



Perspectiva das neurociências para otimizar a aprendizagem e o método de aprendizagem Feynman

Neuroscience insights to enhance learning and the Feynman learning method

 Felipe Viegas Rodrigues

Doutor em Ciências

Universidade do Oeste Paulista – Unoeste

Presidente Prudente, São Paulo – Brasil

rodrigues.fv@gmail.com

Resumo: As metodologias ativas são um recurso didático excelente ao estudante. No entanto, técnicas de estudo eficazes fora de sala de aula continuam pouco utilizadas. O objetivo do presente trabalho é fazer um ensaio teórico, por meio do pensamento dedutivo, que traz a perspectiva das neurociências cognitivas para otimizar a autoaprendizagem dos estudantes. Um dado fundamental é que as memórias naturalmente tendem ao esquecimento, exceto quando há repetição explícita no contato com a informação e atenção exclusiva ao material de estudo. Além disso, estratégias efetivas de estudo devem engajar as funções executivas para promover manipulação ativa e a associação de informações. Por fim, a aprendizagem por meio do ensino é uma estratégia com potencial para mobilizar todos esses recursos. Em especial, o método de aprendizagem Feynman é uma estratégia robusta e apoiada em extenso processo reflexivo da informação, que deve ser sistematicamente testada por pesquisas futuras.

Palavras-chave: autoaprendizagem como assunto; guia de estudo; memória; função executiva.

Abstract: Active learning methodologies are an excellent educational resource for students. However, effective study techniques outside the classroom are still underutilized. The aim of this study is to carry out a theoretical essay, by means of deductive thinking, that brings the perspective of cognitive neuroscience to optimize self-directed learning of students. One crucial finding is that memories naturally tend to fade unless there is explicit repetition in contact with the information and exclusive attention to the subject matter. In addition, effective study strategies should engage executive functions to promote active manipulation and association of information. Lastly, learning by teaching is a strategy with the potential to mobilize all these resources. Particularly, the Feynman learning method is a robust strategy supported by an extensive reflective process of information, that should be systematically tested in future work.

Keywords: self-directed learning as topic; study guide; memory; executive function.

Cite como

(ABNT NBR 6023:2018)

RODRIGUES, Felipe Viegas. Perspectiva das neurociências para otimizar a aprendizagem e o método de aprendizagem Feynman. *Dialogia*, São Paulo, n. 46, p. 1-16, e25442, set./dez. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.5585/46.2023.25442>

American Psychological Association (APA)

Rodrigues, F. V. (2023, set./dez.). Perspectiva das neurociências para otimizar a aprendizagem e o método de aprendizagem Feynman. *Dialogia*, São Paulo, n. 46, p. 1-16, e25442. <https://doi.org/10.5585/46.2023.25442>

1 Introdução

A educação é uma prática social que pode ser definida como a forma pela qual a cultura é perpetuada e desenvolvida, o que engloba tanto a educação informal como a educação formal (Ranney; Shimoda, 1999). Para Ansari e Coch (2006), a educação é parte das ciências cognitivas, por estudar processos básicos de aprendizagem, isto é, de aquisição e retenção de informações. Parece inegável que o educar existe desde que o primeiro conhecimento foi transmitido entre dois seres sencientes. Nesse sentido, Richerson e Boyd (2005) argumentam que a cultura é um produto em evolução de cérebros humanos, ao mesmo tempo que os cérebros são moldados pelo processo evolutivo para aprender e gerenciar cultura ou simplesmente educar.

Por outro lado, existem evidências claras de cultura até mesmo em baleias e golfinhos (Whitehead, 2009) e é importante compreender que o encéfalo humano não é especial. A proporção entre o tamanho do córtex cerebral e a massa total do nosso encéfalo tem números pouco superiores a outras espécies primatas e não-primatas (Herculano-Houzel, 2012), entretanto as diferenças entre os cérebros não precisam ser apenas macroscópicas. Elston (2007) argumenta que a diferença na complexidade de cultura e competência cognitiva dos humanos poderia estar na topologia da rede neural, isto é, em sua microestrutura, algo que passou a ser avaliado somente no século XXI com o início do mapeamento de redes cerebrais (Basset; Sporns, 2017) e o estudo das redes neurais em grande escala (Bressler; Menon, 2010, Menon, 2023). Dessa forma, devemos considerar apenas a educação formal como uma atividade exclusivamente humana.

A educação formal envolve diferentes saberes. Segundo Carter e Kotzee (2015) há três conceitos epistêmicos em educação, relacionáveis entre si: *aprender* - o movimento de um estado de menos conhecimento a outro de mais conhecimento; *ensinar* - a ação sobre outro sujeito que produz aprendizado, e, por fim, *educar* - relacionado ao processo de ensinar e produzir aprendizado. O processo de aprender, i.e., a aprendizagem, engloba diferentes formas de adquirir conhecimento. Uma definição interessante de aprendizagem é a capacidade de modificar o comportamento com base em experiências anteriores (Reisberg, 1999, Shettleworth, 2010). Mais importante, o aprender não deriva somente do ensinar ou do educar, mas também do *estudar* - um movimento pessoal que leva ao processo de aprendizagem. Esse conceito não é enfatizado por Carter e Kotzee (2015), apesar dos autores mencionarem que a aprendizagem também acontece independentemente. Assim, incluir o estudar como um episteme é enfatizar o papel ativo do estudante na aprendizagem. Dessa maneira, não se trata de um papel ativo em sala de aula apenas, como as metodologias ativas já propõem (Freeman *et al.*, 2014, Mota; Rosa, 2018), mas o estudar individual, sem distrações e que melhora a qualidade no contato com a informação a ser aprendida.

