

Publication status: Not informed by the submitting author

Contributions of neuroscience to learning: a student's guide

Felipe Viegas Rodrigues

<https://doi.org/10.1590/SciELOPreprints.6590>

Submitted on: 2023-08-10

Posted on: 2023-08-15 (version 1)

(YYYY-MM-DD)

ARTIGO

CONTRIBUIÇÕES DAS NEUROCIÊNCIAS PARA A APRENDIZAGEM: UM GUIA PARA O ESTUDANTE

FELIPE VIEGAS RODRIGUES¹

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1073-867X>
<rodrigues.fv@gmail.com>

¹ Universidade do Oeste Paulista. Presidente Prudente, São Paulo(SP), Brasil.

RESUMO: Apesar da educação formal existir há milênios e a psicologia contribuir com a compreensão da aprendizagem há mais de cem anos, técnicas eficazes de aprendizagem continuam ausentes do repertório de estratégias dos estudantes. Este trabalho teórico foca em *insights* da neurociência para a aprendizagem de estudantes e examina a efetividade das estratégias de estudo comumente empregadas. Um achado fundamental é que as memórias tendem ao esquecimento a menos que as emoções sejam engajadas no momento da aquisição da informação ou que ocorra uma repetição explícita do processo de aprendizagem. Além disso, prestar atenção integral ao conteúdo desejado é fundamental para otimizar a formação de traços de memória efetivos. Dessa forma, não é surpreendente que técnicas com baixa relevância para os mecanismos de atenção ou com interação limitada com as informações – como grifar textos, fazer uma leitura simples, usar palavras-chave ou imagens mentais e até mesmo fazer resumos – tenham eficácia baixa. Por outro lado, envolver-se em exercícios de resolução de problemas e estabelecer uma rotina de estudos que distribui e promove acessos espaçados à informação, engaja aspectos fundamentais dos circuitos de atenção e facilita a formação de traços de memória robustos, o que maximiza a probabilidade de aprendizagem efetiva. Por fim, direções para pesquisas futuras são apresentadas, além de uma estratégia menos conhecida, mas com potencial para promover repetição e raciocínio crítico sobre os conteúdos, a aprendizagem por meio do ensino, incluindo o método de aprendizagem Feynman.

Palavras-chave: autoaprendizagem como assunto, eficiência, guia de estudo, memória, psicologia educacional.

CONTRIBUTIONS OF NEUROSCIENCE TO LEARNING: A STUDENT'S GUIDE

ABSTRACT: Despite formal education existing for millennia and psychology contributing to the understanding of learning for over a hundred years, effective learning techniques remain absent from students' repertoire of strategies. This theoretical study focuses on insights from neuroscience for student

learning and examines the effectiveness of commonly employed study strategies. One crucial finding is that memories are prone to fading unless emotions are engaged during information acquisition or explicit repetition of the learning process takes place. Furthermore, providing undivided attention to the desired content is crucial for optimizing the formation of effective memory traces. Therefore, it is not surprising that techniques with low salience to attention mechanisms or limited interaction with the information – such as text highlighting, engaging in simple reading, utilization of keywords or mental imagery, and even summarization – tend to yield low effectiveness. On the other hand, engaging in problem-solving exercises and establishing a study routine that incorporates regular and spaced access to information activate essential aspects of attention circuits and facilitate the formation of strong memory traces, thereby maximizing the likelihood of effective learning. Finally, directions for future research are presented, along with a lesser-known yet potentially impactful strategy to enhance repetition and critical reasoning of content: learning by teaching, including the Feynman Learning Method.

Keywords: self-directed learning as topic; efficiency; study guide; memory; psychology, educational.

CONTRIBUCIONES DE LAS NEUROCIENCIAS AL APRENDIZAJE: UNA GUÍA PARA EL ESTUDIANTE

RESUMEN: A pesar de que la educación formal existe desde hace milenios y la psicología ha contribuido a la comprensión del aprendizaje durante más de cien años, las técnicas efectivas de aprendizaje siguen ausentes en el repertorio de estrategias de los estudiantes. Este estudio teórico se centra en los conocimientos proporcionados por la neurociencia para el aprendizaje de los estudiantes y examina la eficacia de las estrategias de estudio comúnmente empleadas. Un hallazgo crucial es que los recuerdos tienden a desvanecerse a menos que las emociones se involucren durante la adquisición de información o que tenga lugar una repetición explícita del proceso de aprendizaje. Además, prestar atención completa al contenido deseado es crucial para optimizar la formación de trazas de memoria efectivas. Por lo tanto, no es sorprendente que las técnicas con poca relevancia para los mecanismos de atención o con interacción limitada con la información, como el resaltado de texto, la lectura simple, la utilización de palabras clave o la creación de imágenes mentales, e incluso la síntesis, tiendan a producir resultados poco efectivos. Por otro lado, involucrarse en ejercicios de resolución de problemas y establecer una rutina de estudio que incorpore acceso regular y espaciado a la información activa aspectos esenciales de los circuitos de atención y facilita la formación de trazas de memoria sólidas, maximizando así la probabilidad de un aprendizaje efectivo. Finalmente, se presentan direcciones para investigaciones futuras, junto con una estrategia menos conocida pero potencialmente impactante para mejorar la repetición y el razonamiento crítico del contenido: el aprendizaje a través de la enseñanza, incluido el Método de Aprendizaje Feynman.

Palabras clave: autoaprendizaje como asunto, eficiencia, guía de estudio, memoria, psicología educacional.

INTRODUÇÃO

Em sentido amplo, a educação pode ser definida como a forma pela qual a cultura é perpetuada e desenvolvida, englobando desde a educação informal até a educação formal (Ranney & Shimoda, 1999). Para alguns autores, a educação é interpretada como mais do que uma ciência (Nachonicz, 2002), à medida que promove processos de intervenção para educar. Para outros, é parte das ciências cognitivas (Ranney & Shimoda, 1999, Ansari e Coch, 2006), 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, cérebros esses que foram moldados pelo processo de seleção natural para aprender e gerenciar cultura.

Interessantemente, há evidências claras de cultura em baleias e golfinhos (Whitehead, 2009), o que sugere que a cultura não é uma exclusividade humana, mas um produto de cérebros grandes, considerada a divergência evolutiva entre humanos e cetáceos de quase 100 milhões de anos (Herculano-Houzel, 2012). De fato, Herculano-Houzel (2012) reuniu dados que mostram que 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. Portanto, nosso cérebro se tornou grande durante o processo evolutivo, mas não especial ou divergente em relação aos demais animais. Defesa semelhante já havia sido feita por Elston (2007), que argumenta que a diferença de competência cognitiva e complexidade de cultura dos humanos poderia estar na microestrutura cerebral, isto é, a topologia da rede neural, algo que passou a ser avaliado somente no século 21 com o mapeamento de redes cerebrais (Basset & Sporns, 2017). Diante disso, podemos restringir a educação formal como uma atividade exclusivamente humana.

Rastrear as origens da educação formal é uma tarefa árdua que, felizmente, foge ao escopo desse trabalho. O pensamento sistematizado, com racionalidade empírica, pode ser encontrado em textos que datam quase 5.000 anos, como o papiro cirúrgico de Edwin Smith, que claramente possuía propósito de transmissão de conhecimento médico (Minagar, Ragheb, & Kelley, 2003). Johnson e Stearns (2022) relatam que há evidências arqueológicas de educação formal com 4.000 anos. Por outro lado, um símbolo importante na formalização do ensino é a Academia de Platão em 387 AEC, um dos pioneiros em teorizar sobre o processo de aprendizagem. A Academia é frequentemente considerada a primeira universidade (Ochoa & Corey, 1995). Indo além, Popper (1959/2005) defende que filósofos de Platão a Descartes, e os empiristas britânicos refletiram sobre o conhecimento e a epistemologia justamente para sabermos mais sobre a aquisição de conhecimento. Avanços importantes acontecem a partir do final do século 19, quando a Psicologia se consolida como um novo campo do saber (Kristensen, Almeida & Gomes, 2001). A Psicologia propôs novas teorias de aprendizagem ao longo do século 20, sempre com foco em compreender como o indivíduo adquire informações. Nomes como Ivan Pavlov (1849-1936), Lev Vygotsky (1896-1934) e Jean Piaget (1896-1980) são tão conhecidos na psicologia, quanto na educação. Revisar essas teorias está além dos objetivos deste trabalho e há extensa literatura no assunto.

Em especial, a segunda metade do século 20 foi marcada pelo entendimento da necessidade do aprendiz ser ativo, da qual derivam a aprendizagem por descoberta, aprendizagem reflexiva, aprendizagem experiencial, o construtivismo e a aprendizagem autorregulada (Markant, Ruggeri, Gureckis & Xu, 2016). Por exemplo, Freeman et al. (2014) mostraram que o uso de metodologias ativas

é mais eficaz para aprendizagem do que estratégias passivas como aulas expositivas, pelo menos para disciplinas de ciências, tecnologia, engenharia ou matemática (STEM). Para o estudante, que é o maior interessado no processo, as pesquisas sobre aprendizagem parecem trazer poucos benefícios diretos. Dunlosky, Rawson, Marsh, Nathan e Willingham (2013) defendem que muitos professores desconhecem as técnicas eficazes de estudo que a psicologia testou nas suas várias décadas de existência. Elas poderiam beneficiar os estudantes, que permanecem utilizando estratégias de estudo pouco efetivas.

Nesse contexto, Carter e Kotzee (2015) definem três conceitos epistêmicos inter-relacionáveis em educação: *aprender* - relacionado a movimentar-se de um estado de menos conhecimento a outro de mais conhecimento; *ensinar* – a ação sobre outro sujeito para produzir aprendizado, e, por fim, *educar* - que está relacionado ao processo de ensinar e produzir aprendizado. O processo de aprender, daqui em diante chamado simplesmente de aprendizagem, engloba múltiplas formas de aquisição de conhecimento e, por isso, uma definição interessante de aprendizagem é a capacidade de modificar o comportamento com base em experiências anteriores (Reisberg, 1999, Shettleworth, 2010). Reisberg (1999), no entanto, reconhece que essa definição engloba processos que muitas vezes não são reconhecidos como aprendizagem, especialmente por incluir processos implícitos, isto é, que envolvem memória implícita. A distinção entre aprendizagem implícita e explícita será feita mais adiante em nossa discussão. Adicionalmente, é válido destacar que o aprender não é produzido somente pelo ensinar, mas também pelo *estudar* – um movimento pessoal que leva ao processo de aprendizagem. Este, porém, não é um conceito enfatizado por Carter e Kotzee (2015), apesar dos autores mencionarem que a aprendizagem também acontece independentemente. Mas a importância de incluir o estudar como um episteme é enfatizar o papel ativo do estudante na aprendizagem. E não se trata de um papel ativo em sala apenas, como as metodologias efetivas já propõem, mas o estudar individualizado, sem distrações e que melhora a qualidade no contato com a informação a ser aprendida.

