

EVIDÊNCIAS ASSOCIADAS À EDUCAÇÃO CRUZADA E À PLASTICIDADE NEURAL NA REABILITAÇÃO DO HEMISFÉRIO LESADO: UMA REVISÃO INTEGRATIVA

DOI: <https://doi.org/10.31692/2764-3433.v6i1.314>

¹YÚRI CRISTIAN DE LIMA

Discente de Fisioterapia, Universidade Federal de Pernambuco, yrulima.dz@gmail.com

²NATÁLIA KÁSSIA DE SOUZA OLIVEIRA

Discente de Fisioterapia, Universidade Estácio de Sá

³LAÍS MACÊDO MACIEL

Discente de Biomedicina, Universidade Federal de Pernambuco

⁴PALOMA PAULA FERREIRA SOTÉ

Discente de Fisioterapia, Universidade Federal de Pernambuco

⁵ISVÂNIA MARIA SERAFIM DA SILVA LOPES

Biomédica, Doutora em Tecnologias Energéticas Nucleares, Docente do Departamento de Biofísica e Radiobiologia, Universidade Federal de Pernambuco

RESUMO

Lesões motoras unilaterais, como as decorrentes de acidentes vasculares cerebrais ou traumas ortopédicos, representam um desafio significativo para a reabilitação, especialmente quando o membro afetado se encontra imobilizado ou com função severamente comprometida. Diante desse cenário, a educação cruzada, uma abordagem terapêutica que consiste no treinamento do membro saudável para induzir ganhos funcionais no membro contralateral afetado, surge como uma estratégia promissora que explora os mecanismos de plasticidade neural do sistema nervoso. A pesquisa destaca as evidências disponíveis acerca da eficácia da educação cruzada na recuperação motora de pacientes com lesões unilaterais, bem como compreender os mecanismos neurofisiológicos que sustentam a plasticidade inter-hemisférica envolvida nesse processo. Os estudos analisados demonstram que a intervenção promove ganhos de força significativos no membro não treinado, além de contribuir para a atenuação da atrofia por desuso e para a aceleração da recuperação funcional em pacientes ortopédicos e neurológicos. Esses efeitos positivos estão associados a uma complexa cascata de eventos neuroplásticos que se estende do córtex até a unidade motora, favorecendo adaptações neurais e facilitando a compensação funcional. A literatura revisada reforça que a educação cruzada é cientificamente fundamentada, representando recurso valioso para complementar programas convencionais de reabilitação. Entretanto, as direções para pesquisas futuras são claras, a eficácia da educação cruzada precisa ser testada em uma gama mais ampla de indivíduos acometidos, a fim de validar e expandir sua aplicação clínica, discutindo de forma mais aprofundada os mecanismos envolvidos. Conclui-se que a educação cruzada é uma intervenção terapêutica com sólida fundamentação científica, possuindo um papel essencial de induzir neuroplasticidade compensatória e promover a recuperação funcional, possibilitando uma técnica valiosa e de baixo custo para complementar os programas de reabilitação de indivíduos com lesões motoras unilaterais.

Palavras-Chave: Educação cruzada; Neuroplasticidade; reabilitação.

INTRODUÇÃO

As lesões motoras unilaterais, resultantes de eventos como o Acidente Vascular Cerebral (AVC), traumatismos cranioencefálicos ou lesões ortopédicas severas, impõem desafios substanciais à saúde pública e à qualidade de vida dos indivíduos acometidos. A perda de função de um membro não apenas limita drasticamente a capacidade de realizar atividades da vida diária, mas também desencadeia um ciclo vicioso de desuso. Fisiologicamente, a imobilização leva a consequências deletérias rápidas e severas, incluindo atrofia muscular, diminuição da densidade óssea, rigidez articular e uma redução significativa na representação sensorial e motora daquele membro no córtex cerebral. De fato, a perda de função transcende a simples fraqueza, afetando também o controle motor fino. A habilidade de manter uma força constante e precisa, conhecida como estabilidade da força (*force steadiness*), é fundamental para tarefas funcionais e depende diretamente da modulação coordenada das unidades motoras pelo sistema nervoso central. Flutuações na força, portanto, refletem variações no comando neural, e a perda dessa estabilidade é um componente crítico do declínio funcional observado após lesões (Enoka & Farina, 2021). A reabilitação motora tradicional, focada no treinamento direto do membro parético ou lesionado, embora essencial, enfrenta uma barreira crítica nas fases agudas, quando o membro não pode ser mobilizado ou submetido a cargas devido à dor, instabilidade estrutural (como em pós-operatórios) ou pela própria incapacidade neural de gerar contração voluntária (Lepley & Palmieri-Smith, 2014). Esta janela de tempo, crucial para a recuperação, muitas vezes é perdida, criando a necessidade urgente de abordagens terapêuticas alternativas que possam ser iniciadas precocemente (Farthing & Zehr, 2014).