É importante destacar que diversas técnicas de estudo fora de sala de aula já foram sistematicamente avaliadas. Dunlosky *et al.* (2013) fizeram uma extensa revisão sobre dez técnicas comuns de aprendizagem fora da sala de aula utilizadas por estudantes, escolhidas pelo seu uso e adoção fáceis. Por conseguinte, os autores avaliaram se os benefícios de cada estratégia poderiam ser generalizados em quatro categorias de variáveis: condições de aprendizagem, características dos estudantes, materiais utilizados e o critério da tarefa a ser executada. Para cada categoria, cada uma das dez técnicas foi classificada como negativa, insuficiente, qualificada (quando apresentaram resultados positivos, mas também inconclusivos) ou positiva para aprendizagem, o que resultou numa avaliação geral de eficácia (baixa, moderada ou alta).

Em face disso, suas descobertas apontam que as estratégias de estudo amplamente utilizadas, como grifar textos, usar palavras-chave ou imagens mentais, a releitura e até mesmo o ato de fazer resumos, apresentam baixa eficácia. Outras estratégias como a interrogação elaborativa, a autoexplicação e a prática intercalada mostraram uma eficácia moderada. Assim sendo, as únicas estratégias com alta eficácia são a prática distribuída, promovida ao estudar continuamente, e os testes práticos, que são a resolução de exercícios uma vez que o conhecimento consolidado das neurociências do início do século XXI se mostra valioso para explicar esses resultados, especialmente por meio das descobertas relacionadas aos mecanismos de atenção, memória e emoção. Dessa forma, o presente ensaio teórico utiliza o pensamento dedutivo e o referencial das neurociências cognitivas com o objetivo de consolidar contribuições para a autoaprendizagem. Em especial, os mecanismos neurais necessários para a consolidação efetiva de informações.

2 Contribuições das neurociências

Nas neurociências, muitos autores utilizam os termos memória e aprendizagem como sinônimos (Scoville; Milner, 1957, Corkin, 2002; Shettleworth, 2010, Rasch; Born, 2013; Squire *et al.*, 2015), dado que as investigações sobre as mudanças cerebrais relacionadas à aprendizagem têm sido classificadas como estudos de memória. Nesse contexto, as inferências que serão feitas sobre os mecanismos neurais necessários à aprendizagem, terão como base muito dos estudos que investigam a memória. Isso posto, aprender depende de um conjunto de processos distintos que compõem a memória e que incluem a codificação ou aquisição, a consolidação e a evocação de informações (Rasch; Born, 2013). É importante destacar que toda e qualquer interação com o ambiente promove alterações do funcionamento das redes neurais que podem ser consideradas traços de memória. Rasch e Born (2013) destacam que os traços de memória não são consolidados num único momento, mas dependem de reativações e processos de reconsolidação para se

manterem em longo prazo. Nesse sentido, a atenção pode ter influência determinante para a consolidação da informação.

Primordialmente, a atenção engloba um conjunto de processos que inclui o alerta, a orientação ao espaço e o controle executivo (Fan *et al.*, 2009), que é parte das funções executivas do córtex pré-frontal (Fuster, 2017). Além disso, a orientação pode ser mobilizada voluntariamente, por meio de processos de cima para baixo (*top-down*), ou automaticamente, também conhecida como atenção de baixo para cima (*bottom-up*) (Corbetta; Patel; Shulman, 2008). Embora o estado de alerta possa ser modulado por aspectos da motivação, evidências empíricas mostram que os processos *top-down* resultam em uma codificação mais robusta da memória de longo prazo (Sasin; Fougne, 2021). Por outro lado, o controle executivo envolve uma rede neural em grande escala necessária para lidar com diferentes tipos de informação, além de incluir um sistema de memória de curto prazo (Brosnan; Wiegand, 2017).

Por conseguinte, a memória operacional, amplamente reconhecida como um modelo útil na compreensão da memória de curto prazo, incorpora um sistema de controle atencional essencial para o raciocínio proficiente e o comportamento adaptativo flexível (Baddeley, 2010, Cowan, 2022). Assim, o controle executivo e a memória operacional relacionam-se ao raciocínio lógico (Ferrer; O'hare; Bunge, 2009) e, portanto, são úteis ao próprio processo de reflexão e associação de informações. Adicionalmente, é importante destacar que não existem pessoas verdadeiramente multitarefas (Ophir; Nass; Wagner, 2009). May e Elder (2008) defendem que incentivar a autorregulação de estudantes no que envolve ao uso multitarefa de mídias é necessário para melhorar o desempenho acadêmico, o que inclui fazer outras atividades enquanto se estuda. No geral, a atenção exerce uma influência profunda tanto na retenção transitória de informações na memória de curto prazo quanto nos processos de consolidação duradoura envolvidos na formação da memória de longo prazo.

Além disso, a memória de longo prazo consiste em vários sistemas, e o termo específico utilizado para nomear o que é comumente referido como "memória" é a memória explícita (Squire, 2009). Adicionalmente, formamos memórias implícitas que englobam uma série de processos inconscientes, além das habilidades motoras (Corkin, 2002). Efetivamente, as memórias implícitas só podem ser adquiridas por treino repetitivo, nunca por uma exposição única (Helene; Xavier, 2003). Por outro lado, memórias explícitas podem ser adquiridas após um único contato, mas exibem uma curva de esquecimento bem estabelecida que tem sido estudada há mais de um século (Radvansky *et al.*, 2022). É evidente que a taxa de perda de informações é influenciada pela quantidade de conhecimento adquirido e pela duração do período de retenção, com o sono

desempenhando um papel significativo, especialmente quando há um intervalo entre o estudo e os testes (Rasch; Born, 2013).

Tononi e Cirelli (2003) elaboraram uma hipótese bastante interessante para o papel do sono, chamada de Hipótese da Homeostase Sináptica (HHS), segundo a qual o sono possui um papel ativo de regredir as sinapses entre os neurônios para um estado basal, após transformações associadas aos traços de memória serem adquiridas ao longo do período de vigília. Segundo os autores, é conhecido que a fase vigil está associada a processos de potenciação de longa-duração (LTP) que envolvem facilitações da transmissão sináptica em resposta a estímulos do ambiente, relacionados ou não a paradigmas de aprendizagem. Além disso, existe relação bem estabelecida entre o ciclo sono-vigília e o padrão de atividade eletrofisiológico, com a atividade cortical de ondas lentas aumentando durante o sono em proporção direta ao tempo acordado. Por fim, os autores propõem que a atividade cortical de ondas lentas seria importante para a depressão sináptica (*downscaling*), o que é suportado ao menos por evidência moleculares, de redução da expressão de genes relacionados ao processo de LTP durante o sono de ondas lentas.