Eficiência de diferentes estratégias de estudo

Dunlosky et al. (2013) fizeram uma extensa revisão sobre dez técnicas comuns de aprendizagem utilizadas por estudantes, escolhidas pelo seu uso e adoção fáceis (Tabela 1).

Tabela 1 – Breve descrição das técnicas de estudo exploradas por Dunlosky et al. (2013).

Técnica	Descrição
Interrogação elaborativa	Gerar uma explicação sobre os motivos de um fato ou conceito ser verdadeiro.
Auto explicação	Explicar como novas informações relacionam-se a informações prévias ou aos passos para resolução de um problema.
Fazer resumos	Escrever resumos do texto que deve ser aprendido.
Grifar o texto	Grifar porções do texto potencialmente importantes enquanto se lê.
Palavra-chave mnemônica	Uso de palavras-chave e imagens mentais para associar o material verbal.
Imagens mentais do texto	Tentar formar imagens mentais do texto ao ler ou ouvir o material.
Releitura	Ler mais uma vez o material, após a leitura inicial
Testes práticos	Resolver exercícios ou problemas do material a ser compreendido.
Prática distribuída	Implementar um cronograma de estudos distribuídos no tempo.
Prática intercalada	Implementar um cronograma de estudos que mistura diferentes tipos de conteúdo ou materiais em uma única sessão de estudos.

Fonte: Adaptado de Dunlosky et al. (2013).

O intuito foi explorar a eficácia de cada uma, ao avaliar se os seus benefícios poderiam ser generalizados em quatro categorias de variáveis: condições de aprendizagem, características dos estudantes, materiais utilizados e o critério da tarefa a ser executada. As condições de aprendizagem dizem respeito ao contexto em que o estudante está inserido, o que inclui a forma de interação com os materiais de estudo. Portanto, fatores como o nível de ruído no ambiente de estudo, número de contatos com o material (e com qual intervalo de tempo) e se o conteúdo deveria ser lido ou ouvido. Os materiais envolvem o tipo de conteúdo a ser aprendido. As características dos estudantes incluem fatores como a idade, conhecimento prévio, interesses e motivação. Estratégias mais complexas, que dependam de competências elaboradas de atenção, por exemplo, podem não ser adequadas a estudantes do ensino fundamental. Por fim, o critério da tarefa é uma avaliação de grande importância, porque diz respeito ao sucesso de aprendizagem em aspectos tão simples quanto memorizar determinado conteúdo ou tão complexos quanto poder sintetizar e julgar uma miríade de conceitos, o que implica na capacidade de raciocinar e manipular de forma abstrata os conceitos em estudo (Dunlosky et al., 2013).

Para cada uma das categorias de variáveis consideradas, as estratégias de estudo foram classificadas como negativas, insuficientes, qualificadas (quando apresentaram resultados mistos, positivos, mas também inconclusivos nos diversos trabalhos) ou positivas para aprendizagem, o que levou a uma avaliação geral de eficácia. Os resultados da avaliação são bastante interessantes ao apontar que estratégias largamente utilizadas, como grifar textos, usar palavras-chave ou imagens mentais, ler várias vezes e até fazer resumos tem eficácia baixa. As estratégias de interrogação elaborativa, auto-explicação e prática intercalada, tiveram eficácia moderada. As únicas estratégias com eficácia alta são a prática distribuída e os testes práticos. As evidências por trás dessas conclusões podem ser encontradas no trabalho original dos autores. O objetivo principal desta revisão é reconciliar essas conclusões com a pesquisa atual em neurociência e fornecer uma compreensão abrangente de seus mecanismos neurobiológicos subjacentes. Para conseguir isso, é imperativo estabelecer uma estrutura contextual ao integrar as descobertas da neurociência sobre os processos cognitivos e seus substratos neurais.

CONTRIBUIÇÕES DAS NEUROCIÊNCIAS

Shettleworth (2010) afirma que na psicologia, tradicionalmente, aprendizagem e memória compõem áreas de pesquisa distintas. Enquanto as pesquisas em aprendizagem usualmente buscam compreender como a informação sobre as relações entre os eventos é adquirida – medida por meio de alterações duradouras no comportamento – pesquisas em memória investigam como a informação é armazenada, consolidada e evocada. No entanto, a autora argumenta que os resultados dos dois processos são semelhantes, senão idênticos – por exemplo, formar uma imagem mental, adquirir uma resposta condicionada ou reconhecer um estímulo no ambiente. Nesse sentido, Shettleworth (2010) defende que a tradicional dicotomia entre aprendizagem e memória é questionável e tem sido ignorada nas pesquisas contemporâneas em neurociências da memória, nas quais as investigações sobre as mudanças cerebrais relacionadas à aprendizagem têm sido classificadas como estudos de memória. Vários outros autores (e.g., Scoville & Milner, 1957; Corkin, 2002; Rasch, & Born, 2013; Squire, Genzel, Wixted, & Morris, 2015)

também tem utilizado os termos memória e aprendizagem com os mesmos fins. Nesse contexto, as inferências que serão feitas sobre os processos cerebrais necessários à aprendizagem, terão como base muito dos estudos que investigam a memória.

Memória

A memória tem sido distinta em processos de curto prazo e longo prazo desde os primórdios da psicologia (e.g. James, 1890/1931). William James chamou de memória primária todas as informações retidas por tempo breve, que se confundem com a própria consciência, e são perdidas assim que a atenção e o fluxo do pensamento se modificam. Essa descrição é bastante semelhante àquela que atualmente é feita para a memória operacional (Baddeley, 2010; Kwak & Curtis, 2022). Por outro lado, James (1890/1931) chamou a memória secundária de memória propriamente dita, isto é, evocar um “estado mental anterior após ele ter saído da consciência; ou melhor, *o conhecimento de um evento, ou fato, no qual não temos pensado por um tempo, com a consciência adicional de que nós pensamos sobre ou o experienciamos antes*” (pág. 648, grifos do autor). Tal descrição é indistinta do conceito atual sobre memórias explícitas ou declarativas, que compõe o conhecimento semântico - o conhecimento geral sobre os fatos do mundo - e o conhecimento episódico - as memórias para eventos com contexto espacial e temporal específico (Corkin, 2002). Squire (2009) ressalta que as memórias declarativas são o fenômeno associado ao uso do termo memória no senso comum, a capacidade de saber fatos e eventos.

A ciência sobre a memória foi perturbada somente na metade do século 20, com a publicação de uma série de relatos de caso por Scoville e Milner (1957). Merece destaque os relatos terem sido motivados por uma cirurgia “francamente experimental” (pág. 11) para tratamento de um quadro incapacitante de epilepsia focal e generalizada num jovem de 27 anos identificado como H.M. O neurocirurgião William Scoville (1906-1984) propôs a remoção bilateral de cerca de 8 cm do lobo temporal medial, incluindo o hipocampo e giro parahipocampal, local proposto para o foco epilético, mas o processo cirúrgico removeu apenas 5 cm a partir do polo temporal, preservando a porção posterior do giro parahipocampal (Squire, 2009). Após a cirurgia, H.M. não teve “alterações fisiológicas ou comportamentais marcantes, com exceção única de uma *perda de memória recente muito grave*” (Scoville, 1954, pág. 64-65, grifos do autor), além da melhora do quadro epilético, com crises que se tornaram menos incapacitantes. O prejuízo comportamental de H.M. envolvia uma amnésia retrógrada parcial ao longo de três anos anteriores até sua cirurgia - identificada inicialmente como perda de memória recente - e um “prejuízo não só severo, mas também permeado” de amnésia anterógrada (Corkin, 2002, pág. 153), com capacidade de aprendizagem semântica virtualmente não preservada.

O paciente H.M. teve seu nome conhecido somente em 2008, pela notícia do seu falecimento aos 82 anos (Carey, 2008), o que revela uma vida de mais de meio século com amnésia profunda. Henry Gustav Molaison (1926-2008) passou os dois terços finais da sua vida mencionando ter 27 anos - sua idade à época da cirurgia, em 1953 – também incapaz de relatar ter feito uma neurocirurgia e “permaneceu sem conhecimento da sua fama e do impacto que a sua participação em pesquisa teve nas comunidades médica e científicas internacionais” (Corkin, 2002, pág. 159). O paciente H.M. foi o exemplo perfeito de como memórias de curto e longo prazo dependem de sistemas distintos. Scoville e Milner (1957) relatam que H.M. e outros dois pacientes com prejuízos graves de memória não tinham dificuldades em “reter

um número de três dígitos ou um par de palavras não relacionadas por vários minutos, se cuidado fosse tomado em não os distrair durante o intervalo” (pág. 15). Em conjunto, a evidência clínica e neuropsicológica permite afirmar que H.M. era capaz de codificar novas informações, mas incapaz de usá-las para a formação de um traço de memória de longo prazo (Corkin, 2002). É importante destacar que a expressão memória recente utilizada por Scoville (1954) não se refere à memória de curto prazo, tanto nos termos inicialmente definidos por James (1890/1931), quanto nos termos utilizados hoje Corkin (2013/2018). Adicionalmente, Corkin (2013/2018) defende que H.M. tinha ausência profunda também de conhecimento episódico, não só anterógrado, mas também retrógrado. Squire (2009), por outro lado, argumenta que H.M. teve alterações neurológicas em substâncias branca e cinzenta importantes ao longo do intervalo de dez anos em que os últimos dois exames de imagem foram obtidos, que poderiam subsidiar a piora na evocação de conhecimento episódico defendida por Corkin (2013/2018).

