomarcador de dor crônica.

No que se refere ao manejo da dor crônica, evidências vêm demonstrando a eficiência da atividade aeróbica para o tratamento da dor crônica lombar (LIZIER, 2012), assim como quando combinada a outras técnicas como a Estimulação Transcraniana (ETCC) em áreas específicas do cérebro, como córtex motor primário (M1) e córtex pré-frontal dorsolateral, na modulação dor (PACHECO-BARRIOS, 2022).

Portanto, integrar o exercício aeróbico e a ETCC como forma de modulação da dor e do sono de indivíduos com dor lombar crônica inespecífica, se torna relevante para a saúde física e para a percepção de bem-estar. Ademais, usar uma tecnologia como EEG para identificar mudanças no padrão da atividade neural após o programa de intervenção, ajuda a identificar marcadores biológicos de dor para esses

indivíduos, além do respaldo da melhora clínica. Desta forma, esse estudo tem como objetivo analisar os efeitos da combinação do exercício aeróbico e ETCC na qualidade do sono, sensibilização central e desempenho funcional. Além de avaliar a resposta da potência das ondas alfa pela eletroencefalografia.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

A dor crônica é definida como qualquer dor que perdura por mais de 12 semanas, e segundo a Organização Mundial da Saúde (OMS), acomete cerca de 30% da população mundial. O quadro algico crônico pode impactar a vida do indivíduo em diversas áreas, nos âmbitos: psicológico (ansiedade, depressão e labilidade emocional), socioeconômico (afastamento da atividade laboral, redução do tempo e qualidade do lazer), físico e da saúde geral (diminuição da capacidade, da mobilidade, aumento da fadiga e alterações no sono) (YENG et al., 1999).

As alterações ampliadas da dor crônica podem estar relacionadas a sensibilização central. A sensibilização central indica um mau funcionamento das vias nociceptivas, sugerindo um aumento da excitabilidade da membrana e amplificação das respostas dadas às entradas nociceptivas. Os neurônios sensibilizados do corno dorsal espinhal, aumentam sua atividade espontânea, aumentando também seus campos receptivos de estímulos. Portanto, a hiperativação dessas vias, causadas por má adaptação nos circuitos de dor, promovem diminuição do limiar de dor e aumento das sensações dolorosas mesmo sem nenhuma lesão periférica ou estímulos nociceptivos (CAUMO, W. et al, 2017).

A dor crônica pode afetar indivíduos de qualquer faixa etária e sexo biológico, porém, no Brasil, a prevalência é maior em mulheres e a região mais acometida é a lombar (VASCONCELOS et al., 2018). Entre os casos de lombalgia, cerca de 85% dos relatos são classificados como dor lombar não específica. Neste caso, o tratamento baseia-se na redução da dor e das consequências associadas (MAHER et al., 2017).

Dentre as alterações fisiológicas da dor crônica está a mudança do sono, relacionada à sensibilização central. Estudos mostraram que em pessoas saudáveis, a privação de uma noite de sono causa aumento nos níveis de ansiedade e hiperalgesia por redução da função inibitória nociceptiva endógena (ONEN, S. H. et al, 2008). Nijs et al. (2018) mostraram que alterações entre sono e dor crônica podem estar intrinsecamente relacionadas, ou seja, a disfunção do sono pode causar dor, assim como a dor pode gerar alteração no sono.

Dessa forma, a qualidade de vida e de sono em pacientes com lombalgia crônica inespecífica são comumente pesquisados para melhor entendimento da disfunção e para elaboração de tratamentos mais eficientes. Segundo Owen et al. (2019), o exercício aeróbico é um dos tratamentos que demonstram resultados significativos em pacientes com dor lombar crônica inespecífica, tanto para melhora de dor como para a saúde mental. Além disso, há melhora da qualidade do sono no geral, incluindo a diminuição da fragmentação do sono (VAN SANTEN et al., 2002) e aumento da duração do sono (MARTINS ; MELLO; TUFIK, 2001), por induzir mudanças de neurotransmissores e ajudar na modulação cortical.

O exercício físico, estimula constantemente as fibras descendentes neuromotoras, que são responsáveis por transmitir comandos motores do SNC para os neurônios motores inferiores e controlar a contração muscular durante o exercício. A atividade constante dessas fibras descendentes estimula a liberação de opioides endógenos como beta-endorfinas e metaencefalinas. Os opioides endógenos atuam na modulação da dor como analgésico e promovem diminuição da percepção dolorosa. (SOUZA et al, 2009)

Evidências científicas têm mostrado a importância da combinação de terapêuticas para potencializar o efeito do exercício físico no controle analgésico da dor e na duração do efeito. Nesse sentido, estudos recentes têm apontado para a ETCC como sendo uma técnica segura e promissora no controle da dor crônica, por gerar efeitos de curto e longo prazo na modulação da dor. A longo prazo, o ETCC pode aumentar as respostas pós-sinápticas (potencialização a longo prazo - LTP) por meio da estimulação anódica, ou, diminuir as respostas pós-sinápticas (depressão a longo prazo – LTD), por meio da estimulação catódica; levando a um aumento de neuroplasticidade da rede neuronal do complexo da dor. (PACHECO-BARRIOS et al.,2020)