A base biológica para toda recuperação funcional reside na notável capacidade do sistema nervoso de se adaptar e reorganizar, um processo denominado neuroplasticidade. Longe de ser uma estrutura estática, o cérebro modifica continuamente suas conexões sinápticas, vias neurais e mapas corticais em resposta a estímulos, aprendizado e lesões. Após um dano neurológico, a neuroplasticidade permite que funções perdidas sejam, em parte, assumidas por áreas cerebrais adjacentes ou por regiões homólogas no hemisfério contralateral. Potencializar esses mecanismos plásticos endógenos é o principal objetivo das modernas terapias de neuroreabilitação, buscando transformar estímulos terapêuticos em mudanças funcionais e duradouras.

Nesse contexto, emerge a educação cruzada (*cross-education*), um fenômeno neurofisiológico em que o treinamento de força de um membro induz, de forma notável, ganhos de força e habilidade no membro homólogo contralateral que permanece em repouso. Esta abordagem terapêutica oferece uma oportunidade única de intervir na reabilitação, utilizando o

membro saudável como um portal para estimular o sistema nervoso central (Hendy & Lamon, 2017). Ao treinar o lado não afetado, é possível promover a plasticidade em circuitos neurais que controlam ambos os membros, contornando a necessidade de movimento direto do membro lesionado e permitindo uma intervenção terapêutica ativa desde as fases mais precoces da recuperação (Farthing & Zehr, 2014).

A fundamentação da educação cruzada como uma intervenção primariamente neural é um dos pilares de sua aplicação. Essa premissa está alinhada com a compreensão fundamental das adaptações ao treinamento de força, onde os ganhos iniciais são amplamente atribuídos a fatores neurológicos, enquanto processos hipertróficos se manifestam mais tardiamente. A própria existência do efeito de treinamento cruzado é considerada uma forte evidência indireta do papel dominante das adaptações neurológicas, que englobam aprendizado, coordenação e otimização do comando motor central (Folland & Williams, 2007). Estudos experimentais demonstram de forma conclusiva que os ganhos de força observados no membro não treinado ocorrem na ausência de alterações estruturais locais, como a hipertrofia muscular (aumento do tamanho do músculo), ou de respostas endócrinas sistêmicas que pudessem explicar o efeito (Beyer *et al.*, 2016). Em vez disso, a evidência aponta para adaptações neurais diretas no membro não treinado. Estudos neurofisiológicos específicos demonstraram que os ganhos de força contralaterais são acompanhados por um aumento do impulso neural eferente, evidenciado pelo aumento da atividade eletromiográfica (EMG) e da amplitude da onda V, um marcador que reflete um aumento do comando motor descendente supraespinhal e/ou da excitabilidade dos motoneurônios espinhais (Fimland *et al.*, 2009). Essa dissociação entre ganho de força e alterações periféricas direciona inequivocamente o foco para as adaptações no sistema nervoso. Adicionalmente, a generalidade do fenômeno, ocorrendo de forma similar tanto nos membros superiores quanto nos inferiores, sugere um mecanismo de controle central, e não local, reforçando o paradigma de que o cérebro, e não apenas o músculo, está sendo "treinado" (Green & Gabriel, 2018).

Apesar do estabelecimento de sua base neural, a cascata precisa de eventos que permite que o treinamento de um braço fortaleça o outro permaneceu por muito tempo um quebra-cabeça. A compreensão de como o comando motor voluntário de um hemisfério cerebral resulta em adaptações plásticas no hemisfério oposto, e como essas adaptações são subsequentemente traduzidas em uma contração muscular mais forte através dos circuitos espinhais e das unidades motoras, é fundamental para otimizar a terapia (Lecce *et al.*, 2025). A síntese das evidências disponíveis sobre esses mecanismos em múltiplos níveis – cortical, espinhal e neuromuscular – é, portanto, essencial para transformar um fenômeno fascinante em uma ferramenta clínica

baseada em evidências.

Diante do exposto, a compreensão aprofundada dos mecanismos neuroplásticos e a consolidação das evidências sobre a eficácia da educação cruzada são cruciais para fundamentar sua aplicação na prática clínica de reabilitação. A presente revisão integrativa justifica-se pela necessidade de sintetizar o conhecimento atual para guiar profissionais na implementação desta estratégia terapêutica inovadora.

METODOLOGIA

Esta pesquisa é uma revisão integrativa fundamentada em informações coletadas em bases de dados científicos sobre a educação cruzada como estratégia de reabilitação motora, com ênfase nas evidências de plasticidade neural no hemisfério lesado. A escolha pela revisão integrativa justifica-se pela abrangência desse método, que permite a inclusão e síntese de estudos com diversas metodologias (experimentais, revisões sistemáticas e de consenso), oferecendo uma visão ampla e aprofundada sobre o tema e suas implicações para a prática clínica.