O dado mais revelador sobre o paciente H.M., no entanto, era sua capacidade preservada de aprender novas habilidades, inicialmente evidenciada para o aprendizado motor, mas também por outros efeitos como a pré-ativação por repetição (*repetition priming*) e pela aprendizagem perceptual (Corkin, 2002). Estes achados levaram ao reconhecimento de múltiplos sistemas de memória de longo prazo e, em especial, ao entendimento de que todas essas outras formas de aprendizado são independentes do hipocampo e do relato verbal (Helene & Xavier, 2003). A ausência do hipocampo e giro parahipocampal, tirou a capacidade de Henry Molaison reter novos conhecimentos explícitos ou declarativos, mas preservou a capacidade de aprendizagem implícita ou não-declarativa, por exemplo dependente dos núcleos da base para aprendizado motor. A memória implícita distingue-se pela necessidade de repetição para consolidação e pode ser evidenciada somente pelo desempenho de uma tarefa ou habilidade. Portanto, o paciente H.M. era capaz de aprender como fazer tarefas, mas incapaz de relatar o que aprendeu, ou o que sabe. Bolognani, Gouveia, Brucki e Bueno (2000) fazem um relato de caso com prejuízos bastante semelhante àqueles de H.M., num paciente de 23 anos que sofreu anoxia cerebral após uma parada cardíaca. De fundamental importância no relato é a demonstração de que a capacidade preservada de aprender novas tarefas, ou de formar memórias implícitas, permite ensinar uma ocupação e manter estes pacientes produtivos, por meio de estratégias de reabilitação neuropsicológica.

Interessantemente, Liu, Forest, Duncan e Finn (2023) mostraram que os traços de memórias implícitas e explícitas têm padrões distintos de consolidação, com traços implícitos tornando-se mais fortes independente da reapresentação (ou novo treino) da informação e, traços explícitos, decaindo no mesmo prazo, embora possam ser reforçados por nova apresentação da informação. Nesse sentido, Radvansky, Doolen, Pettijohn, & Ritchey (2022) defendem que a curva de esquecimento para conteúdos semânticos é um dos achados mais bem estabelecidos da pesquisa em memória. Por outro lado, os autores argumentam que a curva de esquecimento já deveria ser plenamente previsível, como é comum em muitas outras ciências. Os autores propõem que a retenção da informação, e consequentemente o esquecimento, pode ser dividido em fases que acompanham as mudanças associadas à consolidação da memória no córtex cerebral. Essas fases incluem (a) Memória de curto prazo/operacional durante o primeiro minuto de retenção, (b) memória de longo prazo precoce, entre um minuto e 12h, (c) memória de longo prazo transicional, entre 12h e sete dias, e (d) consolidação de sistemas (Squire et al., 2015), para aprendizagem

efetiva, por deslocar a representação da informação do hipocampo para o córtex cerebral. É importante ressaltar que todo o processo de consolidação envolve a organização e reorganização de redes neurais do córtex cerebral (Rasch, & Born, 2013; Brunec, Robin, Olsen, Moscovitch, & Barense, 2020). O processo de consolidação inicial, entre um minuto e 12h é sensivelmente influenciado pela repetição do contato com a informação (<anonimizado>).

Desta síntese, é importante destacar que qualquer informação retida além de um minuto é, no geral, considerada memória de longo prazo. Nem Radvansky et al. (2022) e nem Corkin (2013/2018) fazem distinção entre memória de curto prazo e memória operacional, porque entendem que não há retenção em curto prazo sem foco de atenção na informação. É esse fato que permitia a H.M. reter informações por vários minutos, quando instruído a sustentar a informação. Por outro lado, mudar o foco do assunto poderia fazê-lo esquecer a informação em até menos do que um minuto. Em termos neurofisiológicos, a persistência do disparo de neurônios pré-frontais e parietais para sustentar uma determinada informação em curto prazo já foi extensivamente demonstrada (Fuster, 2022), é bastante dependente da região dorsolateral do córtex pré-frontal (DLPFC, Brosnan & Wiegand, 2017) e possivelmente envolve circuitos inibitórios recorrentes do DLPFC (Kim & Sejnowski, 2021), uma microcircuitaria que é diferenciada no córtex pré-frontal humano (Loomba et al., 2022) e tem suporte de propostas feitas anteriormente (Elston, 2007).

Os períodos delimitados por Radvansky et al. (2022) levantam um questionamento adicional: o que distingue a memória de longo prazo precoce da tardia? A evidência na literatura aponta uma única direção: o sono, sugestão compartilhada pelos autores. Toda experiência que ocorre ao longo de um dia provoca a formação de traços de memória: alterações sinápticas instáveis, sujeitas a interferência e esquecimento (Lomo, 2003; Rasch, & Born, 2013). Essas alterações são genericamente chamadas de plasticidade atividade-dependente e há evidências de que a capacidade de formação de memórias do hipocampo é dependente até mesmo de neurogênese (Alam, Kitamura, Saitoh, Ohkawa, Kondo, & Inokuchi, 2018), uma das únicas regiões neurais com essa competência. Tononi e Cirelli (2003) desenvolveram a hipótese de homeostase sináptica (HHS), segundo a qual o sono seria útil para restabelecer um estado sináptico basal. A HHS sugere que alterações em sinapses que representariam traços de memória não relevantes, formados ao longo do dia, seriam descartadas durante o sono. Nesse sentido, De Vivo et al. (2017) mostraram que durante o sono em torno de 80% das sinapses reduzem o seu tamanho, um processo que não acontece em animais mantidos forçadamente acordados, sugerindo que o sono é crucial para o processo de restabelecimento sináptico, e, possivelmente, para o esquecimento de traços de memória irrelevantes. O processo de consolidação, ou de estabilização dos traços de memória formados (Rasch, & Born, 2013), aconteceria em maior medida para eventos com valor adaptativo, que permaneceriam diferenciados na rede neural (Gruber, Ritchey, Wang, Doss e Ranganath, 2016). Nas palavras de Tononi e Cirelli (2014), o sono é o preço a ser pago pela plasticidade.

Além disso, Brunec et al. (2020) defendem que a atuação do hipocampo na consolidação e evocação de memórias é flexível e dinâmica em função do objetivo de extrair generalizações ou reportar experiências específicas. Essa distinção é crucial porque extrair generalizações pode estar associado à familiaridade – a sensação de que o fato ou evento aconteceu no passado, mas sem informações sobre as circunstâncias ou o contexto em que aconteceu. Por outro lado, reportar experiências específicas envolve

evocação de uma memória, o que só é possível após aprendizagem efetiva, isto é, informação realmente ter sido consolidada no córtex cerebral (Cabeza, Ciaramelli, Olson, & Moscovitch, 2008). Em outras palavras, a memória de reconhecimento seria uma habilidade com dois componentes: evocação ou familiaridade (Song, Jeneson, & Squire, 2011). Essa distinção tem implicações consideráveis para a aprendizagem, como será discutido mais adiante. Antes disso, no entanto, é importante conhecer mais sobre a atenção, dado seu papel fundamental na retenção da informação em curto prazo.

Atenção

A atenção é um conjunto de processos que compõe um sistema atencional (Fan et al., 2009) e inclui subcomponentes para (1) a obtenção e manutenção de um estado de alerta, (2) a orientação para estímulos sensoriais e (3) o controle voluntário de respostas, promovido pela rede executiva de atenção (Fan, McCandliss, Sommer, Raz, & Posner, 2002; Posner, Rothbart, & Ghassemzadehb, 2019). A rede executiva de atenção é inclusive reconhecida como uma das redes neurais em larga escala - responsáveis pelos processos complexos que compõem a cognição (Bressler & Menon, 2010). O conceito de redes ou assembleias neurais foi proposto na metade do século passado por Donald Hebb (1949) e o funcionamento de redes complexas, irrestritas a um único ponto do córtex cerebral, mais bem descrito por Luria (1973/1981). Redes em larga escala, no entanto, só foram pensadas no começo do século 21, sendo conhecidas desde redes ativas durante o desengajamento do mundo externo (Raichle, MacLeod, Snyder, Powers, Gusnard, & Shulman, 2001; Raichle, 2015) até redes fundamentais para a cognição social (Maliske & Kanske, 2022). A existência de uma rede complexa para controle executivo da atenção sugere a relevância deste processo para uma boa adaptação ao ambiente.

Corbetta e Shulman (2002) descrevem dois sistemas cortico-corticais distintos para mobilização da atenção. Uma rede frontoparietal dorsal - envolvendo o polo ocular frontal (FEF, *frontal eye field*), o sulco intraparietal (IPS) e áreas adjacentes – que seria responsável pelo controle “de cima-para-baixo” ou *top-down* da atenção. Essa rede também é referida como a que exerce a mobilização voluntária da atenção, que produz atenção endógena ou direcionada a objetivos (*goal-driven*). A segunda é a rede frontoparietal ventral – que envolve a junção temporoparietal (TPJ) (região posterior do sulco temporal superior e do giro temporal superior, em conjunto com a parte ventral do giro supramarginal) e o córtex frontal ventral, que inclui partes do giro frontal médio (MFG), do giro frontal inferior (IFG), o opérculo frontal e a ínsula anterior. Estas regiões são responsáveis pelo controle “de baixo-para-cima” ou *bottom-up* da atenção. Ela também é chamada de mobilização automática, atenção exógena ou direcionada por estímulos (*stimulus-driven*). No conceito de redes em larga escala, a rede frontoparietal dorsal é indistinta da rede executiva de atenção e a rede frontoparietal ventral é similar, mas não idêntica à rede de saliência (Seeley et al., 2007; Menon, 2023).