Em virtude disso, essas evidências, associadas aos ganhos de desempenho provocados ao dormir, levam Tononi e Cirelli (2003) a argumentar que o papel do sono é regredir sinapses transformadas por processos de LTP para um estado basal, pronto para novas possibilidades de aprendizagem, mas que mantém uma pequena parcela de traços de memória, ou aprendizados. De fato, De Vivo *et al.* (2017) mostraram em camundongos que o período de sono é capaz de provocar uma redução de até 80% em sinapses modificadas durante o período de vigília, em comparação a animais que ficaram acordados espontaneamente ou foram estimulados a atividade durante o período de sono. A demonstração de que a redução sináptica aconteceu somente para os animais que dormiram, sustenta a hipótese de que a atividade de ondas lentas do sono é importante para o *downscaling*. Com base nestas pesquisas, é possível concluir que otimizar o processo de autoaprendizagem depende da exposição repetida ao material almejado por meio da prática distribuída, i.e., estudar em diversos momentos espaçados no tempo, ao longo de dias, para progressivamente consolidar informações durante o sono.

Adicionalmente, é importante destacar que as emoções facilitam o processo de aprendizagem, eventualmente promovendo a consolidação de memórias após uma única exposição, como predito para memórias explícitas. Recentemente Gruber *et al.* (2016) mostraram que eventos recompensadores promovem aumento da atividade do hipocampo após a aquisição da informação, como se o evento pregresso fosse repassado na rede neural. O hipocampo é uma estrutura que está intimamente relacionada à consolidação de memórias de longo prazo explícitas (Rasch; Born, 2013; Squire *et al.*, 2015; Radvansky *et al.*, 2022), o que sugere que a presença de um

evento emocionalmente relevante é capaz de promover a repetição necessária à consolidação de memórias. Dessa forma, é possível concluir que todas as formas de memória de longo prazo dependem de processos de repetição, sejam memória implícitas, memórias explícitas não associadas a emoções ou memórias explícitas associadas a emoções. A diferença é que nos eventos associados a emoções, o processo de repetição será automático e acontecerá por estimulação límbica, sem controle consciente do indivíduo. Estímulos emocionais são avaliados automaticamente e as emoções ocorrem de forma não solicitada (Ekman; Cordaro, 2011) e, portanto, não podem ser voluntariamente solicitadas para aprendizagem.

Por fim, é importante destacar que o fluxo de informações pelos circuitos corticais é organizado de regiões sensoperceptuais em direção às regiões pré-frontais, que processam as funções executivas. Essas incluem o planejamento e a tomada de decisão com relação às informações em curso. No conjunto, esta sequência de eventos é chamada ciclo percepção-ação (CPA) (Fuster, 2017). Por essa razão, um dos componentes centrais das funções executivas é a memória operacional, a qual Fuster (2022) defende ser a ativação temporária de memória para sistemas perceptuais, executivos ou de recompensa no cumprimento de um objetivo. Para ele, portanto, a ativação de recursos pré-frontais está associada com a consciência do presente momento e a organização temporal do comportamento, o que também é defendido por outros autores (Hesslow, 2002; Kolb, 2007; Boly *et al.*, 2011), e essa dinâmica do CPA é dependente da saliência emocional do estímulo (Gruber *et al.*, 2016; Fuster, 2017). Adicionalmente, a manipulação mental ativa de informações em circuitos executivos é útil para a associação de informações presentes com informações prévias, já consolidadas, com base no próprio conceito de memória operacional, fortalecendo traços de memória. Baddeley (2010) inclusive destaca que o grau de aprendizagem é influenciado pela natureza do processamento da informação. Segundo o autor, é conhecido desde a década de 70 que o nível de aprendizagem de palavras é aumentado se o processo de aquisição estiver focado no seu significado, mas não apenas na sua aparência perceptual ou seu fonema. Finalmente, a necessidade de exposição repetida ao material de estudo também fortalece traços de memória e reduz o esquecimento naturalmente associado com o processo de consolidação de informações (Radvansky *et al.*, 2022).

Em conjunto, estes achados das neurociências têm implicações diretas para a eficiência das técnicas de estudo avaliadas por Dunlosky *et al.* (2013). É importante destacar que estratégias como grifar textos, a utilização de palavras-chave ou de imagens mentais ou a mera releitura, apresentam eficácia limitada porque sobrecarregam os sistemas de atenção e memória, ou resultam em um envolvimento fragmentado com as informações. Por outro lado, fazer resumos é uma habilidade que se baseia na memória implícita, a qual depende de treinamento repetitivo para ser eficiente.

Talvez por isso sejam utilizadas por menos de 50% dos estudantes (Blasiman *et al.*, 2017). Verifica-se que as técnicas de eficiência moderada recrutam mais recursos pré-frontais, ao exigir associação de conceitos adquiridos, seja diretamente nos métodos de interrogação elaborativa e autoexplicação, ou indiretamente na prática intercalada. Em seguida, o esforço cognitivo desencadeia um engajamento atencional voluntário e a ativação recorrente de traços de memória recém-formados. É interessante notar, no entanto, que existem evidências de que a prática intercalada é mais eficaz quando combinada com a prática distribuída (Foster *et al.*, 2019). Ademais, engajar-se em exercícios e adotar a prática distribuída provoca o acesso constante a novas informações, associado a um processo de reflexão e integração do conteúdo. Dessa forma, cada sessão de estudos deve promover o acesso a conhecimentos prévios e a reconsolidação de traços de memória já existentes, além da formação de novos conhecimentos, promovendo assim, um efeito máximo para a aprendizagem.