Em revisão sistemática com meta-análise foi analisada a eficácia da ETCC em algumas doenças crônicas e os resultados demonstraram melhora significativa no tratamento de dor lombar crônica não específica com uso da ETCC anódica no córtex motor primário (M1)(MEHTA et al., 2015; BOLDT et al., 2014; SHIRAHINE et al., 2016). Os benefícios do uso da ETCC anódica na circuitaria da dor, são justificados por diversos estudos como: promoção do aumento da neuroplasticidade por influência do BDNF. A proteína BDNF, por sua vez, ajuda a regular a inibição do ácido gama-aminobutírico (GABA) e diminuir a hiperexcitabilidade do sistema nervoso central, por consequência, ajuda no efeito inibitório da dor (PACHECO-BARRIOS et al.,2020).

Os efeitos da ETCC na dor crônica são otimizados quando associados ao exercício físico. (PACHECO-BARRIOS et al., 2020). Straudi et al. (2018), combinaram o uso do ETCC à exercícios aeróbicos em indivíduos com dor lombar crônica e verificaram o aumento dos efeitos analgésicos, quando comparado a ETCC placebo e exercício aeróbico. Entretanto, as doses terapêuticas ainda não são muito bem definidas, por isso, novos estudos nessa área são necessários. A literatura sobre o uso da ETCC combinada com outras terapêuticas, como exercício físico, para atenuar quadro de dores crônicas é vasta (CARDENARROJAS, 2020; STRUDI, 2018; MENDONCA, 2016), porém poucos estudos foram realizados até o momento para demonstrar o efeito da ETCC na dor lombar crônica inespecífica. Portanto, faz-se necessário o uso dessa tecnologia potencial associada ao exercício aeróbico como estratégia terapêutica analgésica para pessoas com dor lombar crônica inespecífica e verificar o seu impacto na qualidade de sono. Porém, será que o efeito dessa terapêutica combinada modula a atividade cerebral?

Estudos em neurociência da dor vêm evoluindo de forma exponencial, na mesma proporção em que a tecnologia avança no sentido de precisão de biomarcadores de dor. Nessa linha, técnicas como a eletroencefalografia (EEG) tem sido apontada como biomarcador confiável na avaliação cortical de pacientes com dor crônica. TEIXEIRA et. al. (2022), observaram que a dor crônica está relacionada a alterações específicas nas frequências das ondas cerebrais, principalmente as ondas alfa, em diferentes áreas cerebrais envolvidas na modulação da dor. As ondas alfa são produzidas quando há a desaceleração da atividade cerebral para uma frequência de 8 a 13 HZ, e então, há a promoção do relaxamento. Os estudos revelaram que pessoas com dor crônica apresentam uma atividade anormal das ondas alfas em repouso (NIR et al., 2012; NICKEL et al., 2017; LI et al., 2016; SCHULZ et al., 2015).

Além da relação com a dor, as ondas alfa estão diretamente ligadas com a qualidade do sono. Segundo Tonial et al. (2014), a quantidade de emissões alfa é inversamente proporcional ao estado de relaxamento durante o sono, ou seja, quanto menos ondas alfa emitidas, maior o nível de atividade cerebral durante o sono e menos reparador ele será.

Diante desse contexto, faz-se necessária a investigação dos efeitos da combinação do exercício aeróbico e da ETCC na qualidade do sono, e entender a sua relação com a atividade neural pela EEG. Esse estudo contribuirá para uma maior compreensão da rede neuronal da dor e dos seus efeitos regulatórios na analgesia e na qualidade do sono.

3. METODOLOGIA

O estudo é um ensaio clínico randomizado cego e controlado com placebo, e foi 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 divulgação dentro da Universidade Presbiteriana Mackenzie. Os participantes interessados preencheram um questionário online (nome, telefone de contato e e-mail). Os participantes foram contatados via telefone ou WhatsApp para explicação dos objetivos e realização da primeira triagem de critérios de inclusão e exclusão. Caso o participante tenha sido elegível, foi agendado um encontro presencial para informações adicionais sobre o estudo e procedimento experimental, e esclarecimento de possíveis dúvidas.

Foram incluídos 19 participantes dos sexos feminino e masculino, com faixa etária de 18 a 59 anos, que apresentavam lombalgia inespecífica a mais de 3 meses. Foram excluídos: participantes que apresentem enfermidades prévias que interfiram 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.

Alocação e randomização

Foram selecionados 19 participantes. 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). O sorteio foi realizado de forma sigilosa por outro pesquisador que não esteve envolvido nas coletas.