Diferentemente do que é descrito e interpretado à partir dos rótulos *top-down* e *bottom-up*, no entanto, Corbetta, Patel e Shulman (2008) descrevem que a rede dorsal é responsável por gerar e manter sinais endógenos com base em objetivos em curso e informações pré-existentes sobre a probabilidade de contingências, o que predispõe ao processamento de certas características e locais no córtex sensorial e permite gerar respostas inclusive para pistas exógenas, desde que elas contemplem objetivos e expectativas do sujeito. A rede ventral, por outro lado, funciona em conjunto com a rede dorsal, mas não

é ativada pela expectativa ou preparação para tarefa, nem pela pura saliência/intensidade do estímulo no ambiente, mas sim ativa-se quando estímulos ou alvos relevantes ao comportamento são detectados, mesmo que pouco salientes. Em vista disso, os autores concluem que a clássica separação entre orientação exógena e endógena é inadequada e pode não refletir a atividade de sistemas neurais distintos. Dessa forma, os autores propõem a separação entre um sistema de orientação da atenção— que se ativa tanto por estímulos exógenos quanto pela necessidade de atender a objetivos internos – e um sistema de reorientação, a qual é provocada por estímulos. Essa distinção seria mais adequada para caracterização das redes frontoparietais dorsal e ventral, respectivamente. É importante também ressaltar que ambas se ativam não só para estímulos visuais, mas também auditivos e somestésicos (Corbetta et al., 2008). Nesse contexto, é interessante notar que, de forma aparentemente contraditória, Cabeza et al. (2008) reúnem evidências de que circuitos parietais dorsais respondem de forma mais ativa a estímulos que provocam a sensação de familiaridade, enquanto o processo de evocação de memórias esteja associado a maior ativação de circuitos ventrais. Uma solução para a aparente contradição, no entanto, é compreender o processo de evocação como uma consequência direta do estímulo externo oferecido, enquanto a sensação de familiaridade requer que o indivíduo exerça processos *top-down* na tentativa de encontrar o traço de memória correto, o que pode ser um desperdício de recurso executivo no momento de um teste formal.

Adicionalmente, Corbetta et al. (2008) descrevem como as redes frontoparietais interagem e supõe que as regiões dorsais (IPS e FEF) poderiam provocar supressão na rede ventral em momentos em que um alvo específico é buscado pelas suas características ou em determinada região do espaço, dado que elas exibem alto nível de atividade em tarefas de busca. Mas eles não descartam que a fonte de sinais *top-down* seja o DLPFC e argumentam que, se o córtex pré-frontal é a fonte de sinal inibitório sobre a rede ventral, a lesão desta região deve provocar prejuízo no controle *top-down* da informação e redução do desempenho na presença de distratores. De fato, é exatamente isso que foi mostrado por Chao e Knight (1995) após lesão unilateral do DLPFC direito, mas não do hipocampo ou da TPJ. Interessantemente, Chao e Knight (1995) também mostram prejuízo no desempenho de pacientes com lesão do hipocampo somente na condição com distrator e para latências de resposta superior a 10s, evidenciando que a mudança de foco de atenção é suficiente para tirar o estímulo da memória de curto prazo, que somente pode ser evocada novamente em indivíduos com hipocampo intacto. Esse achado suporta que os conceitos de memória de curto prazo e memória operacional sejam indistinguíveis e a mudança do foco de atenção é suficiente para caracterizar a segunda fase de Radvansky et al. (2022), a memória de longo prazo precoce, mesmo com intervalos menores do que um minuto. Em conjunto, estas evidências sustentam que a atenção é mais do que apenas o processo de seleção da informação e possui íntima relação com a retenção de informação em curto prazo, o que suporta o conceito de memória operacional (Baddeley, 2010; Cowan, 2022).

Recentemente, Sasin e Fougny (2021) mostraram que a utilização de estratégias *top-down* é mais eficiente do que estratégias *bottom-up* para a consolidação de memórias de longo prazo. Estes autores criaram um paradigma em que a mobilização da atenção provocada por dois distratores diferentes é comparada durante uma tarefa visual: um distrator saliente (DS), que piscava na tela em comparação a outros objetos que eram estáticos, incluindo o alvo, e um distrator relacionado em contexto (DRC), que possui cor semelhante ao alvo, mas com a mesma saliência. Parte das tentativas do experimento eram

tentativas neutras, isto é, sem distratores que provocassem mobilização adicional da atenção. Os autores consideraram que o primeiro distrator (DS) provoca mecanismos exógenos e, o segundo (DRC), mecanismos endógenos, dado que ele possui cor semelhante à expectativa do alvo buscado pelo participante. Os resultados mostraram que o DRS é mais competente em provocar consolidação de memórias de longo prazo em relação ao DS, ainda que ambos tenham menor eficiência do que o alvo. A investigação de traços de memória dos distratores era inesperada aos participantes – não fazia parte das instruções – e foi entremeadada à tarefa de busca visual.

Ainda que seja discutível se DS e DRC de fato envolvem mecanismos unicamente exógenos e endógenos, no contexto da proposta de Corbetta et al. (2008), é indiscutível que o DRC se alinha com os objetivos e expectativas do indivíduo, portanto com mecanismos *top-down* de atenção. Independente dos mecanismos endógenos e exógenos mobilizados na tarefa estarem diferenciados com precisão, a maior consolidação na memória de longo prazo dos distratores relacionados ao contexto, que possuía cor semelhante ao alvo esperado pelo participante, sugere que a utilização de estratégias ativas, *top-down*, pode ser mais eficiente do que apenas depender da saliência dos estímulos no ambiente para consolidar informações. Portanto, esforço mental ativo, voluntário, de busca e associação de informações durante o estudo deve provocar repercussões positivas para a aprendizagem. Por outro lado, dividir a atenção não é um processo eficiente e deve ser evitado, pois não há sujeitos verdadeiramente capazes de funcionar de forma multitarefa (Ophir, Nass, & Wagner, 2009). Nesse sentido, é essencial destacar que os sistemas de atenção são susceptíveis à cegueira por desatenção (*inattentional blindness*, Lamme, 2003). Esse fenômeno refere-se à situação em que o foco de atenção em uma tarefa ou estímulo específico pode prejudicar o processamento de novos estímulos, tornando improvável seu relato posterior. Consequentemente, em ambientes educacionais como aulas e demonstrações, desviar o foco para estímulos distrativos poderia prejudicar a aprendizagem.

Nesse contexto, May e Elder (2008) defendem que promover a autorregulação de estudantes com relação ao uso multitarefa de mídias deve ser um esforço para aperfeiçoar o desempenho acadêmico. Além disso, se a manutenção da informação em curto prazo promove traços de memória e o hipocampo consolida e evoca memórias de forma dinâmica e flexível, como já apontado, misturar assuntos alheios aos conteúdos de interesse durante o estudar facilita a criação de falsas memórias e prejudica o acesso à informação no momento oportuno para o seu uso (Schacter, 2022), além de também poder eliciar sensação de familiaridade com elementos alheios aos tópicos de estudo. Felizmente, alguns países europeus já iniciaram movimentos no sentido de proibir o uso de *smartphones* em salas de aula (Carroll, 2023; Iolov, 2023; Armstrong, 2023). Nesse sentido, Jordan Watson faz um excelente ponto em argumentar que antigamente videogames, jogos, livros de pintura e álbum de fotos não eram atividades permitidas dentro da sala de aula (How to DAD, 2023), que são apenas alguns exemplos de distrações presentes nos telefones modernos, permitidos em sala apenas porque se tornaram um elemento essencial das nossas vidas (Barros, Oliveira, Maia, Fernandes, & Almodin, 2021). Ainda que esses computadores de bolso atuais tenham provocado vantagens no acesso instantâneo à informação, seu uso não pode ser dissociado de estratégias de autorregulação.

Emoções

Emoções são estados ou processos psicológicos que funcionam no gerenciamento de objetivos (Oatley, 1999). São eliciadas por estímulos internos ou externos, provocam em consequência respostas fisiológicas, cognitivas e comportamentais e interferem com o processo de consolidação de memórias. Nesse sentido, Immordino-Yang e Damasio (2007) são enfáticos em defender que as emoções não podem ser descartadas no processo de aprendizagem. Para testar a hipótese de associação entre recompensa e maior eficácia de consolidação de memórias, Gruber et al. (2016) criaram um paradigma no qual os sujeitos deveriam memorizar objetos neutros em dois contextos distintos: uma de baixa recompensa e outra de alta recompensa, além de monitorarem os participantes por meio de imageamento funcional por ressonância magnética (fMRI), que permite inferir as regiões atividades durante cada tentativa do paradigma. As regiões neurais de interesse eram o hipocampo e o complexo substância negra/área tegmentar ventral (SN/VTA) do mesencéfalo, uma região com alta concentração de neurônios produtores de dopamina, um neurotransmissor associado à sinalização da recompensa e do prazer. Os resultados mostraram maior atividade do hipocampo nas tentativas com resposta correta ao teste de memória, em relação às incorretas, como esperado, e diferenças no padrão de atividade do hipocampo nas tentativas com contexto de alta recompensa. Além disso, a fMRI mostrou maior conectividade funcional entre SN/VTA e hipocampo nas tentativas com alta recompensa, além de maior atividade do hipocampo após estas tentativas. Em conjunto, estes resultados sugerem que a atividade neural após a estimulação que leva ao aprendizado prioriza os eventos que estão associados a alguma recompensa, favorecendo a consolidação destes eventos.

Uma evidência anedótica em favor da associação entre emoções e memórias é o fato de nos lembrarmos muito mais de eventos positivos ou negativos da vida, em relação àqueles corriqueiros, como o almoço comum do dia a dia ou o próprio conteúdo das aulas diárias da educação formal. O trabalho de Gruber et al. (2016) pode ser usado para explicar justamente esses eventos, extrapolado o raciocínio para eventos negativos, mas com envolvimento da amígdala (Kim, Lee, Han, & Packard, 2001; Morel et al., 2022) e contribuição adicional dos níveis de cortisol (Schilling et al., 2013). No contexto escolar, professores sabem disso por amostragem! É comum testemunhar estudantes argumentando que uma determinada prova associa-se a intenso sofrimento. E aqui pode surgir um raciocínio equivocado: se estudar para a prova é aversivo e, portanto, carregado de emoções, o conteúdo não deveria ser lembrado por muito tempo? Não! Porque as associações entre estímulo emocional e memórias tendem a ser específicas: o objeto associado às emoções é a prova, mas não o conteúdo da prova. E, portanto, é a prova que é lembrada, mas não o conteúdo estudado.