A revisão foi conduzida em seis etapas sequenciais:

- 1) identificação do tema e formulação da pergunta norteadora;
- 2) estabelecimento dos critérios de inclusão e exclusão;
- 3) busca e seleção na literatura;
- 4) categorização e avaliação dos estudos selecionados;
- 5) interpretação dos resultados; e
- 6) apresentação da síntese do conhecimento.

A definição da pergunta norteadora foi baseada na estratégia PICO:

- P (Paciente): pacientes com lesão motora unilateral;
- I (Intervenção): treinamento do membro saudável (educação cruzada);
- C (Comparação): ausência de intervenção ou tratamento convencional;
- O (Desfecho): plasticidade neural compensatória e recuperação funcional do membro afetado.

A partir dessa estrutura, formulou-se a seguinte pergunta: “Em pacientes com lesão motora unilateral, o treinamento do membro saudável induz plasticidade compensatória no hemisfério lesado, promovendo recuperação funcional do membro afetado?”

A coleta de dados foi realizada por meio de levantamento bibliográfico nas bases de dados SciVerse Scopus (Scopus), National Library of Medicine (PubMed) e Biblioteca Virtual

em Saúde (BVS), no período de 13 de maio a 22 de julho de 2025. Foram empregados os seguintes descritores, de acordo com a terminologia DeCS/MeSH: “*cross-education*”, “*neuroplasticity*”, “*motor recovery*” e “*rehabilitation*”, combinados com os operadores booleanos “AND” e “OR”.

Os critérios de inclusão definidos para a pesquisa foram:

1. Publicações disponíveis nos idiomas inglês ou português.
2. Publicações realizadas entre os anos de 2014 e 2025.
3. Disponibilidade de texto completo gratuito e pesquisas realizadas com seres humanos.
4. Tipos de estudo: experimentais, quase-experimentais, revisões sistemáticas, metanálises e estudos de consenso.

Os critérios de exclusão definidos foram:

1. Artigos duplicados.
2. Estudos que não abordaram diretamente a pergunta de pesquisa.
3. Trabalhos com foco exclusivo em populações menores de 18 anos ou modelos animais.
4. Editoriais, cartas ao editor ou resumos de conferências.

A seleção dos materiais foi realizada de forma independente por dois revisores. A etapa inicial consistiu na leitura dos títulos e resumos de todos os artigos encontrados para aplicar os critérios de inclusão e exclusão. Após essa triagem, procedeu-se à leitura integral dos artigos restantes para verificar a correspondência de seus conteúdos com os objetivos da pesquisa. Em caso de discordância, um terceiro revisor foi consultado para decisão por consenso. Por fim, foram extraídos os dados e informações mais relevantes de cada estudo, que foram interpretados e integrados ao desenvolvimento desta revisão.

Um total de 534 foram identificados e, após a aplicação dos critérios de exclusão predefinidos, 12 estudos (2,25%) foram selecionados para compor esta revisão. Os materiais escolhidos abrangem o período entre 2014 e 2025. A coleta de dados foi realizada em três bases: PubMed, Scopus e BVS, resultando em 462 artigos do PubMed, 63 do Scopus e 9 da BVS.

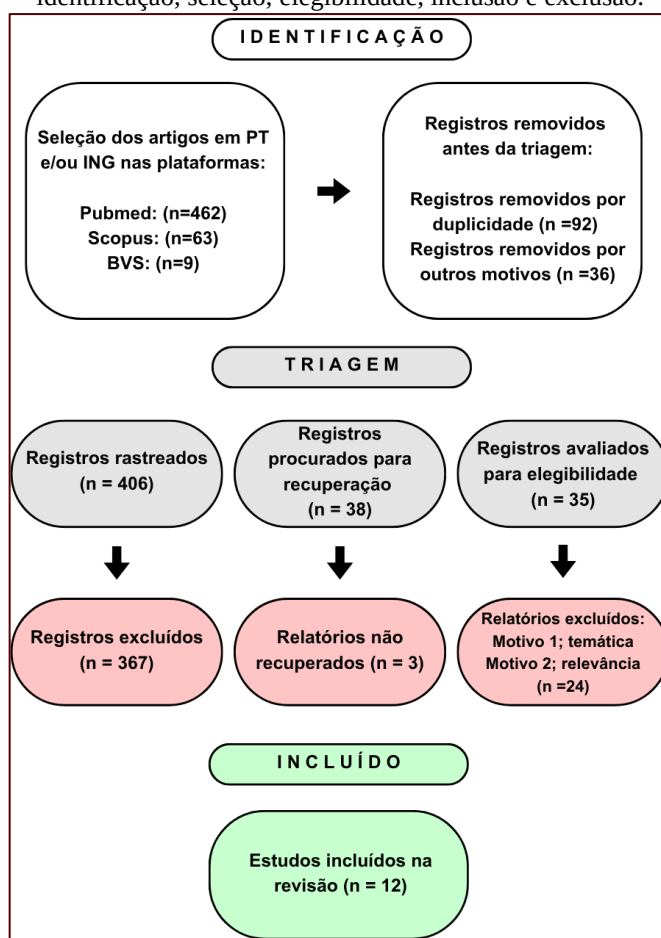
Na fase inicial de triagem, todos os 406 artigos foram avaliados com base no idioma e nos descritores, resultando na exclusão de 368 materiais por critérios como duplicidade, relevância e espécie. A (Figura 1) apresenta um fluxograma detalhando o processo de seleção, incluindo as etapas de inclusão e exclusão dos estudos. Entre os 12 artigos considerados elegíveis para esta revisão integrativa, a distribuição por ano de publicação foi a seguinte:

- 2025: 1 artigo (8,3%);
- 2024: 1 artigo (8,3%);

- 2023: 2 artigos (16,7%);
- 2021: 1 artigo (8,3%);
- 2020: 1 artigo (8,3%);
- 2019: 1 artigo (8,3%);
- 2018: 1 artigo (8,3%);
- 2017: 1 artigo (8,3%);
- 2016: 1 artigo (8,3%);
- 2014: 2 artigos (16,7%).

Essa distribuição reflete uma importante contribuição dos estudos desenvolvidos, consolidando achados valiosos para o campo científico e reforçando sua significância no contexto acadêmico e profissional.

Figura 1 - Fluxograma de seleção de publicações da revisão integrativa segundo critérios de identificação, seleção, elegibilidade, inclusão e exclusão.



Fonte: Autoral (2026).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seleção e análise dos estudos resultaram na inclusão de 12 artigos que atendem à

pergunta de pesquisa desta revisão. O corpus de evidências é diversificado, incluindo revisões integrativas sistemáticas e narrativas, estudos de consenso de especialistas e ensaios experimentais com diferentes delineamentos. Coletivamente, esses trabalhos fornecem uma visão multifacetada do fenômeno da educação cruzada. A (Tabela 1), a seguir, apresenta uma síntese detalhada de cada um dos estudos selecionados, organizados por autor e ano, tipo de estudo, objetivos e resultados, servindo como base para a análise subsequente.

Tabela 1 - Síntese dos artigos selecionados.

Autor e Ano	Tipo de Estudo	Objetivos	Resultados
Lecce <i>et al.</i> (2025)	Estudo Experimental	Quantificar as adaptações de unidades motoras no membro não treinado após 8 semanas de treino unilateral.	O aumento de força no membro não treinado foi mediado por adaptações neurais, incluindo um aumento na taxa de disparo das unidades motoras.
Song <i>et al.</i> (2024)	Revisão de Escopo	Realizar uma revisão de escopo para mapear as evidências sobre a transferência de resistência muscular.	Concluiu que a literatura atual não possui evidências suficientes para afirmar ou negar a existência da educação cruzada de resistência.
Capozio <i>et al.</i> (2023)	Estudo Experimental	Medir os efeitos de uma única sessão de treino unilateral na força, habilidade e excitabilidade dos circuitos corticais e espinhais contralaterais.	Ganhos de força e habilidade no membro não treinado foram observados após uma sessão, com aumento da excitabilidade corticoespinhal.
Van der Groen <i>et al.</i> (2023)	Estudo Experimental (Crossover)	Comparar as respostas corticoespinhais e intracorticais agudas (via EMT) após uma sessão de contrações excêntricas vs. concêntricas.	Foram identificadas respostas neurofisiológicas distintas entre os tipos de contração nos dois hemisférios.
Bouguetoch <i>et al.</i> (2021)	Estudo Experimental	Comparar os efeitos de educação cruzada do treinamento com imagética motora (IM) vs. estimulação elétrica neuromuscular (EENM) de baixa intensidade.	O treinamento com IM induziu ganhos de força e aumento do comando supraespinhal (onda V) no membro contralateral não treinado. O treinamento com EENM de baixa intensidade não produziu efeito de educação cruzada.
Manca <i>et al.</i> (2020)	Estudo de Consenso (Delphi)	Utilizar o método Delphi para estabelecer um consenso de especialistas sobre terminologia, mecanismos e protocolos de treino.	Obteve consenso sobre o termo "educação cruzada", o papel do iM1, e a eficácia de treinos de alta intensidade e ilusão de espelho.
Colomer-Poveda <i>et al.</i> (2019)	Revisão Sistemática	Analisar sistematicamente o efeito de variáveis do treino	Concluiu que o treino unilateral modula o iM1, mas a heterogeneidade