A pesquisa encontra-se dentro das normas estabelecidas pela resolução 466/12 do Conselho Nacional de Saúde e baseado nas recomendações estabelecidas na Declaração de Helsinki (1964), conforme emenda em Tóquio (1975), Veneza (1983) e Hong-Kong (1989). O projeto foi submetido ao Comitê de Ética em Pesquisa da Universidade Presbiteriana Mackenzie. Os indivíduos selecionados para pesquisa foram incluídos após aceitarem espontaneamente a participar do estudo e assinar o Termo de Consentimento Livre e Esclarecido, em duas cópias, sendo uma para o participante e o outro para o pesquisador.

Os participantes foram inicialmente avaliados por meio de uma ficha sociodemográfica que contemplava idade, sexo, escolaridade e presença de comorbidades, como hipertensão, diabetes, depressão e ansiedade. Para incapacidade funcional foi mensurada pelo Questionário de Roland-Morris, específico para indivíduos com lombalgia, cujos escores superiores a 14 pontos indicam presença de limitação relevante (Nusbaum et al., 2001). O desempenho funcional foi avaliado pelo Teste de Caminhada de 10 Metros (TC10M), considerando-se o melhor tempo em três tentativas (Novaes et al., 2011). A qualidade do sono foi analisada pelo Índice de Qualidade do Sono de Pittsburgh (PSQI), traduzido e validado para o português, no qual pontuações acima de cinco indicam má qualidade do sono (Bertolazi et al., 2011). A sensibilização central foi avaliada pelo Central Sensitization Inventory, versão brasileira (BP-CSI), que investiga sintomas somáticos e diagnósticos clínicos associados.

A intervenção com estimulação transcraniana por corrente contínua (ETCC) foi conduzida com eletrodos de borracha (35 cm²) embebidos em solução salina, aplicando-se corrente de 2 mA. O ânodo foi posicionado sobre o córtex motor primário esquerdo (C3) e o cátodo na região supraorbital contralateral, conforme o sistema 10–20 de EEG (Bolognini et al., 2010; Silva, Kakuta & Loreti, 2020). No grupo placebo, os eletrodos foram posicionados nos mesmos locais, mas a corrente foi desligada após 30 segundos. A ordem de aplicação (ativa/placebo) foi randomizada e contrabalançada, mantendo o cegamento dos participantes. Após cada sessão, um questionário sobre efeitos adversos comuns à ETCC foi aplicado, classificando intensidade e relação com a estimulação (Nitsche et al., 2008).

Por fim, a atividade cortical foi registrada por meio de eletroencefalografia (EEG), com ênfase nas oscilações alfa, utilizando sistema de 128 canais do Laboratório de Neurociência Cognitiva e Social da Universidade Presbiteriana Mackenzie. As coletas ocorreram em repouso, no início e no final da intervenção, permitindo análise comparativa dos padrões de atividade neural entre os grupos.

3.3 Procedimento experimental

Para avaliação inicial, o participante foi posicionado em uma cadeira (ajustada conforme sua altura) confortavelmente, com braços apoiados na mesa e pés apoiados no chão para assinar o TCLE. A ficha de informações pessoais e de saúde, questionários de Roland Morris, inventário de sensibilização central e PSQI foram preenchidos via Google Forms, por link enviado pelo WhatsApp. Foi realizado o teste de caminhada de 10 metros (TC10m), e, em seguida, realizado a avaliação da atividade cerebral pelo EEG.

O participante foi conduzido a uma sala equipada com o sistema de eletroencefalografia (EEG) utilizando o software NetStation®, onde foi realizado o registro da atividade eletroencefalográfica. Posicionado de forma confortável em uma poltrona, após a colocação da touca no escalpe, iniciou-se a tarefa experimental. Esta consistia em permanecer com os olhos abertos, em estado de alerta, por 5 minutos, seguida de 5 minutos com os olhos fechados e o corpo relaxado, totalizando aproximadamente 10 minutos de registro.

O registro da atividade eletroencefalográfica foi realizado antes e após a intervenção, seguindo o mesmo procedimento descrito anteriormente. A intervenção consistiu na aplicação de estimulação transcraniana por corrente contínua (ETCC), ativa ou placebo (conforme descrito na seção Materiais e Instrumentos), por 20 minutos, associada a treino aeróbico em bicicleta ergométrica. A velocidade do exercício foi ajustada progressivamente até que o participante atingisse entre 60% e 80% da frequência cardíaca máxima (FC_{máx}) prevista para a idade, calculada pela fórmula $FC_{máx} = 220 - \text{idade}$. As sessões de estimulação, com duração de 20 minutos, ocorreram três vezes por semana (D1–D12), com intervalo de 48 horas entre cada aplicação, sendo sempre associadas ao treino aeróbico.

A intensidade do exercício foi monitorada individualmente por meio da escala de Borg modificada, referente à percepção de esforço. Ao término do exercício, o dispositivo de ETCC era desligado e o participante respondia verbalmente a um questionário para controle de possíveis efeitos colaterais da estimulação.