A memorização diferencial de eventos recompensadores ou aversivos oferece vantagens claras para sobrevivência: ambos desempenham papéis fundamentais em garantir melhor adaptação ao ambiente. Schultz (2016) defende que as recompensas possuem três funções: (1) atuar como reforço positivo para induzir a aprendizagem; (2) produzir comportamentos direcionado a objetivos e promover escolhas econômicas – portanto, interferindo com a tomada de decisão; e (3) provocar sensações subjetivas de prazer e desejo. Para tanto, os circuitos dopaminérgicos respondem de forma fásica em dois momentos subsequentes: primeiro na detecção de estímulos gerais, isto é, associados a recompensas, expectativa de recompensa, não recompensadores e até aversivos e, num segundo momento, de forma mais intensa somente na presença de recompensa ou expectativa de recompensa (Schultz, 2016). Em

essência, os circuitos dopaminérgicos funcionam como um sistema de predição de erros em relação à expectativa de recompensa (Schultz, Dayan, & Montague, 1997). Dessa forma, o sistema responde fasicamente a recompensas não-previstas e à expectativa da recompensa (i.e., a pistas de um evento recompensador iminente), mas não a recompensas que aparecem no momento e intensidade esperados. Além disso, o sistema reduz seu nível de atividade para sinalizar ausência de recompensa no momento esperado em função de aprendizado anterior, literalmente funcionando como um correlato neurobiológico da frustração. Baseado em toda essa especificidade, Schultz (2010) defende que o sistema dopaminérgico opera com velocidade e precisão, promovendo processamento e resposta eficientes a informações relacionadas com recompensas.

Por outro lado, mesmo em situações altamente recompensadoras, a dopamina não é o único determinante do comportamento, mas o córtex pré-frontal também tem circuitos que atuam na tomada de decisão. Em especial, a região orbitofrontal (OFC) participa na codificação da recompensa e interfere com a tomada de decisão, atuando de forma inibitória (Fuster, 2017) e promovendo importante controle de impulsos (Damasio, Grabowski, Frank, Galaburda, & Damasio, 1994). Uma atuação fundamental nesse processo é garantir a escolha da melhor recompensa. Mischel e Ebbensen (1970) realizaram um elegante experimento para avaliar a capacidade de crianças entre 3 e 5 anos inibirem o acesso imediato a uma recompensa para receber, com atraso, uma recompensa igual ou melhor. Os resultados mostraram que as crianças são mais capazes de esperar quando a recompensa com atraso esperada é melhor, embora nem todas esperem. Esse dado, inclusive, alimentou um seguimento com as mesmas crianças 40 anos depois. Casey et al. (2011) testaram os mesmos sujeitos do trabalho de Mischel e Ebbensen (1970) por meio de fMRI e dividiram os participantes em função da capacidade de atraso por uma recompensa em: grandes retardadores e pequenos retardadores. Os resultados mostraram que os participantes com alta capacidade de espera possuem maior atividade no giro frontal inferior, parte do córtex orbitofrontal, inibindo a recompensa imediata. Já os participantes com menor capacidade de atraso, mostraram maior atividade no estriado ventral, a região alvo da dopamina produzida no sistema SN/VTA. Em essência, o córtex orbitofrontal, além do DLPFC já citado, é parte de um conjunto de estruturas responsáveis pelas funções executivas, i.e., o planejamento e a tomada de decisões com relação à informação em curso (Friedman & Miyake, 2017).

Leary e Cottrell (1999) oferecem uma interessante perspectiva de como as recompensas com atraso podem ser um problema. Em termos evolutivos, o sistema nervoso teria se adaptado a um ambiente que oferece recompensas imediatas e que teria permanecido relativamente inalterado por centenas de milhares de anos. Os últimos milênios e, em especial, a civilização moderna teriam alterado de forma brutal o ambiente de um sistema de recompensas imediatas para recompensas em atraso. Leary e Cottrell (1999) defendem que essa mudança pode ser responsável, em grande parte, pelos altos níveis de ansiedade verificáveis na população moderna. Dado o funcionamento dos circuitos dopaminérgicos, isso poderia ainda ser amenizado ou potencializado pela expectativa de recompensa feita por cada indivíduo, sem esquecer que o não atendimento de expectativas provoca outro sentimento negativo, a frustração. No contexto da educação, o *timing* na aplicação de recompensas precisa ser corretamente ajustado em função do nível educacional e da competência individual de recursos executivos para evitar problemas como a elevação demasiada dos níveis de ansiedade, a extinção do comportamento – por

recompensas que nunca chegam – e a frustração. Mas a tarefa individual do estudante é gerenciar as próprias expectativas para o bom andamento do plano de estudos traçado que, se bem encadeado, deve funcionar inclusive como uma fonte de motivação.

Nesse sentido, é importante ressaltar que esses processos não devem atuar somente em associação a comportamentos explícitos. Hesslow (2002) defende que a interferência emocional deve reforçar ou punir não só os produtos do comportamento, mas até mesmo as ações em planejamento, essencialmente direcionando o comportamento futuro. Esse tipo de interferência deve ser determinante para aspectos que mobilizam o comportamento, isto é, para a motivação. É igualmente importante considerar que o processamento emocional é altamente automatizado e não-solicitado (Ekman & Cordaro, 2011). Dessa forma, é impossível amparar ativamente processos de ensino como a educação formal no surgimento de emoções, mas é igualmente claro que a aprendizagem será mais eficiente num ambiente seguro e agradável, que evoque emoções positivas. Nesse sentido, é importante notar que até mesmo a expressão de alegria no rosto é processada como recompensadora em humanos (Hare, Tottenham, Davidson, Glover, & Casey, 2005), um dado que não deve surpreender, uma vez que somos uma espécie altamente social (Adolphs, 2003; Maliske, & Kanske, 2022). Em última instância, parece importante que cada estudante possa encontrar seus próprios reforçadores e a própria motivação, o que trará valiosas contribuições para menor sofrimento e ansiedade com o processo de estudar.

Achados das neurociências no contexto da educação

Apesar dos tópicos anteriores já terem antecipado implicações da memória, atenção e emoções para o contexto educacional, é possível encontrar evidências diretamente relacionadas à educação. Umejima, Ibaraki, Yamazaki, & Sakai (2021) testaram se realizar anotações de compromissos em um calendário em papel, num tablet ou num smartphone provocaria diferenças na evocação posterior dessas informações (após 60 min, com tarefa de interferência entre consolidação e evocação), ao mesmo tempo que registraram a atividade cerebral dos participantes (n=48) durante a tarefa. O *layout* do tablet foi organizado de forma a simular o uso em papel, com anotações realizadas por uma caneta digital, sem uso do teclado. Não houve limite de tempo para anotar as informações e a todos os participantes um tempo de 30 s foi permitido para revisar as anotações. Os autores reportam três resultados principais: (1) o processo de registro das informações foi menor para o grupo que utilizou papel, além de terem melhor acurácia nas respostas a perguntas diretas e simples sobre os compromissos; (2) ativações cerebrais semelhantes entre os grupos, e restritas ao hipocampo bilateralmente, precuneus, córtices visuais e regiões frontais dedicadas à linguagem, sugerindo que o processamento cerebral foi similar independente de meio utilizado, e apoiado por regiões necessárias à memória verbal para o processo de evocação; e, por fim, (3) estas ativações foram mais intensas para o grupo que usou papel. Em conjunto, estes resultados sugerem que o processamento cognitivo para o grupo papel foi mais profundo e promoveu um processo de consolidação de memórias mais efetivo, uma evidência já apontada anteriormente (Mueller & Oppenheimer, 2014). Uma das hipóteses feitas por Umejima et al. (2021) para o melhor resultado no uso do papel, é que ele promove maior número de pistas visuoespaciais, o que seria benéfico ao processo de consolidação das informações e evidência de que a aprendizagem é aprimorada por diferenças na qualidade do contato com a informação.

Os impactos para a memória não se limitam ao meio utilizado para leitura e escrita, no entanto. Ose Askvi, van der Weel e van der Meer (2020) trazem evidência intrigante do papel da escrita na consolidação de memórias. Os autores utilizaram eletroencefalografia (EEG) para investigar o padrão de atividade eletrofisiológico de crianças do ensino fundamental (idade média 11,83 anos) e jovens adultos (idade média 23,58 anos) durante (1) a escrita à mão, (2) a digitação, ou (3) o desenho à mão de palavras apresentadas como estímulos. Nos jovens adultos, os autores encontraram padrão de atividade semelhante, sincronizada no ritmo theta (4 a 8 Hz), nas regiões parietal e central do escalpo, tanto para a escrita à mão, quanto para o desenho, um padrão eletrofisiológico que pode ser associado à memória operacional e à codificação de novas informações. Para o desenho, no entanto, foi encontrado também dessincronização dos ritmos alfa (8 a 12 Hz) e beta (12 a 30 Hz), sugerindo que há diferenças processuais entre escrever à mão e desenhar. Para o grupo que transcreveu as palavras por digitação, foi verificado dessincronização no ritmo theta e, em menor grau, nos ritmos alfa e beta nas mesmas regiões, o que sugere pior processamento neural na codificação de informações. É importante ressaltar, no entanto, que a forma de digitação utilizada – somente com o dedo indicador direito e sem poder monitorar a palavra na tela – não foi uma forma natural de uso de teclado/computador, o que também pode ter provocado diferença nos resultados.

O mesmo padrão de atividade foi verificado em crianças, embora com diferenças no curso temporal dos ritmos analisados. Infelizmente, os autores não fizeram nenhuma avaliação comportamental – por exemplo, da taxa de memorização das palavras utilizadas – que permitisse avaliar se as diferenças eletrofisiológicas se correlacionam com alterações comportamentais. Mesmo assim, os autores advogam a manutenção da escrita na idade escolar, inclusive pela maior associação de componentes psicomotores exigidos pela escrita (coordenação motora fina, sincronização sensório-motora e feedback cinestésico) com relação ao simples pressionar botões relacionado ao uso do teclado. Apesar das limitações, os resultados deste trabalho apresentam evidência importante de diferenças entre escrita e digitação que podem ter impacto importante no aprendizado (Ose Askvi et al., 2020).