3 A aprendizagem por meio do ensino

Apesar do excelente trabalho de revisão de Dunlosky *et al.* (2013), contemplar todas as técnicas seria uma tarefa impraticável. Uma estratégia de estudo não considerada é a aprendizagem por meio do ensino (Kersten, 1997), provavelmente porque a sua execução depende da interação com outras pessoas e de boas estratégias de autorregulação, exigindo alguma curva de aprendizagem para uma implementação bem-sucedida. Ainda assim, há relatos de sucesso na literatura com essa estratégia, tanto em contextos práticos (Fraga *et al.*, 2012; Veloso *et al.*, 2019, Sun; Maniatis; Steinert, 2019), quanto teóricos (Hermida *et al.*, 2021, Kobayashi, 2023).

Por exemplo, Veloso *et al.* (2019) avaliaram as competências de ressuscitação cardiopulmonar e suporte básico de vida (SBV) de 92 estudantes de medicina com ou sem a estratégia de aprendizagem por meio do ensino. Para começar, as avaliações teóricas e práticas foram realizadas após cerca de 70 dias do treino inicial em SBV, mas 53 estudantes aplicaram um treinamento em SBV para membros da comunidade no período e 39 estudantes não. Os resultados apontam desenvolvimento cognitivo e de habilidades psicomotoras superior no grupo que utilizou estratégias de aprendizagem por meio do ensino, o que inclusive evidencia a eficácia da estratégia tanto para contextos teóricos, quanto práticos. É importante notar que o treinamento aplicado à comunidade se configura como um novo acesso às informações previamente adquiridas sobre SBV e, invariavelmente, um novo processo de consolidação das informações associadas ao material de estudo, configurando processos de reativação e reconsolidação necessários à formação de traços de memória efetivos (Rasch; Born, 2013).

Uma estratégia baseada na aprendizagem por meio do ensino encontrada na literatura cinzenta, mas ainda não testada em trabalhos adequadamente sistematizados, é a técnica Feynman ou o método de aprendizagem Feynman (MAF) (Wenyan; Tiandong; Sen, 2021; Feng *et al.*, 2022). Inclusive, a técnica é mencionada por algumas universidades, como estratégias de apoio à aprendizagem (Cam, 2020; Woods, 2021).

3.1 O método de aprendizagem Feynman

Richard P. Feynman (1918–1988) foi um matemático prodígio com extensas contribuições à Física, inclusive sendo laureado com o prêmio Nobel em Física de 1965, junto com Sin-Itiro Tomonaga e Julian Schwinger (Nobel Prize Outreach AB, 2023). Dominiczak (2015) relata que um dos grandes legados deixados por Feynman são a série de conferências Feynman, publicadas por Robert B. Leighton e Matthew Sands após dois anos de ensino de graduação no Instituto de Tecnologia da Califórnia (Caltech). Feynman também ensinou no Brasil, nas décadas de 50 e 60, onde foi duramente crítico com os métodos de ensino empregados e a ausência de raciocínio crítico (Moreira, 2018), o que deixa evidente sua preocupação com o processo reflexivo ao aprender sobre qualquer tópico.¹ Mais do que isso, Feynman uma vez mencionou ao discursar sobre o progresso da Ciência: “Tudo é interessante se você olhar com profundidade suficiente. Não há pergunta trivial” (Laurence, 2003).

Apesar da aparente preocupação com a aprendizagem, não há evidência na literatura de que o MAF tenha sido desenvolvido pelo próprio Richard Feynman, o que não invalida sua aplicabilidade. Feng *et al.* (2022) defendem que a experiência do físico no ensino fez com que ele sugerisse que o entendimento profundo dos conceitos pelo professor é um pré-requisito para um ensino efetivo. Dessa forma, o conjunto de ideias de Feynman sobre ensino e aprendizagem teria sido sintetizado no MAF por outros pesquisadores. Em essência, o MAF envolve quatro passos consecutivos (Wenyan; Tiandong; Sen, 2021; Feng *et al.*, 2022):

1. *Determinar os objetivos de aprendizagem e adquirir conhecimento* – nessa etapa, o assunto a ser aprendido deve ser delimitado e os conceitos envolvidos com o assunto estudados. Pode ser um conceito único, um princípio, uma teoria ou um método operacional, mas o objetivo de aprendizagem precisa ser específico e estar bem delimitado. Todos os conceitos envolvidos devem ser esclarecidos e o assunto e seus subtópicos organizados, se necessário.

2. *Transmitir o conhecimento em linguagem simples* – uma vez que o assunto tenha sido aprendido, o estudante deveria ser capaz de expressar seu aprendizado em linguagem simples e concisa. Na

¹ Moreira (2018) também destaca que o ensino de física sofreu avanços após esse período, minimizando deficiências.

ausência de conhecimento aprofundado dos conceitos, tal síntese não será possível, uma vez que o ensinar em linguagem simples envolve reorganização mental dos conceitos aprendidos.

3. *Identificar lacunas de aprendizado* – se o processo de ensinar não for compreendido por outros ou os conceitos a serem transmitidos não puderem ser facilmente articulados, será necessário retomar os estudos e reaprender os pontos críticos. Esse processo é semelhante ao primeiro, mas com um direcionamento específico em relação aos conceitos necessários, portanto mais eficiente. É importante notar que a terceira etapa pode exigir vários retornos ao início do processo (etapa 1), provocando a repetição do processo de aprendizagem e o novo domínio do assunto inicialmente delimitado.

4. *Expansão prática e simplificação adicional* – após todas as lacunas de aprendizagem terem sido solucionadas, novas tentativas de explicar os conceitos, para outras pessoas, devem permitir não só consolidação da aprendizagem conquistada, mas também capacidade de simplificação adicional dos conceitos aprendidos. Nesta etapa, o uso de exemplos e analogias também podem auxiliar o processo de integração do novo conhecimento com conceitos prévios.