Antes e após a intervenção, foram mensuradas a frequência cardíaca (FC) e a pressão arterial (PA). Ao final das 14 sessões, foram realizadas reavaliações dos mesmos parâmetros coletados inicialmente, incluindo o questionário de Roland-Morris, o índice de qualidade do sono (PSQI), o teste de caminhada de 10 metros (TC10m) e a análise da atividade cerebral por EEG.

3.5 Análise estatística

Inicialmente, os dados dos participantes foram analisados no intuito de se estudar a distribuição desses dados. Foi usado o teste de Wilk-Shapiro. Ao obter uma distribuição normal dos dados, médias e desvios padrões foram reportados. Adicionalmente, testes que assumem uma distribuição normal como ANOVA, ANCOVA, testes post-hocs como Fisher e Tukey HSD e correlação de Pearson foram usados para

analisar os dados. Se os dados não obtivessem uma distribuição normal, então medianas e faixas de percentil (25% e 75%) seriam reportados. Adicionalmente, testes de Friedman para análise de variância, Wilcoxon para análise pos-hoc e Spearman para análise de correlação foram utilizados. Para todos os testes, é estabelecido um erro $\alpha=5\%$.

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.

4. RESULTADO

Participaram do estudo 19 indivíduos com lombalgia crônica inespecífica, distribuídos em dois grupos: ETCC ativa + exercício (n = 10) e ETCC placebo + exercício (n = 9). A média de idade foi de 25,9 $\pm$ 9,9 anos (mínimo de 18 e máximo de 53 anos), sem diferença significativa entre os grupos (p = 0,123). A maioria dos participantes era do sexo feminino (78,9%) e possuía ensino médio completo ou superior (84,2%). Em relação ao uso de medicamentos, 31,6% dos participantes relataram uso regular, sem diferença significativa entre os grupos (p = 0,252).

No pré-tratamento, a pontuação no Roland-Morris foi de 5,68 $\pm$ 2,91, indicando presença de incapacidade leve a moderada. A qualidade do sono, avaliada pelo PSQI, apresentou média de 9,16 $\pm$ 2,38, sugerindo má qualidade do sono na amostra. O escore médio do BP-CSI indicou presença de sintomas compatíveis com sensibilização central, sem diferenças significativas entre os grupos no início do estudo.

Tabela 01: Características da amostra no pré-tratamento

Variável	Total (n = 19)	Grupo 1 (n=10)	Grupo 2 (n=9)	p-valor
Idade, anos (média ± DP)	25,9 ± 9,9	29,3 ± 12,0	22,2 ± 5,4	0,123
Sexo feminino, n (%)	15 (78,9%)	8 (80,0%)	7 (77,8%)	0,906
Escolaridade: ensino médio, n (%)	16 (84,2%)	7 (70,0%)	9 (100,0%)	0,361
Uso de medicamentos, n (%)	6 (31,6%)	2 (20,0%)	4 (44,4%)	0,252
Roland-Morris (média ± DP)	5,68 ± 2,91	6,70 ± 3,20	4,56 ± 2,19	0,110
PSQI (média ± DP)	9,16 ± 2,38	9,40 ± 2,84	8,89 ± 1,76	0,387
BP-CSI (média ± DP)	—	48,8 ± 2,9	36,1 ± 3,0	0,205

*Grupo 1: EA + ETCC ativo; Grupo 2: EA+ ETCC placebo

A análise do Teste de Caminhada de 10 Metros (TC10m) revelou um efeito principal significativo do tempo ($F(1,17) = 17.962$, $p < 0.001$, $\eta^2p = 0.514$), indicando melhora no desempenho funcional da marcha após a intervenção em ambos os grupos. As médias estimadas mostraram redução no tempo de execução da tarefa tanto no grupo ETCC (de 5.36 para 4.97 segundos) quanto no grupo controle (de 5.35 para 4.72 segundos). No entanto, não foram observadas diferenças estatisticamente significativas entre os grupos ($p = 0.719$) nem interação tempo $\times$ grupo ($p = 0.341$), sugerindo que o exercício aeróbico foi eficaz para melhorar a performance da marcha, independentemente da aplicação da ETCC.

A análise da incapacidade funcional, avaliada pela escala de Roland-Morris, revelou tendência à redução dos escores ao longo do tempo ($F(1,17) = 4.36$, $p = 0.052$, $\eta^2p = 0.204$), com diminuição média de 1.80 pontos no grupo ETCC ativa (de 6.70 para 4.90) e de 1.56 pontos no grupo controle (de 4.56 para 3.00). Não foram observadas diferenças estatisticamente significativas entre os grupos ($F(1,17) = 2.98$, $p = 0.103$) nem interação tempo $\times$ grupo ($F(1,17) = 0.023$, $p = 0.881$). Apesar disso, o tamanho de efeito para o tempo foi moderado, sugerindo relevância clínica da melhora funcional.