		unilateral na excitabilidade do córtex motor ipsilateral (iM1).	dos protocolos gera resultados inconsistentes na literatura.
Green & Gabriel (2018)	Estudo Experimental	Investigar a transferência de força e habilidade nos membros superiores e inferiores após treino unilateral	Ocorreu transferência de força e habilidade para o membro contralateral tanto no treino de braço quanto no de perna.
Hendy & Lamon (2017))	Revisão Narrativa	Realizar uma revisão abrangente dos mecanismos neurais ("cérebro") e periféricos ("além") da educação cruzada.	Descreveu os mecanismos em múltiplos níveis, incluindo adaptações corticais (iM1), espinhais e potenciais alterações moleculares no músculo.
Beyer <i>et al.</i> (2016))	Estudo Experimental	Avaliar os efeitos do treino unilateral de curto prazo na força, hipertrofia, ativação muscular e hormônios.	Aumentou a força no membro treinado e não treinado; a hipertrofia ocorreu apenas no membro treinado; não houve alteração na ativação muscular (isométrica) ou na resposta hormonal.
Farthing & Zehr (2014)	Revisão Integrativa	Apresentar um modelo conceitual para a aplicação clínica da educação cruzada em condições de assimetria funcional.	Propôs a "Hipótese da Restauração da Simetria", defendendo o uso do treino unilateral para reabilitar membros imobilizados ou paréticos.
Lepley & Palmieri-Smith (2014)	Estudo Experimental	Avaliar os efeitos de um programa de treino excêntrico unilateral na força e ativação do quadríceps contralateral.	O treino excêntrico aumentou a força excêntrica no membro não treinado e demonstrou uma tendência de aumento na ativação neural (via CAR).

Fonte: Autoral (2025).

A análise dos artigos selecionados confirma de forma consistente que o treinamento de força unilateral induz ganhos de força significativos no membro contralateral não treinado, um efeito generalizável para membros superiores e inferiores (Beyer *et al.*, 2016; Green & Gabriel, 2018). A base deste fenômeno é predominantemente neural, conforme evidenciado pela ausência de hipertrofia ou alterações hormonais sistêmicas no membro não treinado que pudessem justificar o aumento da força (Beyer *et al.*, 2016; Hendy & Lamon, 2017).

A cascata de eventos neuroplásticos origina-se em nível supraespinhal, com o córtex motor ipsilateral (iM1) sendo o principal local de adaptação, onde se observa um aumento da excitabilidade e uma modulação dos circuitos inibitórios (Colomer-Poveda *et al.*, 2019). Essas alterações corticais são notavelmente rápidas, podendo ser detectadas já após uma única sessão

de treinamento (Capozio *et al.*, 2023), e apresentam padrões complexos que variam de acordo com o tipo de contração muscular empregada (Van Der Groen *et al.*, 2023). Subsequentemente, as modificações no comando central são traduzidas em uma maior eficiência neuromuscular na periferia, onde o ganho de força contralateral é mediado por adaptações funcionais nas unidades motoras, como um aumento na sua taxa de disparo (Lecce *et al.*, 2025).

Explorando modalidades alternativas que reforçam o paradigma neural, formas parciais de ativação do sistema neuromuscular podem induzir a educação cruzada. Notavelmente, foi descoberto que o treinamento baseado em imagética motora (IM), um processo puramente mental sem contração muscular real, foi capaz de gerar ganhos de força significativos no membro contralateral. Esse efeito foi acompanhado por um aumento no comando supraespinhal (medido pela onda V) em ambos os membros. Em contraste, o treinamento com estimulação elétrica neuromuscular (EENM) de baixa intensidade, que gera contração muscular sem um comando voluntário, não produziu o efeito de educação cruzada. Essa divergência de resultados sugere que a ativação volitiva do córtex motor pode ser um componente crucial para desencadear as adaptações neurais contralaterais (Bouguetoch *et al.*, 2021).

Para a prática clínica, a eficácia da intervenção pode ser otimizada por meio de parâmetros específicos, com destaque para o uso de contrações excêntricas (Lepley & Palmieri-Smith, 2014) e protocolos de alta intensidade, conforme estabelecido por consenso de especialistas (Manca *et al.*, 2020). Esses achados sustentam a aplicação da educação cruzada como uma ferramenta para restaurar a simetria funcional em pacientes com déficits unilaterais (Farthing & Zehr, 2014). Contudo, o fenômeno demonstra alta especificidade, pois a literatura atual ainda é insuficiente para confirmar uma transferência similar para a valência de resistência muscular (Song *et al.*, 2024).

Os resultados convergem para a tese de que o treinamento unilateral pode induzir melhorias de força e habilidade no membro contralateral não treinado, oferecendo um caminho promissor para a reabilitação (Manca *et al.*, 2020). Desta forma, este desenvolvimento tem como objetivo aprofundar a interpretação desses achados, dissecando a cascata de eventos neuroplásticos desde o córtex até a unidade motora, avaliando a tradução desse conhecimento para a prática clínica e delineando as fronteiras do conhecimento atual e as direções para pesquisas futuras.