Nesse sentido, Mueller & Oppenheimer (2014) apresentam evidência importante da diferença de processamento entre fazer anotações com papel e caneta ou em computador. Os autores utilizaram palestras em vídeo apresentadas em sala de aula para alunos em duplas ou individualmente, que deveriam anotar o conteúdo apresentado em papel ou no computador. Três experimentos diferentes foram realizados para testar hipóteses das diferenças encontradas. Os resultados do primeiro experimento mostraram que os estudantes que utilizam computadores são mais literais ao conteúdo da palestra, isto é, transcrevem mais termos utilizados pelo palestrante e apresentam mais sobreposição de palavras utilizadas na aula nas anotações do conteúdo. Ao serem testados com relação à aquisição daquele conhecimento, no entanto, apresentam desempenho semelhante aos alunos que utilizaram papel para perguntas diretas, com assuntos factuais, mas pior desempenho para questões conceituais, em que relacionar conceitos era necessário para a resposta.

Este resultado levou os autores a repetirem o experimento, mas instruindo um novo grupo de estudantes em computador a não transcrever o conteúdo, mas a utilizarem as próprias palavras ao fazer as anotações (grupo laptop-intervenção). Os resultados deste experimento mostraram que, apesar do novo grupo ter resultados melhores do que o grupo sem intervenção, a instrução de não fazer

anotações literais ainda não foi suficiente para equiparar o grupo computador ao grupo que anotou em papel, provavelmente porque o grupo com intervenção ainda foi mais literal e anotou maior número de palavras em relação ao grupo que usou papel. Um terceiro experimento avaliou se estudar as anotações poderia minimizar as deficiências do grupo com uso de computadores. Os grupos foram subdivididos em dois grupos menores por método, um que poderia estudar as anotações por 10 min. antes de fazer o teste e, o outro, que responderia imediatamente ao término das palestras. Os resultados deste terceiro experimento ainda favorecem o desempenho do grupo em papel, que é significativamente melhor que o grupo computador na condição de estudo para questões factuais e conceituais.

Em conjunto, essas evidências sugerem que aspectos básicos associados ao estudo, como utilizar papel e caneta e, conseqüentemente, recrutar maior uso de funções executivas para processamento e síntese das informações antes da anotação, além de beneficiar-se de pistas espaciais para formar os traços de memória pode ter benefícios para posterior evocação das informações. Estes achados são coerentes com o processamento necessário ao arquivamento de informações, como será discutido a seguir.

IMPLICAÇÕES DAS NEUROCIÊNCIAS PARA O ESTUDAR

O fluxo de informações pelos circuitos cerebrais é organizado de regiões sensoperceptuais, organizadas por modalidade sensorial, para regiões as pré-frontais que gerenciam as funções executivas, o que inclui o planejamento e a tomada de decisão com relação a informações em curso, uma sequência de eventos chamada ciclo percepção-ação (Fuster, 2017). Nesse sentido, Fuster (2022) defende que a memória operacional é a ativação temporária de memória para sistemas perceptuais, executivos ou de recompensa no cumprimento de um objetivo. Em outras palavras, a ativação de recursos pré-frontais está associada com a consciência do presente momento e a organização temporal do comportamento (Hesslow, 2002; Kolb, 2007; Boly et al., 2011), uma dinâmica que é altamente influenciada pela saliência emocional do estímulo no ambiente (Gruber et al., 2016; Fuster, 2017). Por fim, a exposição repetida a informações específicas 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 da neurociência têm implicações diretas para a eficiência das técnicas de estudo avaliadas por Dunlosky et al. (2013).

Técnicas com eficácia baixa

Dunlosky et al. (2013) concluíram que as estratégias de estudo de grifar textos, fazer uma leitura simples, usar palavras-chave ou imagens mentais e até mesmo fazer resumos tem eficácia baixa para aprendizagem. É relevante notar que grifar textos foi a única estratégia que recebeu classificações negativas na avaliação feita pelos autores, tanto para os contextos educacionais quanto para o critério da tarefa, pois há evidências de que grifar textos provoca desempenho pior em estudantes que retomam os estudos nos textos grifados. Dunlosky et al. (2013) propõe que estes resultados podem estar relacionados a um efeito de isolamento provocado pelas frases e palavras grifadas, que serão mais lembradas do que outros conceitos no texto, que também podem ser essenciais à compreensão do conteúdo. No contexto

dos mecanismos de memórias, grifar textos provavelmente produz traços de memória sem conexões entre si, mais difíceis de serem associados para a resolução de questões que necessitam de inferência. Técnicas de usar palavras-chave ou imagens mentais provavelmente envolvem problemas semelhantes de fragmentação do conteúdo conhecido e os autores até ressaltam que é possível que os estudantes se lembrem das palavras-chave ou siglas desenvolvidas ao longo dos estudos, sem se lembrar do conceito ou memória que deveria ser evocado. Apesar da eficácia baixa, estas outras estratégias não chegam a ganhar classificações negativas, mas apenas inconclusivas ou mistas (qualificadas) com relação a sua validade para aprendizagem. Ainda, no contexto do trabalho de Brunec et al. (2020), o processo de evocação de memórias pelo hipocampo, que é flexível e generalizante, poderia provocar interferências entre assuntos não adequadamente relacionados durante o processo de consolidação.

Esse tipo de interferência também é possível com estratégias como a leitura ou releitura do texto. Uma única leitura do conteúdo, com uma alta carga de informações e conceitos para serem arquivados, está largamente sujeita ao esquecimento, especialmente se o processo de evocação for feito após período de sono (Tononi & Cirelli, 2014). É importante lembrar que muito do conhecimento sobre a curva de esquecimento envolve testes em laboratório com listas de sílabas sem sentido ou palavras, o que é um conteúdo menor e menos denso do que o conteúdo formal da educação, em qualquer área do conhecimento. Dessa forma, estimativas geradas por esses trabalhos ainda deveriam ser consideradas otimistas em relação à aquisição de conteúdo real e é possível que as melhores figuras de retenção efetiva de um dia para o outro sejam de 20% (Vivo et al., 2017), mas isso ainda precisa ser devidamente testado, como defendido por Radvansky et al. (2022).

É notável que a releitura de anotações de aula seja a estratégia mais utilizada por estudantes, que avaliam a estratégia como a mais efetiva de todas as estratégias relatadas (Blasiman, Dunlosky, & Rawson, 2017). Blasiman et al. (2017) concluem que os estudantes de graduação avaliados (268 estudantes de diferentes cursos e áreas de conhecimento) tem ótimas intenções de estudo, almejando estratégias com alta eficácia como fazer exercícios, mas falham ao deixar os estudos para a véspera das provas e, pior ainda, com base em estratégias menos eficientes. Uma hipótese interessante é testar se essas estratégias de estudo provocam mais à sensação de familiaridade ou o processo de evocação da informação, no contexto da memória de reconhecimento (Song, Jeneson, & Squire, 2011). Dada a baixa eficácia dessas técnicas, é mais provável verificar o envolvimento de processos de familiaridade em relação a processos de evocação.

Por fim, fazer resumos é uma estratégia utilizada por pouco menos de 50% dos estudantes (Blasiman et al., 2017), embora seja uma das estratégias mais investigadas (Dunlosky et al., 2013). Um dos principais motivos para resumos serem classificados como uma estratégia com eficácia baixa, no entanto, envolve a estratégia depender de habilidade específica para ser bem executada e, portanto, ter aplicabilidade baixa no contexto do ensino básico. Vale lembrar que a avaliação realizada por Dunlosky et al. (2013) considerou a generalização das técnicas em quatro categorias de variáveis, incluindo o contexto educacional. Portanto, a evidência empírica encontrada pelos autores subsidia a classificação proposta. Uma crítica adicional que merece ser feita é que muitos dos trabalhos experimentais citados pelos autores são das décadas de 80 e 90 do século 20 e, portanto, estão inseridos num contexto muito diferente do mundo digitalizado atual, com informação de fácil acesso na palma da mão, na tela de

smartphones (Barros et al., 2021; Schacter, 2022). Dessa forma, é necessário replicar alguns desses achados para compreender a eficácia atual de algumas dessas técnicas.

Vale lembrar que, enquanto uma habilidade, saber fazer um resumo adequado envolve memória implícita que só pode ser adequadamente adquirida por treino repetitivo (Corkin, 2002; Helene & Xavier, 2003; Liu et al., 2023), o que descarta o uso repentino dessa estratégia com sucesso, sem treinamento prévio. Além disso, a síntese mental necessária a essa tarefa depende de pleno desenvolvimento de funções executivas, que é mais tardio e acompanha a maturação do córtex pré-frontal e da substância branca subjacente, podendo chegar próximo aos 25 anos (Whitaker et al., 2016; Bethlehem et al., 2022). Dessa forma, Gunzenhauser & Nückles (2021) ressaltam a importância do treinamento e engajamento das funções executivas no processo de aprendizagem, pelo menos em crianças. Por outro lado, há evidências de que a memória operacional – componente das funções executivas (Friedman & Miyake, 2017) – seja dependente de recursos cognitivos gerais, como a inteligência fluída (Gathercole, Dunning, Holmes e Norris, 2016) e de que a rede executiva de atenção e a flexibilidade cognitiva sejam fatores de influência importantes para a inteligência fluída, tornando indiscutível que estes processos estejam todos inter-relacionados.

Nesse sentido, promover o desenvolvimento dessa habilidade durante todo o período de educação básica pode ser essencial para a competência de fazer resumos, que resulte em aprendizagem efetiva em contextos diversos da educação formal e até profissionais. Blasiman et al. (2017) mostram que muitos estudantes se apoiam em anotações próprias sobre o conteúdo como a principal estratégia de estudo. Fazer a leitura de última hora destas anotações, ou mesmo estudar por toda a madrugada e ir para as provas sem dormir, apoiando-se em circuitos equivalentes à memória de longo prazo precoce (Radvansky et al., 2022), traz aos estudantes senso de familiaridade com o conteúdo e sensação de que que já dominaram o assunto, reduzindo a carga de estudos. De fato, Blasiman et al. (2017) mostraram que a intenção de estudos nas semanas que antecedem as provas é duas vezes maior do que o estudo efetivamente realizado. Um fator adicional de relevância é a qualidade das anotações utilizadas pelos estudantes. Se essas leituras envolvem resumos elaborados com técnica incorreta, que não atinjam a essência do texto original, os problemas associados à estratégia de leitura única ou aspectos negativos semelhantes àqueles encontrados em textos grifados poderiam contribuir para a baixa eficácia dos resumos.