A análise da qualidade do sono, avaliada pelo PSQI, não revelou efeitos significativos do tempo ($F(1,17) = 0.445$, $p = 0.514$, $\eta^2p = 0.026$), do grupo ($p = 0.387$) ou da interação tempo $\times$ grupo ($p = 0.592$). O grupo intervenção manteve escore praticamente inalterado (9.40 para 9.30), enquanto o grupo controle apresentou uma redução média de 1 ponto (8.89 para 7.89), sem atingir significância estatística. Esses resultados sugerem que a intervenção multimodal, com ou sem ETCC, não promoveu melhora clinicamente relevante na qualidade do sono dos participantes ao longo do período avaliado.

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.

Análise do EGG

A atividade cortical foi analisada por meio da potência relativa das bandas de frequência do EEG, com foco nas bandas alfa (8–12 Hz), theta (4–7 Hz) e delta (0.5–3.5 Hz), registradas em repouso nas condições de olhos abertos e olhos fechados, antes e após a intervenção. Os dados foram pré-processados com filtros adequados, remoção de artefatos e re-referência. A potência espectral média foi extraída a partir de eletrodos nas regiões occipital, parietal e pré-frontal, com especial atenção à condição de olhos fechados, considerada mais estável e sensível para o registro da atividade elétrica de repouso.

Os resultados da análise do EEG indicaram que os efeitos significativos observados na condição de olhos fechados refletem um padrão neurofisiológico esperado, caracterizado pelo aumento da potência relativa das bandas alfa, delta e teta em repouso. Esse achado valida o protocolo de aquisição e processamento dos sinais, mas não revelou alterações decorrentes da intervenção.

Na banda alfa, a ANOVA mostrou um efeito principal significativo da condição ($F(1,18) = 28.87$; $p < 0.001$; $\eta^2p = 0.616$), com maior potência durante o repouso de olhos fechados, em conformidade com a literatura; contudo, não foram observados efeitos de tempo ($p = 0.633$), grupo ($p = 0.454$) ou interações (p

$> 0,05$), sugerindo que a combinação de ETCC e exercício aeróbico não modificou significativamente a atividade alfa. Resultados semelhantes foram observados para a banda delta, que apresentou efeito principal da condição ($F(1,18) = 34,20$; $p < 0,001$; $\eta^2p = 0,655$), sem efeitos de tempo, grupo ou interações, e para a banda theta, que também apresentou efeito principal da condição ($F(1,18) = 8,14$; $p = 0,011$; $\eta^2p = 0,311$), com maior potência em olhos fechados, mas sem alterações associadas à intervenção.

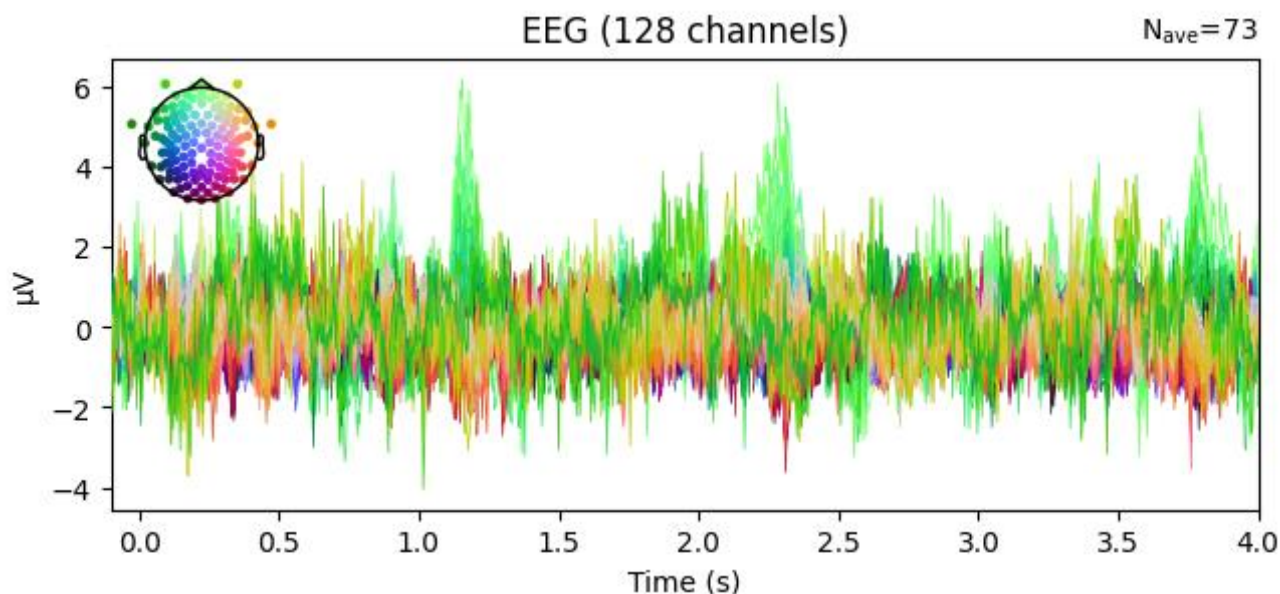


Figura 01. Sinais eletroencefalográficos (EEG) registrados em 128 canais durante repouso, com média de 73 segmentos. Cada traçado representa a atividade elétrica cerebral em microvolts (μV) ao longo de 4 segundos. O mapa inserido no canto superior esquerdo ilustra a distribuição espacial dos eletrodos no escalpo, conforme o sistema de 128 canais.