O PARADIGMA NEURAL DA EDUCAÇÃO CRUZADA: UMA ANÁLISE CRÍTICA DAS EVIDÊNCIAS

Uma interpretação central que emerge desta revisão é a natureza predominantemente

neural da educação cruzada. A ausência de hipertrofia ou de alterações endócrinas sistêmicas no lado não treinado, como demonstrado por Beyer *et al.* (2016), é um achado fundamental que descarta mecanismos periféricos como os principais responsáveis pelos ganhos de força contralaterais. Esta observação serve como um ponto de partida crucial, pois direciona o foco investigativo para as adaptações no sistema nervoso e estabelece a educação cruzada como um modelo de estudo da neuroplasticidade motora. A generalidade do fenômeno, ocorrendo de forma similar nos membros superiores e inferiores, como verificado por Green & Gabriel (2018), sugere um mecanismo de controle central robusto, organizado em nível suprassegmentar e não dependente de circuitos locais específicos de um membro. Isso reforça a ideia de que o treinamento unilateral não exercita apenas os músculos de um lado do corpo, mas induz adaptações plásticas em redes neurais que possuem um controle inerentemente bilateral sobre o movimento. Uma ilustração ainda mais contundente desse paradigma vem do estudo de Bouguetoch *et al.* (2021), que demonstrou que a imagética motora (IM), um treinamento mental sem qualquer contração muscular, foi suficiente para induzir ganhos de força no membro contralateral. Em contrapartida, a estimulação elétrica neuromuscular (EENM) de baixa intensidade, que ativa o músculo sem o envolvimento do comando cortical voluntário, não gerou o mesmo efeito. Essa dicotomia reforça de maneira decisiva que a origem do fenômeno é central e parece depender da ativação volitiva das áreas motoras corticais.

O córtex motor ipsilateral (iM1) ao membro treinado é consistentemente apontado como o epicentro dessa neuroplasticidade, conforme consolidado por revisões (Hendy & Lamon, 2017; Colomer-Poveda *et al.*, 2019) e estudos de consenso (Manca *et al.*, 2020). É neste hemisfério, que controla o membro "em repouso", que ocorrem as mudanças mais significativas, como o aumento da excitabilidade corticoespinhal e a redução da inibição intracortical. Essa modulação cria um estado de maior "prontidão" neural, facilitando a geração de comandos motores para o membro não treinado quando ele eventualmente for ativado. Contudo, aprofundar-se nos detalhes revela uma complexidade notável. A revisão sistemática de Colomer-Poveda *et al.* (2019) destaca uma inconsistência nos achados de EMT, indicando que a resposta cortical é um processo dinâmico, sensível aos parâmetros do treinamento (intensidade, volume, tipo de contração). Essa complexidade é ilustrada por estudos como o de Van der Groen *et al.* (2023), que, ao comparar os efeitos agudos de contrações excêntricas e concêntricas, encontrou padrões distintos de ativação e inibição cortical, sem, contudo, elucidar completamente a superioridade a longo prazo do treino excêntrico.

Essa dificuldade em capturar as mudanças é visível também na discrepância entre estudos de ativação: enquanto Lepley & Palmieri-Smith (2014) encontraram uma tendência de

aumento na ativação neural (via CAR), outros estudos não encontraram alterações significativas (via EMG isométrico) (Beyer *et al.*, 2016). Isso não necessariamente invalida os achados, mas aponta que as adaptações neurais podem ser específicas à tarefa e sua mensuração, um desafio metodológico persistente.

A CASCATA DA NEUROPLASTICIDADE: DO CÓRTEX À UNIDADE MOTORA

A cascata de eventos neuroplásticos parece ser iniciada de forma extremamente rápida. O estudo de Capozio *et al.* (2023) é fundamental ao demonstrar que alterações na excitabilidade cortical e espinhal, acompanhadas por ganhos de força e habilidade, podem ser detectadas após uma única sessão de treinamento. Isso sugere que o sistema nervoso começa a se adaptar quase que imediatamente ao novo estímulo motor, estabelecendo as bases para as mudanças mais duradouras que ocorrem com o treinamento crônico.

É neste ponto que os achados sobre as unidades motoras se tornam cruciais para conectar as adaptações centrais com a performance periférica. O trabalho de Lecce *et al.* (2025) oferece o elo que conecta as adaptações corticais com a expressão funcional da força.

Ao demonstrar que os motoneurônios do membro não treinado passam a disparar de forma mais eficiente (aumento da taxa de disparo), este estudo elucidou o passo final da cascata neuroplástica. O aumento da excitabilidade no iM1, discutido nos outros estudos, cria um comando motor mais robusto ou de mais fácil acesso. Essa perspectiva é reforçada pelo treinamento com imagética motora que resultou em um aumento da onda V (indicativo de maior comando supraespinhal) não apenas no lado treinado, mas também no lado contralateral, correlacionando-se com o ganho de força (Bouguetoch *et al.*, 2021). Esse comando descendente, por sua vez, age sobre um *pool* de motoneurônios espinhais que, devido a adaptações plásticas na medula, se tornaram mais excitáveis ou mais eficientes em traduzir o sinal sináptico em potenciais de ação. O resultado é uma contração muscular mais forte, não por mudanças no músculo em si, mas por uma otimização completa da via neural, do cérebro à fibra muscular.