3.2 MAF e as neurociências

A descrição destas etapas deixa claro que o MAF não é um método rápido e exige tanto dedicação individual, quanto interações sociais, potencialmente tornando-a uma ótima estratégia para aplicação em grupos pequenos. Por outro lado, as etapas que a descrevem são bastante diretas e o próprio desenvolvimento da estratégia envolve processos de autorregulação que devem ser promotores de maior eficácia, como por exemplo os *feedbacks* explícitos sobre a compreensão do assunto que será ensinado. Mais do que isso, o MAF perpassa todos os pontos críticos relacionados ao funcionamento neural, que as neurociências têm mostrado serem importantes para a aprendizagem.

Em primeiro lugar, determinar os objetivos de aprendizagem envolve um processo autorreflexivo com mobilização *top-down* de recursos de atenção e organização de ideias na memória operacional para a tomada de decisão. Em parte, esse momento inicial da aplicação da técnica envolve a organização temporal do comportamento, como esperado à função pré-frontal (Kolb, 2007). A segunda etapa do MAF ainda requer envolvimento de memória operacional e recursos de atenção, mas agora também em busca de acesso a informações na memória de longo prazo (Baddeley, 2010), especificamente associado a memórias explícitas. Baddeley (2010) inclusive ressalta que, a despeito dos diferentes modelos de memória operacional propostos (ver Cowan, 2022 para revisão), o acesso à memória de longo prazo perpassa todos os diferentes modelos. Como já frisado anteriormente, a evocação de informações de longo prazo provocará novo

processo de consolidação, o que deve ser efetivo para a consolidação de sistemas e aprendizagem efetiva (Rasch; Born, 2013). Assim, a consolidação de sistemas é a mudança dos traços de memória de circuitos que envolvem o hipocampo, responsáveis pela manutenção inicial da informação de longo prazo, para os circuitos corticais (Squire *et al.*, 2015), nos quais os traços de memória são menos sujeitos ao esquecimento (Rasch; Born, 2013, Radvansky *et al.*, 2022).

A terceira etapa do MAF alinha-se exatamente com esse ponto: verificar no processo de transmissão de conhecimento quais são os pontos falhos ou incertos, revisitando a informação original, promovendo mais associações e eliminando as fragilidades. Se bem aplicada, a técnica naturalmente provocará muitas idas e vindas ao conteúdo de estudo, provocando exatamente o mesmo tipo de estratégia que a prática distribuída. Adicionalmente, o MAF envolve maior uso de recursos executivos tanto para auto-organização em relação aos objetivos de aprendizagem, quanto para organizar o próprio pensamento para o processo de ensinar outra pessoa. Até a última etapa, e se aplicado para diversos assuntos, a técnica provocará um extenso processo de reflexão e consolidação efetiva da informação. O seu uso para assuntos complexos deve provocar a repetição no contato com a informação, favorecendo o processo de LTP e a formação de traços de memória. Além disso, a interposição de períodos de sono às sessões de estudo deve promover a retenção das sinapses associadas aos assuntos estudados, em detrimento a outras atividades irrelevantes do dia, no processo de homeostase sináptica do sono (Tononi; Cirelli, 2014; De Vivo *et al.*, 2017).

É relevante enfatizar que o desenvolvimento das etapas do MAF provoca, na prática, uma mistura de várias das estratégias de estudo testadas por Dunlosky *et al.* (2013), como a prática distribuída, a auto explicação e a releitura, mas também a interrogação elaborativa – pelo menos no processo de ensinar da segunda etapa – e a prática intercalada, a depender de como os conteúdos de estudo foram organizados. Como já mencionado, a aplicação isolada de algumas dessas técnicas tem eficácia limitada. Nesse sentido, Kuhn *et al.* (2023) testaram se a aprendizagem por meio do ensino em médicos residentes promoveria o aperfeiçoamento do raciocínio clínico, em especial pelo emprego de reflexão deliberada, um processo que estaria envolvido com o ensinar e a estratégia de autoexplicação, mas sem a aplicação das etapas do MAF. Os resultados não mostraram diferenças na competência clínica de diagnóstico após a estratégia de ensino proposta. Os autores argumentam que a ausência de diferença pode estar relacionada tanto ao grupo experimental não ter realizado a reflexão deliberada, quanto ela também ter acontecido no grupo controle, mesmo sem a estratégia de ensino associada. Ainda que relatado como uma estratégia de aprendizagem por meio do ensino, este trabalho possui outras limitações como a ausência de interação com um interlocutor real, o que também pode ter limitado a eficácia do processo de ensinar, além da estratégia de autoexplicação não ter sido devidamente controlada. Por outro lado, de forma similar

ao que foi mostrado por Foster *et al.* (2019) – no qual a estratégia intercalada remota promoveu maior eficácia ao incorporar também a prática distribuída – o emprego do MAF e a combinação de diferentes estratégias de aprendizagem deve ampliar a eficácia de cada um deles, promovendo aprendizagem efetiva e duradoura.

É interessante também ressaltar que a MAF pode ser igualmente útil a aspectos cognitivos, que envolvem as memórias explícitas, quanto os aspectos psicomotores, relacionados a memórias implícitas. Dado que a segunda etapa do processo, que envolve transmissão de conhecimento, pode ser adaptado para contextos práticos e ensino de habilidades, a técnica tem potencial para se mostrar igualmente eficaz para ambos os sistemas de memória. Além disso, a necessidade de identificar as lacunas de aprendizado e, conseqüentemente, repetir o ensino e aperfeiçoar as técnicas psicomotoras, deve promover a repetição necessária ao arquivamento de memórias implícitas, que jamais podem ser arquivadas num único evento. Por fim, a especificidade natural de toda habilidade motora deve ser suficiente para muitos ciclos de demonstração da técnica em estudo, o que permitirá a aquisição gradual de associações simples, características de memórias implícitas (Helene; Xavier, 2003).