Correlações entre bandas de EEG e desfechos clínicos

Foram analisadas correlações entre os deltas da potência relativa das bandas (olhos fechados) e os desfechos clínicos. O principal achado foi a correlação significativa entre o aumento da banda theta e a redução da incapacidade funcional medida pelo Roland-Morris ($r = 0,637$; $p = 0,003$), sugerindo um possível papel neuroadaptativo dessa frequência na resposta à intervenção. Também foram observadas tendências de correlação entre a melhora da qualidade do sono e da funcionalidade ($r = 0,429$; $p = 0,067$).

A regressão linear simples confirmou a associação entre aumento da potência theta e melhora funcional ($F(1,17) = 11,62$; $p = 0,003$; $R^2 = 0,406$), indicando que 40,6% da variância na redução da incapacidade foi explicada pela atividade theta. O coeficiente de regressão ($B = 18,31$; $p = 0,003$) mostrou que maiores aumentos da potência theta estiveram associados a reduções mais expressivas no escore de incapacidade, enquanto o intercepto negativo ($-1,30$; $p = 0,048$) sugere melhora funcional modesta mesmo sem alterações nessa banda, possivelmente por outros mecanismos. Esses achados reforçam um possível papel modulador da atividade cortical de baixa frequência no contexto da dor crônica e da reabilitação funcional.

5. DISCUSSÃO

O presente estudo teve como objetivo analisar os efeitos da combinação de exercício aeróbico e estimulação transcraniana por corrente contínua (ETCC) aplicada sobre o córtex motor primário (M1) na dor, qualidade do sono e atividade cortical de indivíduos com lombalgia crônica inespecífica. Foram avaliadas as bandas alfa, delta e theta por eletroencefalografia (EEG) em repouso, associando seus padrões às medidas clínicas de dor, funcionalidade, sensibilização central e sono.

De forma geral, os dados demonstraram que o exercício aeróbico promoveu efeitos interessantes em relação à sensibilização central, observou-se redução significativa nos escores do BP-CSI apenas no grupo intervenção, sugerindo efeito específico da ETCC combinada ao exercício. Esse achado corrobora a hipótese de que intervenções que atuam diretamente sobre o sistema nervoso central contribuem para a reorganização neurofisiológica da dor (PACHECO-BARRIOS et al., 2020). Além disso, a associação entre aumento da atividade theta e melhora funcional reforça a ideia de que os benefícios da intervenção não se restringem ao nível periférico, mas envolvem ajustes centrais relevantes para a reabilitação.

Apesar de não terem sido detectadas alterações significativas nas bandas alfa, delta e theta entre grupos ou ao longo do tempo, análises de correlação e regressão revelaram que participantes com maior aumento da atividade theta em olhos fechados apresentaram maior redução da incapacidade funcional (Roland-Morris). O modelo explicou 40,6% da variância da melhora, sugerindo que a atividade theta pode ter papel neuroadaptativo na resposta à intervenção, achado consistente com estudos que associam essa banda a processos de modulação da dor, regulação emocional e reorganização funcional em contextos de dor crônica (JENSEN et al., 2013; SCHABRUN et al., 2016).

A literatura também relaciona a atividade theta em repouso com redes neurais voltadas à atenção interna e autorregulação, como a rede em modo padrão e o giro cingulado anterior (CAHN; POLICH, 2006; HARMONY, 2013). Nesse sentido, os resultados sugerem que indivíduos com dor crônica com maior capacidade de reorganização cortical, refletida pelo aumento das ondas theta, tendem a apresentar maior recuperação funcional após intervenção combinada de neuromodulação e exercício aeróbico.

Esses achados também apontam para a utilidade da eletroencefalografia quantitativa como ferramenta sensível para detectar mudanças neurofisiológicas individuais, que podem não ser evidentes em análises em grupo. A identificação da banda theta como possível marcador de resposta clínica abre caminho para que novos protocolos sejam realizados, integrando treinamento funcional e neuromodulação como estratégias de reabilitação.

Ademais, apesar da ausência de melhora significativa na qualidade do sono (PSQI) após a intervenção, os dados de EEG e sensibilização central sugerem efeitos centrais relevantes que podem ter ocorrido, mas não foram captados por medidas subjetivas de sono, conhecidas por sua limitação em detectar mudanças sutis (BARONI, 2020). Considerando a associação entre sensibilização central e distúrbios do sono em dor crônica, é possível que a intervenção tenha promovido alterações neurofisiológicas iniciais que, a longo prazo, poderiam impactar na regulação do sono.