TRADUÇÃO PARA A PRÁTICA CLÍNICA: OTIMIZANDO A REABILITAÇÃO

A força desta revisão reside na sua capacidade de traduzir esses mecanismos complexos em implicações práticas. A aplicação mais evidente e de alto impacto é na reabilitação ortopédica, onde o treinamento do membro saudável pode efetivamente mitigar a atrofia e a perda de força em um membro imobilizado (Farthing & Zehr, 2014). Para um paciente com uma fratura de punho, por exemplo, treinar o lado não lesionado não é mais uma medida passiva,

mas uma intervenção ativa que prepara o sistema nervoso para uma recuperação mais rápida. Nesse cenário, a imagética motora surge como uma ferramenta clínica viável, permitindo ao paciente "treinar" o córtex motor e induzir efeitos contralaterais mesmo na ausência de qualquer movimento físico (Bouguetoch *et al.*, 2021).

No campo da neuroreabilitação, a "Hipótese da Restauração da Simetria" (Farthing & Zehr, 2014) fornece um racional clínico poderoso. Em casos como o AVC, onde o hemisfério lesionado tem sua capacidade de gerar comandos motores comprometida, a educação cruzada funciona como uma "ponte" inter-hemisférica. O treinamento do membro menos afetado pode não apenas fortalecer o lado parético, mas também "despertar" ou modular o hemisfério danificado, preparando-o para responder melhor a terapias diretas futuras.

Para os clínicos, os resultados consolidados oferecem diretrizes para a prescrição. O consenso de especialistas e os achados experimentais apontam que protocolos envolvendo contrações excêntricas (Lepley & Palmieri-Smith, 2014), de alta intensidade, por um período de 4 a 6 semanas, são os mais promissores para maximizar os resultados (Manca *et al.*, 2020). Além disso, o princípio da especificidade (Beyer *et al.*, 2016) é crucial: o ganho será maior nos movimentos que mimetizam o treino, uma informação vital ao se planejar a recuperação de uma função específica.

LIMITES DO CONHECIMENTO E FRONTEIRAS DA PESQUISA

Esta análise também demarca claramente as fronteiras do nosso conhecimento atual. A especificidade do fenômeno é uma limitação importante; enquanto a transferência de força está bem estabelecida, a educação cruzada da *resistência muscular* permanece um campo aberto e sem evidências conclusivas (Song *et al.*, 2024). Isso sugere que as adaptações neurais induzidas pelo treinamento de força podem ser distintas daquelas necessárias para a resistência à fadiga.

Outras questões permanecem sem resposta definitiva, como a existência de uma direção preferencial de transferência (dominante para não-dominante ou vice-versa), sobre a qual não há consenso. A já mencionada variabilidade metodológica nos estudos de neurofisiologia representa um grande desafio para a realização de metanálises e a criação de protocolos padronizados (Colomer-Poveda *et al.*, 2019). Adicionalmente, os resultados contrastantes de Bouguetoch *et al.* (2021) entre imagética motora e EENM de baixa intensidade abrem novas fronteiras: a intenção voluntária é um pré-requisito para a educação cruzada? Existe um limiar de intensidade ou um padrão de estimulação específico para que a EENM se torne eficaz em gerar transferência contralateral?

Além das lacunas existentes na literatura, é imperativo reconhecer as limitações

metodológicas desta própria revisão integrativa. A busca foi restrita aos idiomas inglês e português e delimitada a três bases de dados (PubMed, Scopus e BVS), o que pode ter gerado um viés de idioma e omitido estudos relevantes indexados em outros repositórios. A marcante heterogeneidade dos desenhos de pesquisa incluídos, abrangendo desde ensaios experimentais com amostras e parâmetros distintos até estudos de consenso e revisões, associada ao número restrito de estudos finais (n=12), impossibilitou a realização de uma síntese quantitativa ou metanálise, limitando os achados a uma abordagem puramente descritiva e qualitativa.

Diante disso, as direções para pesquisas futuras são claras. Sendo necessários ensaios clínicos randomizados que comparem diretamente diferentes modalidades de treinamento, incluindo intervenções convencionais, imagética motora e diferentes parâmetros de EENM, utilizando desfechos neurofisiológicos e funcionais padronizados. E em seguida, estudos longitudinais que combinam múltiplas técnicas de análise (ex: fMRI, TMS e eletromiografia de alta densidade) podem fornecer uma visão sem precedentes da cronologia das adaptações, desde os efeitos agudos (Capozio *et al.*, 2023) até as mudanças crônicas nas unidades motoras (Lecce *et al.*, 2025). Finalmente, a eficácia da educação cruzada precisa ser testada em uma gama mais ampla de populações neurológicas para validar e expandir a aplicação da "Hipótese da Restauração da Simetria".