Em conjunto, essas evidências ressaltam a necessidade de mais pesquisas em estratégias de aprendizagem por meio do ensino e, especificamente, do MAF. Por certo, a combinação de processos de autorregulação, com a repetição no acesso ao conteúdo provocada pelo MAF, sugere que ela tem potencial para funcionar como uma excelente estratégia de estudo, possivelmente aplicável a todo tipo de material e conteúdo, com estudantes de diversos níveis e facilmente ajustável para as condições de aprendizagem necessárias.

4 Considerações finais

O presente artigo buscou trazer perspectivas das neurociências cognitivas que podem otimizar o processo de autoaprendizagem, por meio da escolha de técnicas de estudo mais eficazes, competentes para produzir memórias muito bem consolidadas. Tragicamente, a evidência empírica mostra que as técnicas de escolha dos estudantes não são as que estão apoiadas nessas evidências (Blasiman *et al.*, 2017). Pelo contrário, a maior parte dos estudantes parece escolher estratégias que promovem contato fragmentado com a informação, incapaz de produzir traços de memória robustos. Mais precisamente, os motivos para essa escolha devem residir na persistência e disciplina necessárias às estratégias de alta eficácia.

Salienta-se que a formação de traços de memória efetivos depende de associação constante de informações, isto é, do envolvimento de recursos pré-frontais executivos, que engajam o foco da atenção de maneira *top-down*, acessam arquivos de memória de longo prazo para buscar o

conhecimento já existente e permitem raciocínio lógico sobre a informação. Esses eventos por si só devem promover novas redes associativas de memória e novos processos de consolidação, mesmo para informações já conhecidas, como proposto por Rasch e Born (2013). Além disso, a consolidação é favorecida pelo estudo distribuído que intercala períodos de sono entre as sessões e favorece a retenção de sinapses associadas aos traços de memória provocados pelo material de estudo. Dessa forma, estudar de forma regular e persistente é a solução para a consolidação de sistemas, um processo que pode levar anos para acontecer (Squire *et al.*, 2015). Logo, os traços de memória formados na primeira exposição a uma informação são úteis apenas para problemas de baixa complexidade ou temporalmente próximos, mas serão descartados após o período de sono se não forem retomados (Rasch; Born, 2013, Tononi; Cirelli, 2014, De Vivo *et al.*, 2017, Radvansky *et al.*, 2022).

Portanto, a aprendizagem por meio do ensino e, em especial, o método de aprendizagem Feynman é uma estratégia ainda não explorada de forma sistematizada, em experimentos adequadamente controlados, mas que tem potencial para promover uso combinado de diversas estratégias de estudo convencionais. Como resultado, devem elevar a eficácia do processo de aprendizagem em longo prazo. Em especial, provocam inevitavelmente acessos persistentes ao conteúdo, com enfoque específico a cada sessão de estudo, o que muda não só o ponto de vista sobre um mesmo tópico, mas também reorganiza de forma eficiente a rede neural associada ao assunto que se procura conhecer, favorecendo a tão almejada consolidação de sistemas. Mais do que isso, são estratégias que dependem de características essenciais para toda e qualquer técnica: motivação para execução individual e persistência até compreensão plena. Se ainda não há no estudante entendimento da recompensa provocada pelo conhecimento, não há dúvida de que esse é o primeiro aprendizado necessário para o desenvolvimento de uma rotina para o estudar.

Referências

- ANSARI, D.; COCH, D. Bridges over troubled waters: education and cognitive neuroscience. *Trends in cognitive sciences*, v. 10, n. 4, p. 146–151. 2006. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2006.02.007>.
- BADDELEY, A. Working memory. *Current biology: CB*, v. 20, n. 4, p. R136–R140. 2010. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2009.12.014>.
- BASSETT, D. S.; SPORNS, O. Network neuroscience. *Nature neuroscience*, v. 20, n. 3, p. 353–364. 2017. <https://doi.org/10.1038/nn.4502>.
- BLASIMAN, R. N.; DUNLOSKY, J.; RAWSON, K. A. The what, how much, and when of study strategies: comparing intended versus actual study behaviour. *Memory* (Hove, England), v. 25, n. 6, p. 784–792. 2017. <https://doi.org/10.1080/09658211.2016.1221974>.

- BOLY, M.; GARRIDO, M. I.; GOSSERIES, O.; BRUNO, M. A.; BOVEROUX, P.; SCHNAKERS, C.; MASSIMINI, M.; LITVAK, V.; LAUREYS, S.; FRISTON, K. Preserved feedforward but impaired top-down processes in the vegetative state. *Science* (New York, N.Y.), v. 332, n. 6031, p. 858–862. 2011. <https://doi.org/10.1126/science.1202043>.
- BRESSLER, S. L.; MENON, V. Large-scale brain networks in cognition: emerging methods and principles. *Trends in cognitive sciences*, v. 14, n. 6, p. 277–290. 2010. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2010.04.004>.
- BROSNAN, M. B.; WIEGAND, I. The Dorsolateral Prefrontal Cortex, a Dynamic Cortical Area to Enhance Top-Down Attentional Control. *The Journal of neuroscience: the official journal of the Society for Neuroscience*, v. 37, n. 13, p. 3445–3446. 2017. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.0136-17.2017>.
- CAM. *The Feynman Technique*. 2020. University of Colorado Boulder. Disponível em: <https://www.colorado.edu/artssciences-advising/resource-library/life-skills/the-feynman-technique-in-academic-coaching>. Acesso em: 08 out. 2023.
- CARTER, J.A.; KOTZEE, B. *Epistemology of Education*. Oxford Bibliographies. 2015. <https://doi.org/10.1093/OBO/9780195396577-0292>.
- CORBETTA, M.; PATEL, G.; SHULMAN, G. L. The reorienting system of the human brain: from environment to theory of mind. *Neuron*, v. 58, n. 3, p. 306–324. 2008. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2008.04.017>.
- CORKIN, S. What's new with the amnesic patient H.M.?. *Nature reviews Neuroscience*, v. 3, n. 2, p. 153–160. 2002. <https://doi.org/10.1038/nrn726>.
- COWAN, N. Working memory development: A 50-year assessment of research and underlying theories. *Cognition*, v. 224, p. 105075. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2022.105075>.
- de VIVO, L.; BELLESI, M.; MARSHALL, W.; BUSHONG, E. A.; ELLISMAN, M. H.; TONONI, G.; CIRELLI, C. Ultrastructural evidence for synaptic scaling across the wake/sleep cycle. *Science* (New York, N.Y.), v. 355, n. 6324, p. 507–510. 2017. <https://doi.org/10.1126/science.aah5982>.
- DOMINICZAK, M. H. Individuality in science: Richard Feynman. *Clinical chemistry*, v. 61, n. 6, p. 894–895. 2015. <https://doi.org/10.1373/clinchem.2014.233510>.
- DUNLOSKY, J.; RAWSON, K. A.; MARSH, E. J.; NATHAN, M. J.; WILLINGHAM, D. T. Improving Students' Learning With Effective Learning Techniques: Promising Directions From Cognitive and Educational Psychology. *Psychological science in the public interest*, v. 14, n. 1, p. 4–58, 2013. <https://doi.org/10.1177/1529100612453266>.
- EKMAN, P.; CORDARO, D. What is Meant by Calling Emotions Basic. *Emotion Review*, v. 3, n. 4, p. 364–370. 2011. <https://doi.org/10.1177/1754073911410740>.
- ELSTON, G. N. Specialization of the neocortical pyramidal cell during primate evolution. In KAAS, J. H. (Ed.) *Evolution of Nervous Systems*. Amsterdam, Netherlands: Elsevier. 2007, v. 4 p. 191-242. <https://doi.org/10.1016/B0-12-370878-8/00164-6>.