Além disso, um estudo com pacientes com lesão medular (Simis et al., 2021) relatou que mudanças na razão entre as ondas alfa e theta no EEG, registradas em repouso, estiveram significativamente associadas à melhora da marcha e do equilíbrio durante a reabilitação. Esses achados sugerem que essa relação entre bandas de frequência pode servir como marcador neurofisiológico da recuperação funcional, apoiando a hipótese de que alterações na atividade theta podem refletir processos adaptativos e neuroplásticos em contextos de reabilitação funcional.

O estudo apresenta limitações importantes. O tamanho amostral reduzido limitou o poder estatístico para identificar diferenças sutis e aumentou a influência de outliers. A duração relativamente curta da intervenção pode não ter sido suficiente para mudanças sustentáveis em desfechos complexos, como qualidade do sono. O uso predominante de medidas subjetivas (EVA, PSQI) pode ter restringido a sensibilidade para detectar alterações discretas. A ausência de acompanhamento em médio e longo prazo impede verificar a manutenção dos efeitos. Além disso, a variabilidade individual na resposta à ETCC,

relacionada a fatores anatômicos, sensibilidade individual e neuroplasticidade basal, não foi controlada, o que pode ter contribuído para os resultados heterogêneos.

Estudos futuros devem incluir amostras maiores, intervenções de maior duração, medidas objetivas complementares e análises de subgrupos, de modo a confirmar e expandir os achados, explorando especialmente a banda theta como biomarcador clínico e alvo terapêutico.

5. CONCLUSÃO

O estudo evidenciou que a associação da ETCC ao exercício aeróbico reduziu de forma significativa a sensibilização central (BP-CSI) no grupo intervenção, sugerindo efeito modulador nos circuitos centrais da dor. Além de ter promovido melhoras significativas no desempenho funcional de marcha. Embora não tenham sido observadas alterações significativas na qualidade do sono ou nas bandas espectrais médias do EEG, verificou-se que o aumento da atividade theta esteve associado à diminuição da incapacidade funcional (Roland-Morris), indicando relevância clínica e sugerindo um possível papel neuroadaptativo dessa frequência.

Conclui-se que o exercício aeróbico se mostrou uma estratégia eficaz e clinicamente relevante no manejo do desempenho funcional na dor lombar crônica, enquanto sua combinação com a ETCC apresentou efeitos adicionais na modulação central e em ajustes neurofuncionais relacionados à plasticidade cortical. Esses achados reforçam o potencial da integração de modalidades multimodais no tratamento da dor crônica.

6. REFERÊNCIAS

1. BARONI, Andrea et al. Hyperalgesia and central sensitization in subjects with chronic orofacial pain: analysis of pain thresholds and EEG biomarkers. *Frontiers in neuroscience*, v. 14, p. 552650, 2020.
2. BERTOLAZI, Alessandra Naimaier. Tradução, adaptação cultural e validação de dois instrumentos de avaliação do sono: Escala de Sonolência de Epworth e Índice de Qualidade de Sono de Pittsburgh. 2008.
3. BOLDT, Inga et al. Non-pharmacological interventions for chronic pain in people with spinal cord injury. *Cochrane Database of Systematic Reviews*, n. 11, 2014
4. BOLOGNINI, Nadia et al. Neuromodulation of multisensory perception: a tDCS study of the sound-induced flash illusion. *Neuropsychologia*, v. 49, n. 2, p. 231-237, 2011.

5. CARDENAS-ROJAS, Alejandra et al. Noninvasive brain stimulation combined with exercise in chronic pain: a systematic review and meta-analysis. *Expert review of neurotherapeutics*, v. 20, n. 4, p. 401-412, 2020.
6. 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.
7. DA SILVA, Alisson Alexandre; KAKUTA, Elaine; LORETI, Eduardo Henrique. Estimulação transcraniana por corrente contínua em fibromialgia: uma revisão sistemática. *Revista Neurociências*, v. 28, p. 1-18, 2020.
8. HEITMANN, Henrik et al. Longitudinal resting-state electroencephalography in patients with chronic pain undergoing interdisciplinary multimodal pain therapy. *Pain*, v. 163, n. 9, p. e997-e1005, 2022.
9. LI, Linling et al. Placebo analgesia changes alpha oscillations induced by tonic muscle pain: EEG frequency analysis including data during pain evaluation. *Frontiers in Computational Neuroscience*, v. 10, p. 45, 2016.
10. LIZIER, Daniele Tatiane; PEREZ, Marcelo Vaz; SAKATA, Rioko Kimiko. Exercises for treatment of nonspecific low back pain. *Brazilian Journal of Anesthesiology*, v. 62, n. 6, p. 838-846, 2012.
11. MAHER, Chris; UNDERWOOD, Martin; BUCHBINDER, Rachelle. Non-specific low back pain. *The Lancet*, v. 389, n. 10070, p. 736-747, 2017.
12. MARTINS, Paulo José Forcina; MELLO, Marco Túlio de; TUFIK, Sergio. Exercício e sono. *Revista Brasileira de Medicina do Esporte*, v. 7, p. 28-36, 2001.
13. MEHTA, Swati et al. Effectiveness of transcranial direct current stimulation for the management of neuropathic pain after spinal cord injury: a meta-analysis. *Spinal Cord*, v. 53, n. 11, p. 780-785, 2015.
14. MENDONCA, Mariana E. et al. Transcranial direct current stimulation combined with aerobic exercise to optimize analgesic responses in fibromyalgia: a randomized placebo-controlled clinical trial. *Frontiers in human neuroscience*, v. 10, p. 68, 2016.
15. MENG, Xian-Guo; YUE, Shou-Wei. Efficacy of aerobic exercise for treatment of chronic low back pain: a meta-analysis. *American journal of physical medicine & rehabilitation*, v. 94, n. 5, p. 358-365, 2015.
16. NICKEL, Moritz M. et al. Brain oscillations differentially encode noxious stimulus intensity and pain intensity. *Neuroimage*, v. 148, p. 141-147, 2017.
17. NIJS, Jo et al. Sleep disturbances in chronic pain: neurobiology, assessment, and treatment in physical therapist practice. *Physical therapy*, v. 98, n. 5, p. 325-335, 2018.