Uma nota anedótica, baseada na minha experiência como professor de graduação, é que muitos estudantes trazem a transcrição literal do texto presente em *slides* de aula, por meio de recursos de "copiar" e "colar", como um resumo construído. Essa estratégia é equivocada tanto pela ausência de processamento cognitivo adequado para construção do resumo, isto é, do envolvimento de raciocínio e associação de conceitos em circuitos executivos, quanto por dispensar uma parcela importante do conteúdo original, presente nos livros-texto e artigos apontados nos planos de aula. Se esse achado envolve parcela considerável dos estudantes, e o nível de eficácia obtido por esse tipo de estratégia, é uma questão que merece investigação. Infelizmente, a qualidade das notas e resumos construídos pelos estudantes é um dado não investigado por Blasiman et al. (2017).

Técnicas com eficácia moderada

As estratégias de estudo que envolvem a prática intercalada, interrogação elaborativa e auto explicação foram classificadas em eficácia moderada (Dunlosky et al., 2013). Um diferencial imediato dessas estratégias em relação às anteriores é que todas elas promovem maior envolvimento de recursos pré-frontais, para a síntese e associação dos conceitos apreendidos, seja diretamente (interrogação elaborativa e auto explicação) ou indiretamente, pela necessidade de organização temporal dos materiais ou assuntos em estudo (prática intercalada). As implicações desse esforço mental são claras no contexto do funcionamento de circuitos de atenção e memória: ele provoca a mobilização *top-down* da atenção para gerenciamento da informação (Sasin & Fougny, 2021), promove a ativação recorrente dos traços de memória sendo formados (Rasch, & Born, 2013, Fuster, 2022; Kwak & Curtis, 2022) e permite relacionar o conceito em estudo com experiências anteriores, o que resulta em associação mais significativa (Brunec et al., 2020), com maior chance de evocação, mas não simplesmente sensação de familiaridade.

Apesar disso, estas estratégias possuem limitações para a generalização em todas as categorias de avaliação. Primeiro, a interrogação elaborativa possui limitações com relação ao tamanho dos materiais a serem estudados, dificultando a aprendizagem de conteúdos mais longos ou muito complexos. Em segundo lugar, a estratégia é pouco aplicável a estudantes dos anos iniciais do ensino primário, que ainda não possuem maturidade cognitiva para a tarefa (Bethlehem et al., 2022), que são limitações parcialmente resolvidas pela técnica de auto explicação, isso porque a evidência existente não é clara com relação à dependência dessa estratégia no conhecimento prévio em como utilizá-la ou da durabilidade dos seus efeitos em longo prazo. A prática intercalada, por sua vez, promove alguns dos mesmos benefícios que as estratégias classificadas em eficácia alta, mas possui limitações para os estudantes ao misturar vários materiais distintos numa mesma sessão de estudos, possivelmente criando confusão entre os assuntos e falsas memórias, o que o torna bastante dependente de boas estratégias de autorregulação (Stanton, Sebesta, & Dunlosky, 2021). Recentemente, Foster, Mueller, Dunlosky e Finkenthal (2023) mostraram que estratégias de autorregulação podem ser eficazes para ganhos em aprendizagem, especialmente se a avaliação de previsão de desempenho não acontecer imediatamente após o estudo, mas após um período de atraso. Nesse contexto, o atraso provavelmente é importante para gerar esquecimento de parte dos traços de memória e, portanto, garantir previsão mais realista sobre a aprendizagem efetivamente conquistada.

Ainda é incerto, no entanto, se a prática intercalada pode ser generalizada para todo tipo de material e área do conhecimento. Foster, Mueller, Was, Rawson, & Dunlosky (2019) mostraram que a prática intercalada é efetiva para o ensino de matemática, especificamente no cálculo de volumes de quatro figuras geométricas, que foram a estratégia experimental investigada. Os autores compararam uma estratégia de ensino em bloco, em que quatro exercícios de uma determinada figura eram resolvidos antes da próxima forma geométrica, com duas formas de prática intercalada: um método padrão em que cada exercício trazia uma forma geometricamente a cada tentativa, sempre na mesma ordem, e um método “remoto”, no qual os cálculos de volume eram intercalados com problemas básicos de matemática, não relacionados à geometria, de forma a distribuir a prática de cálculo de volumes, o problema principal em questão. Interessantemente, os resultados mostram que tanto a prática intercalada padrão é mais efetiva do que a prática em bloco, quanto o método remoto é mais efetivo do que o método padrão, reforçando que a prática distribuída é estratégia com eficácia alta para aprendizagem (ver abaixo). Dessa forma, parece

importante expandir investigações futuras no sentido de compreender se a prática intercalada generaliza para outras áreas do conhecimento especialmente em conjunto com a prática distribuída.

Técnicas com eficácia alta

Como mencionado anteriormente, Foster et al. (2019) fizeram uma excelente demonstração de que a prática distribuída promove benefícios adicionais a outras estratégias, no caso da investigação dos autores, à prática intercalada. A prática distribuída e os testes práticos foram as únicas estratégias classificadas em eficácia alta por Dunlosky et al. (2013). Novamente, a compreensão sobre o funcionamento do córtex pré-frontal e do hipocampo torna a explicação fácil: essas técnicas não só promovem os mesmos benefícios executivos já descritos para as técnicas com eficácia moderada, como também promovem constantes novos acessos ao material de estudo, permitindo gradual aquisição dos conceitos, independente da complexidade, e correção dos traços de memória já formados a cada novo contato com o material, dado que toda evocação de informação promove novo processo de consolidação (Squire et al., 2015). Paralelamente, esses autores também relatam que a aquisição de informações incompatível com conhecimento prévio promove interferência e perturbação dos traços de memória anteriores. Uma solução para esses conflitos é justamente a consolidação gradual, ou espaçada em diversas aproximações, do conteúdo a ser estudado.

Parece importante também ressaltar que o processo de reflexão sobre a informação torna-se inevitável a partir desses constantes novos acessos à informação. Estudar novos conceitos promove acesso a conhecimento prévio, mesmo que básico, de forma que novos processos de consolidação provocam o fortalecimento e a integração em redes prévias de conhecimento (Rasch, & Born, 2013). Além disso, o resultado de trabalhos que evidenciam na prática a mudança de redes neurais em função de aprendizagem, se puderem ser diretamente extrapolados para humanos, sugerem que a eficácia de todo processo de aprendizagem ao longo de um dia é sempre baixa, cerca de 20% (De Vivo et al., 2017), sem controle específico sobre quais eventos e conhecimentos adquiridos no dia anterior serão os traços de memória efetivamente preservados. Nesse sentido, reativar novamente as redes neurais que se deseja preservar parece crucial para promover algum controle sobre as informações que serão preservadas na rede. Alterações em redes sinápticas por processos de aprendizagem já haviam sido mostradas anteriormente por Hayashi-Takagi et al. (2015), o entanto sem uma medida efetiva da proporção de mudança de um dia para o outro.

A prática distribuída e os testes práticos, uma vez que envolvam ao menos a resolução de diversos exercícios, proporcionam um benefício adicional aos circuitos de memória: a repetição necessária à aquisição de memória implícitas. Muito do que é parte de currículos escolares em diversos níveis de ensino englobam aprendizagem implícita. Exemplos óbvios são a motricidade necessária à escrita (Ose Askvik et al., 2020) e a sintaxe da linguagem (Ullman, 2004) na educação primária, as habilidades matemáticas diversas (Menon, 2016) no ensino secundário e habilidades motoras específicas (Corkin, 2002) da formação profissional na educação superior, por exemplo necessárias a procedimentos em saúde. Neil deGrasse Tyson resalta esse princípio ao enfatizar que o objetivo de parte do conteúdo escolar não é o aprendizado do conteúdo específico, mas sim das habilidades de resolução de problema associados com aquele treino (National Geographic, 2015). Dessa forma, é fundamental salientar que,

embora estratégias de última hora possam suportar traços de memória que garantam aprovação numa prova teórica, a aprendizagem implícita ocorre somente mediante a repetição e pode ser avaliada somente pela demonstração do desempenho (Squire, 2009), o que torna a avaliação de competências práticas fundamental para a verificação da aprendizagem de habilidades. Adicionalmente, o treinamento em contexto educacional que é significativamente diferente do contexto real prático, pode produzir dúvidas quanto à efetiva aquisição de competências no treinamento e da capacidade de desempenho (Roberts et al., 2021).

É bastante interessante que na investigação realizada por Blasiman et al. (2017), a resolução de testes práticos é a quarta estratégia mais pretendida pelos estudantes. No entanto, é a que menos foi efetivamente implementada, confirmando a conclusão dos autores de boas intenções e execução falha. Ao mesmo tempo, os resultados também confirmam a necessidade de levar as informações aqui presentes aos estudantes: em média, os testes práticos foram considerados apenas 50% eficientes, abaixo de estratégias menos eficazes como ler anotações, fazer grifos ou elaborar resumos, estratégias que tiveram a baixa eficácia devidamente esclarecida anteriormente, com base no funcionamento de circuitos de atenção e memória. As limitações anteriormente descritas são inexistentes nestas estratégias, seja com relação à idade dos estudantes, ao contexto educacional ou aos materiais envolvidos, pelo contrário, Dunlosky et al. (2013) ressaltam que elas não requerem muito tempo para aplicação – dado que o total de estudo em cada sessão poderá ser menor do que estudar todo o conteúdo na véspera da prova – e elas podem ser implementadas com mínimo treino aos estudantes, afinal são práticas usuais no contexto escolar formal, dentro de sala de aula. Dessa forma, ambas as técnicas são as únicas que se classificam como positivas em todas as categorias de avaliação.

Aprendizagem por meio do ensino e o método de aprendizagem Feynman

Apesar do excelente trabalho de revisão de Dunlosky et al. (2013), contemplar todas as técnicas seria uma tarefa impraticável, além dos critérios de inclusão estabelecidos. 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, dificultando a implementação bem-sucedida. Ainda assim, há relatos de sucesso na literatura com essa estratégia, tanto em contextos práticos (Fraga, Carvalho, Hirano, & Bollela, 2012; Veloso, Pereira, Vasconcelos, Senger, & de Faria, 2019; Sun, Maniatis, & Steinert, 2019), quanto teóricos (Hermida, Perez Santangelo, Calero, Goizueta, Espinosa, & Sigman, 2021; Kobayashi, 2023). Uma estratégia baseada na aprendizagem por meio do ensino encontrada na literatura cinzenta, mas não em trabalhos adequadamente sistematizados, é a técnica Feynman ou Método de Aprendizagem Feynman (MAF) (Wenyan, Tiandong, Sen, 2021; Feng, Chu, Zhu, Ji, Cui, & Huang, 2022). A técnica é mencionada inclusive por algumas universidades, como estratégias de apoio à aprendizagem (Cam, 2020; Woods, 2021).