FAN, J.; GU, X.; GUISE, K. G.; LIU, X.; FOSSELLA, J.; WANG, H.; POSNER, M. I. Testing the behavioral interaction and integration of attentional networks. *Brain and cognition*, v. 70, n. 2, p. 209–220. 2009. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2009.02.002>.

FENG, Z.; CHU, C.; ZHU, D.; JI, N.; CUI, J.; HUANG, Z. Investigation of intervention methods based on different leading roles in family regarding child road safety education: An experimental study. *Accident; analysis and prevention*, v. 178, p. 106874. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2022.106874>.

FERRER, E.; O'HARE, E. D.; BUNGE, S. A. Fluid reasoning and the developing brain. *Front Neurosci*. V. 3, n. 1, p. 46-51. 2009. <https://doi.org/10.3389/neuro.01.003.2009>.

FOSTER, N. L.; MUELLER, M. L.; WAS, C.; RAWSON, K. A.; DUNLOSKY, J. Why does interleaving improve math learning? The contributions of discriminative contrast and distributed practice. *Memory & cognition*, v. 47, n. 6, p. 1088–1101. 2019. <https://doi.org/10.3758/s13421-019-00918-4>.

FRAGA, G. P.; CARVALHO, R. B.; HIRANO, E. S.; BOLLELA, V. R. Basic life support: medical students learning by teaching. *Medical education*, v. 46, n. 11, p. 1105. 2012. <https://doi.org/10.1111/medu.12026>.

FREEMAN, S.; EDDY, S. L.; MCDONOUGH, M. *et al.* Active learning increases student performance in science, engineering, and mathematics. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, v. 111, n. 23, p. 8410–8415. 2014. <https://doi.org/10.1073/pnas.1319030111>.

FUSTER, J. M. Prefrontal Cortex in Decision-Making: The Perception–Action Cycle. In: Dreher, J. C. & Trambly, L. (Eds.) *Decision Neuroscience: an integrative approach*. Cambridge: Academic Press. 2017. pp. 95-105. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-805308-9.00008-7>.

FUSTER, J. M. Cognitive Networks (Cognits) Process and Maintain Working Memory. *Frontiers in neural circuits*, v. 15, p. 790691. 2022. <https://doi.org/10.3389/fncir.2021.790691>.

GRUBER, M. J.; RITCHEY, M.; WANG, S. F.; DOSS, M. K.; RANGANATH, C. Post-learning Hippocampal Dynamics Promote Preferential Retention of Rewarding Events. *Neuron*, v. 89, n. 5, p. 1110–1120. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2016.01.017>.

HELENE, A. F.; XAVIER, G. F. A construção da atenção a partir da memória. *Brazilian Journal of Psychiatry*, v. 25, n. Supl. II, p. 12–20. 2003. <https://doi.org/10.1590/S1516-44462003000600004>.

HERMIDA, M. J.; PEREZ SANTANGELO, A.; CALERO, C. I.; GOIZUETA, C.; ESPINOSA, M.; SIGMAN, M. Learning-by-Teaching Approach Improves Dengue Knowledge in Children and Parents. *The American journal of tropical medicine and hygiene*, v. 105, n. 6, p. 1536–1543. 2021. <https://doi.org/10.4269/ajtmh.21-0253>.

HESSLOW, G. Conscious thought as simulation of behaviour and perception. *Trends in cognitive sciences*, v. 6, n. 6, p. 242–247, 2002. [https://doi.org/10.1016/s1364-6613\(02\)01913-7](https://doi.org/10.1016/s1364-6613(02)01913-7).

KERSTEN, H. W. The enhancement of learning by teaching. *European journal of dental education: official journal of the Association for Dental Education in Europe*, v. 1, n. 4 p. 149–152, 1997. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0579.1997.tb00090.x>.

KOBAYASHI, K. Learning by creating teaching materials: Conceptual problems and potential solutions. *Front. Psychol.* v. 14, p. 1095285. 2023. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2023.1095285>.

KOLB, B. Do all mammals have a prefrontal cortex? In KAAS, J. H. (Ed.) *Evolution of Nervous Systems*. Amsterdam, Netherlands: Elsevier. 2007. v. 3 p. 443-450. <https://doi.org/10.1016/B0-12-370878-8/00081-1>.