18. NIR, Rony-Reuven et al. Tonic pain and continuous EEG: prediction of subjective pain perception by alpha-1 power during stimulation and at rest. *Clinical Neurophysiology*, v. 123, n. 3, p. 605-612, 2012.
19. NITSCHKE, Michael A. et al. Transcranial direct current stimulation: state of the art 2008. *Brain stimulation*, v. 1, n. 3, p. 206-223, 2008.
20. NUSBAUM, L. et al. Translation, adaptation and validation of the Roland-Morris questionnaire-Brazil Roland-Morris. *Brazilian Journal of Medical and Biological Research*, v. 34, p. 203-210, 2001.
21. O'CONNELL, Neil E. et al. Transcranial direct current stimulation of the motor cortex in the treatment of chronic nonspecific low back pain: a randomized, double-blind exploratory study. *The Clinical journal of pain*, v. 29, n. 1, p. 26-34, 2013.
22. 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. 879-898, 2020.
23. ONEN, S. Hakki et al. The effects of total sleep deprivation, selective sleep interruption and sleep recovery on pain tolerance thresholds in healthy subjects. *Journal of sleep research*, v. 10, n. 1, p. 35-42, 2001.
24. 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.
25. SCHULZ, Enrico et al. Prefrontal gamma oscillations encode tonic pain in humans. *Cerebral cortex*, v. 25, n. 11, p. 4407-4414, 2015.
26. SHIRAHIGE, Livia et al. Efficacy of noninvasive brain stimulation on pain control in migraine patients: A systematic review and meta-analysis. *Headache: The Journal of Head and Face Pain*, v. 56, n. 10, p. 1565-1596, 2016.
27. SIMIS, Marcel et al. Electroencephalography as a biomarker for functional recovery in spinal cord injury patients. *Frontiers in Human Neuroscience*, v. 15, p. 548558, 2021.
28. 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.
29. STRAUDI, Sofia et al. The effects of transcranial direct current stimulation (tDCS) combined with group exercise treatment in subjects with chronic low back pain: a pilot randomized control trial. *Clinical rehabilitation*, v. 32, n. 10, p. 1348-1356, 2018.
30. 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.
31. TONIAL, Leandro Freitas; STECHMAN NETO, José; HUMMIG, Wagner. Dor crônica relacionada à qualidade do sono. *Einstein (São Paulo)*, v. 12, p. 159-163, 2014.
32. VASCONCELOS, Fernando Holanda; ARAÚJO, Gessi Carvalho de. Prevalence of chronic pain in Brazil: a descriptive study. *BrJP*, v. 1, p. 176-179, 2018.

33. VAN SANTEN, Marijke et al. A randomized clinical trial comparing fitness and biofeedback training versus basic treatment in patients with fibromyalgia. *The Journal of rheumatology*, v. 29, n. 3, p. 575-581, 2002.
34. YENG, Lin Tchia; TEIXEIRA, Manoel Jacobsen. Tratamento multidisciplinar dos doentes com dor crônica. *Prática Hospitalar*, v. 35, p. 21-24, 2004.
35. ZEBHAUSER, Paul Theo; HOHN, Vanessa D.; PLONER, Markus. Resting state EEG and MEG as biomarkers of chronic pain: a systematic review. *Pain*, p. 10.1097, 2022.
36. ZOLEZZI, Daniela M.; ALONSO-VALERDI, Luz María; IBARRA-ZARATE, David I. EEG frequency band analysis in chronic neuropathic pain: A linear and nonlinear approach to classify pain severity. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, v. 230, p. 107349, 2023.