CONCLUSÕES

A educação cruzada apresenta um potencial significativo para aprimorar a reabilitação de pacientes com lesões motoras unilaterais. A estratégia demonstra benefícios importantes, que abrangem não apenas o ganho de força e a atenuação da atrofia muscular no membro afetado, mas também a melhora da habilidade motora e a modulação da atividade em ambos os hemisférios cerebrais. Essa abordagem inovadora tem o potencial de possibilitar a intervenção precoce mesmo durante a imobilização, ampliar a acessibilidade ao tratamento e contribuir significativamente para uma recuperação funcional mais rápida e completa, melhorando a qualidade de vida dos pacientes. Além disso, os resultados desta pesquisa indicam a possibilidade de desenvolvimento de protocolos de reabilitação mais específicos e eficazes, que possam complementar as terapias tradicionais, especialmente nas fases iniciais da recuperação. Isso proporciona um cuidado mais integrado e personalizado, adaptado às necessidades individuais e às limitações de cada paciente, fortalecendo o papel das intervenções baseadas em neuroplasticidade como aliadas essenciais no processo de reabilitação. Portanto, é fundamental que mais estudos sejam realizados, especialmente ensaios clínicos randomizados com metodologias robustas. Esses estudos devem explorar de forma aprofundada o papel da

educação cruzada no arsenal terapêutico da fisioterapia, garantindo o avanço e a consolidação de abordagens mais eficazes para o tratamento de lesões unilaterais.

REFERÊNCIAS

BEYER, K. S. et al. Short-Term Unilateral Resistance Training Results in Cross Education of Strength Without Changes in Muscle Size, Activation, or Endocrine Response. **Journal of Strength and Conditioning Research**, v. 30, n. 5, p. 1213–1223, maio 2016.

BOUGUETOCH, A.; MARTIN, A.; GROSPRÊTRE, S. Does partial activation of the neuromuscular system induce cross-education training effect? Case of a pilot study on motor imagery and neuromuscular electrical stimulation. **European Journal of Applied Physiology**, v. 121, n. 8, p. 2337–2348, 17 maio 2021.

CAPOZIO, A.; CHAKRABARTY, S.; ASTILL, S. Acute Effects of Strength and Skill Training on the Cortical and Spinal Circuits of Contralateral Limb. **Journal of Motor Behavior**, p. 1–13, 3 out. 2023.

COLOMER-POVEDA, D. et al. Effects of acute and chronic unilateral resistance training variables on ipsilateral motor cortical excitability and cross-education: A systematic review. **Physical Therapy in Sport**, v. 40, p. 143–152, nov. 2019.

ENOKA, R. M.; FARINA, D. Force Steadiness: from Motor Units to Voluntary Actions. **Physiology**, v. 36, n. 2, p. 114–130, 1 mar. 2021.

FARTHING, J. P.; ZEHR, E. P. Restoring Symmetry. **Exercise and Sport Sciences Reviews**, v. 42, n. 2, p. 70–75, abr. 2014.

FIMLAND, M. S. et al. Neural adaptations underlying cross-education after unilateral strength training. **European Journal of Applied Physiology**, v. 107, n. 6, p. 723–730, 16 set. 2009.

FOLLAND, J. P.; WILLIAMS, A. G. The Adaptations to Strength Training. **Sports Medicine**, v. 37, n. 2, p. 145–168, 2007.

GREEN, L. A.; GABRIEL, D. A. The cross education of strength and skill following unilateral strength training in the upper and lower limbs. **Journal of Neurophysiology**, v. 120, n. 2, p. 468–479, 1 ago. 2018.

HENDY, A. M.; LAMON, S. The Cross-Education Phenomenon: Brain and Beyond. **Frontiers in Physiology**, v. 8, 10 maio 2017.

LECCE, E. et al. Cross-education: motor unit adaptations mediate the strength increase in non-trained muscles following 8 weeks of unilateral resistance training. **Frontiers in Physiology**, v. 15, 7 jan. 2025.

LEPLEY, L. K.; PALMIERI-SMITH, R. M. Cross-Education Strength and Activation After Eccentric Exercise. **Journal of Athletic Training**, v. 49, n. 5, p. 582–589, 2014.

MANCA, A. et al. Contralateral Effects of Unilateral Strength and Skill Training: Modified Delphi Consensus to Establish Key Aspects of Cross-Education. **Sports Medicine**, 11 nov. 2020.

SONG, J. S. et al. Cross-Education of Muscular Endurance: A Scoping Review. **Sports Medicine**, v. 54, n. 7, p. 1771–1783, 17 maio 2024.

VAN DER GROEN, O. et al. Corticospinal and intracortical responses from both motor cortices following unilateral concentric versus eccentric contractions. **European Journal of Neuroscience**, v. 57, n. 4, p. 619–632, 17 jan. 2023.

Submetido em: 18/06/2026

Aceito em: 31/07/2026

Publicado em: 31/08/2026

Avaliado pelo sistema *double blind review*