KUHN, J.; MAMEDE, S.; VAN DEN BERG, P.; ZWAAN, L.; VAN PEET, P.; BINDELS, P.; VAN GOG, T. Learning deliberate reflection in medical diagnosis: does learning-by-teaching help? *Advances in health sciences education: theory and practice*, v. 28, n. 1, p. 13–26. 2023. <https://doi.org/10.1007/s10459-022-10138-2>.

LAURENCE, J. On being a Kunkel acolyte. *Lupus*, v. 12, n. 3, p. 207–208. 2023. <https://doi.org/10.1191/0961203303lu358xx>.

MAY, K.E.; ELDER, A.D. Efficient, helpful, or distracting? A literature review of media multitasking in relation to academic performance. *Int J Educ Technol High Educ*, v. 15, p. 13. 2018. <https://doi.org/10.1186/s41239-018-0096-z>.

MENON, V. 20 years of the default mode network: A review and synthesis. *Neuron*, v. 111, n. 16, p. 2469–2487. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2023.04.023>.

MOREIRA, I. C. Feynman e suas conferências sobre o ensino de física no Brasil. *Rev. Bras. Ensino Fís.* v. 40 n. 4. p. e4203. 2018. <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2017-0374>.

MOTA, A. R.; ROSA, C. T. W. Ensaio sobre metodologias ativas: reflexões e propostas. *Revista Espaço Pedagógico*, v. 25, n. 2, p. 261-276, 2018. <https://doi.org/10.5335/rep.v25i2.8161>.

OPHIR, E.; NASS, C.; WAGNER, A. D. Cognitive control in media multitaskers. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, v. 106, n. 37, p. 15583–15587. 2009. <https://doi.org/10.1073/pnas.0903620106>.

POSNER, M. I.; ROTHBART, M. K.; GHASSEMZADEH, H. Restoring Attention Networks. *The Yale journal of biology and medicine*, v. 92, n. 1, p. 139–143. 2019.

RADVANSKY, G. A.; DOOLEN, A. C.; PETTIJOHN, K. A.; RITCHEY, M. A new look at memory retention and forgetting. *Journal of experimental psychology. Learning, memory, and cognition*, v. 48, n. 11, p. 1698–1723. 2022. <https://doi.org/10.1037/xlm0001110>.

RANNEY, M.; SHIMODA, T. Education. In: Wilson, R. A.; Keil, F. C. *The MIT encyclopedia of the cognitive sciences*. 1ª ed. Cambridge, MA. 1999. p. 261-262. The MIT Press.

RASCH, B.; BORN, J. About sleep's role in memory. *Physiological reviews*, v. 93, n. 2, p. 681–766. 2013. <https://doi.org/10.1152/physrev.00032.2012>.

REISBERG, D. Learning. In: Wilson, R. A.; Keil, F. C. *The MIT encyclopedia of the cognitive sciences*. 1ª ed. Cambridge, MA. pp. 460-461. 1999. The MIT Press.

RICHERSON, P. J.; BOYD, R. *Not by Genes Alone: How Culture Transformed Human Evolution*. University of Chicago Press. 2005.

SASIN, E.; FOUGNIE, D. The road to long-term memory: Top-down attention is more effective than bottom-up attention for forming long-term memories. *Psychonomic bulletin & review*, v. 28, n. 3, p. 937–945. 2021. <https://doi.org/10.3758/s13423-020-01856-y>.

SHETTLERWORTH, S. J. *Cognition, Evolution, and Behavior*. (2nd ed.) Oxford University Press. 2010.

SQUIRE, L. R. The legacy of patient H.M. for neuroscience. *Neuron*, v. 61, n. 1, p. 6–9. 2009. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2008.12.023>.

SQUIRE, L. R.; GENZEL, L.; WIXTED, J. T.; MORRIS, R. G. Memory consolidation. *Cold Spring Harbor perspectives in biology*, v. 7, n. 8, p. a021766. 2015. <https://doi.org/10.1101/cshperspect.a021766>.

SUN, N. Z.; MANIATIS, T.; STEINERT, Y. Learning by teaching: benefits for frontline clinician-teachers. *Medical education*, v. 53, n. 11, p. 1154–1155. 2019. <https://doi.org/10.1111/medu.13977>.

Nobel Prize Outreach AB. *The Nobel Prize in Physics 1965*. 2023. NobelPrize.org. <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1965/summary/>

TONONI, G.; CIRELLI, C. Sleep and synaptic homeostasis: a hypothesis. *Brain research bulletin*, v. 62, n. 2, p. 143–150. 2003. <https://doi.org/10.1016/j.brainresbull.2003.09.004>.

TONONI, G.; CIRELLI, C. Sleep and the price of plasticity: from synaptic and cellular homeostasis to memory consolidation and integration. *Neuron*, v. 81, n. 1, p. 12–34. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2013.12.025>.

VELOSO, S. G.; PEREIRA, G. S.; VASCONCELOS, N. N.; SENGER, M. H.; DE FARIA, R. M. D. Learning by teaching basic life support: a non-randomized controlled trial with medical students. *BMC medical education*, v. 19, n. 1, p. 67. 2019. <https://doi.org/10.1186/s12909-019-1500-7>.

WENYAN, X., TIANDONG, D., SEN, Y., Discussion on the application of Feynman learning method in non-commissioned officer education. *Proceedings of the 2021 2nd International Conference on Mental Health and Humanities Education (ICMHHE 2021)*, p. 561. 2021. <https://doi.org/10.2991/assehr.k.210617.156>.

WHITEHEAD, H. Culture in Whales and Dolphins. In: PERRIN, W. F.; WÜRSIG, B.; THEWISSEN, J. G. M. *Encyclopedia of Marine Mammals*, 2nd ed. Cambridge, MA. p. 292–294. 2009. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-373553-9.00068-7>.

WOODS, R. *Note Taking in Class*. 2021. Law Library, University of Hawai'i at Mānoa. Disponível em: <https://law-hawaii.libguides.com/notetaking/feynman>. Acesso em: 08 out. 2023.