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, onde foi duramente crítico com os métodos de ensino empregados e a ausência de raciocínio crítico (Moreira, 2018), o que deixa claro sua preocupação com o processo reflexivo ao aprender sobre qualquer tópico. Mais do que isso, Feynman uma vez mencionou ao discursar sobre o progresso da Ciência: “Tudo é interessante se você olha 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 invalidaria 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 sendo ensinados 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 et al., 2021; Feng et al., 2022):

1. *Determinar os objetivos de aprendizagem e adquirir conhecimento* – nesta 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 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. *Identifique 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 necessário, portanto mais eficiente. É importante notar que a terceira etapa pode exigir vários retornos ao início do processo (etapa 1), provocando repetição do processo de aprendizagem e 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 apreendidos. Nesta etapa, o uso de exemplos e analogias também pode auxiliar o processo de integração do novo conhecimento com conceitos prévios.

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 processo autorreflexivo com mobilização *top-down* de recursos de atenção e organização de ideias e possibilidades na memória operacional para 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, que mantém íntima relação com a memória operacional inclusive para resgate de eventos passados (Baddeley, 2010), isto é, do conhecimento episódico. Baddeley (2010) inclusive ressalta que, à 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 na consolidação de sistemas e aprendizagem efetiva. 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 e eliminando 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. Mas adicionalmente, o MAF envolve mais uso de recursos executivos tanto para auto-organização em relação aos objetivos de aprendizagem, quanto para organizar ideias e 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, dado que seu uso para mais de um assunto provavelmente provocará a interposição de períodos de sono para consolidação do conhecimento durante o período de estudo (Tononi & Cirelli, 2014).

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 visto e discutido no texto, 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 auto explicação, 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 auto explicação 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.

Em conjunto, estas evidências ressaltam a necessidade de mais pesquisas em estratégias de aprendizagem por meio do ensino e, especificamente, com o MAF. A combinação de processos de autorregulação, com engajamento das funções executivas e de repetição até domínio efeito provocados pelo MAF sugerem 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 o critério da tarefa necessários.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente artigo buscou esclarecer o motivo pelo qual estratégias comuns de estudo resultam em diferentes eficácias na aprendizagem, com base no conhecimento das neurociências consolidado neste início do século 21. Infelizmente, a evidência empírica também demonstra que as estratégias de menor eficácia são as mais utilizadas pelos estudantes. Os motivos para a escolha devem residir na persistência e disciplina necessárias ao estudo regular necessário às estratégias de alta eficácia.

Os mecanismos de atenção e do processo de consolidação da memória para aprendizagem duradoura são dependentes de envolvimento ativo com o tópico estudado e, em especial para conteúdos extensos, de exposição repetida aos conceitos almejados. Uma estratégia de estudo que envolva prática regular e persistente é a única solução para a consolidação de sistemas, um processo que pode levar anos para acontecer. A evidência encontrada nas neurociências é que não há outra forma de se aprender efetivamente, isto é, se o objetivo final for além de obter pontuação numa prova com conteúdo e horário específico. Os traços de memória formados na exposição inicial a um determinado conteúdo são efetivos para responder problemas de baixa complexidade, mas serão descartados após período de sono se não retomados ou úteis para outros fins. Por outro lado, a aprendizagem de habilidades psicomotoras – as memórias implícitas – que podem ser fundamentais para a prática profissional, depende de repetição e somente podem ser adquiridas pela exposição repetida.

A aprendizagem por meio do ensino e, em especial, o método de aprendizagem Feynman são estratégias ainda pouco exploradas de forma sistemática, que tem potencial para promover uso combinado de diversas estratégias comuns de estudo. Como resultado, devem elevar a eficácia do processo de aprendizagem em longo prazo, especialmente ao provocar, de forma inevitável, acessos persistentes ao conteúdo, mas com enfoque específico a cada momento, mudando não só o ponto de vista sobre um mesmo tópico, mas também reorganizando de forma eficiente a rede neural associada ao assunto que se procura conhecer. 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 desenvolvimento de uma rotina para o estudar.

REFERÊNCIAS

- Adolphs, R. (2003). Cognitive neuroscience of human social behaviour. *Nature reviews. Neuroscience*, 4(3), 165–178. <https://doi.org/10.1038/nrn1056>.
- Alam, M. J., Kitamura, T., Saitoh, Y., Ohkawa, N., Kondo, T., & Inokuchi, K. (2018). Adult Neurogenesis Conserves Hippocampal Memory Capacity. *The Journal of neuroscience: the official journal of the Society for Neuroscience*, 38(31), 6854–6863. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.2976-17.2018>.
- Ansari, D., & Coch, D. (2006). Bridges over troubled waters: education and cognitive neuroscience. *Trends in cognitive sciences*, 10(4), 146–151. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2006.02.007>.
- Armstrong, K. (2023, July 5). *Netherlands*: Phone ban announced to stop school disruptions. BBC News: Europe. <https://www.bbc.com/news/world-europe-66107027>.
- Baddeley, A. (2010). Working memory. *Current biology: CB*, 20(4), R136–R140. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2009.12.014>.
- Barros, V. F. S., Oliveira, R. A. S. G., Maia, R. B., Fernandes, N., & Almodin, E. M.. (2021). Effects of the excessive use of electronic screens on vision and emotional state. *Revista Brasileira De Oftalmologia*, 80(5), e0046. <https://doi.org/10.37039/1982.8551.20210046>.
- Bassett, D. S., & Sporns, O. (2017). Network neuroscience. *Nature neuroscience*, 20(3), 353–364. <https://doi.org/10.1038/nn.4502>.
- Bethlehem, R. A. I., Seidlitz, J., White, S. R., Vogel, J. W., Anderson, K. M., Adamson, C., Adler, S., Alexopoulos, G. S., Anagnostou, E., Arces-Gonzalez, A., Astle, D. E., Auyeung, B., Ayub, M., Bae, J., Ball, G., Baron-Cohen, S., Beare, R., Bedford, S. A., Benegal, V., Beyer, F., ... Alexander-Bloch, A. F. (2022). Brain charts for the human lifespan. *Nature*, 604(7906), 525–533. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-04554-y>.
- Blasiman, R. N., Dunlosky, J., & Rawson, K. A. (2017). The what, how much, and when of study strategies: comparing intended versus actual study behaviour. *Memory (Hove, England)*, 25(6), 784–792. <https://doi.org/10.1080/09658211.2016.1221974>.
- Bolognani, S. A. P., Gouveia, P. A. R., Brucki, S. M. D., & Bueno, O. F. A. (2000). Memória implícita e sua contribuição à reabilitação de um paciente amnésico: relato de caso. *Arquivos de Neuro-psiquiatria*, 58(3B), 924–930. <https://doi.org/10.1590/S0004-282X2000000500023>.
- Boly, M., Garrido, M. I., Gosseries, O., Bruno, M. A., Boveroux, P., Schnakers, C., Massimini, M., Litvak, V., Laureys, S., & Friston, K. (2011). Preserved feedforward but impaired top-down processes in the vegetative state. *Science (New York, N.Y.)*, 332(6031), 858–862. <https://doi.org/10.1126/science.1202043>.
- Bressler, S. L., & Menon, V. (2010). Large-scale brain networks in cognition: emerging methods and principles. *Trends in cognitive sciences*, 14(6), 277–290. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2010.04.004>.
- Brosnan, M. B., & Wiegand, I. (2017). 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*, 37(13), 3445–3446. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.0136-17.2017>.

- Brunec, I. K., Robin, J., Olsen, R. K., Moscovitch, M., & Barense, M. D. (2020). Integration and differentiation of hippocampal memory traces. *Neuroscience and biobehavioral reviews*, 118, 196–208. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2020.07.024>.
- Burgoyne, A. P., Hambrick, D. Z., & Altmann, E. M. (2019). Is working memory capacity a causal factor in fluid intelligence? *Psychonomic bulletin & review*, 26(4), 1333–1339. <https://doi.org/10.3758/s13423-019-01606-9>.
- Cabeza, R., Ciaramelli, E., Olson, I. R., & Moscovitch, M. (2008). The parietal cortex and episodic memory: an attentional account. *Nature reviews. Neuroscience*, 9(8), 613–625. <https://doi.org/10.1038/nrn2459>.
- Cam (2020, August 7). *The Feynman Technique*. University of Colorado Boulder. <https://www.colorado.edu/artsscience-advising/resource-library/life-skills/the-feynman-technique-in-academic-coaching>.
- Carey, B. (2008, December 4). *H. M., an Unforgettable Amnesiac, Dies at 82*. The New York Times. <https://www.nytimes.com/2008/12/05/us/05hm.html>.
- Carroll, R. (2023, June 3). *Much easier to say no*: Irish town unites in smartphone ban for young children. The Guardian. <https://www.theguardian.com/technology/2023/jun/03/much-easier-to-say-no-irish-town-unites-in-smartphone-ban-for-young-children>.
- Carter, J.A. and Kotzee, B. (2015) *Epistemology of Education*. Oxford Bibliographies. <https://doi.org/10.1093/OBO/9780195396577-0292>.
- Casey, B. J., Somerville, L. H., Gotlib, I. H., Ayduk, O., Franklin, N. T., Askren, M. K., Jonides, J., Berman, M. G., Wilson, N. L., Teslovich, T., Glover, G., Zayas, V., Mischel, W., & Shoda, Y. (2011). Behavioral and neural correlates of delay of gratification 40 years later. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 108(36), 14998–15003. <https://doi.org/10.1073/pnas.1108561108>.
- Chao, L. L., & Knight, R. T. (1995). Human prefrontal lesions increase distractibility to irrelevant sensory inputs. *Neuroreport*, 6(12), 1605–1610. <https://doi.org/10.1097/00001756-199508000-00005>.
- Corbetta, M., & Shulman, G. L. (2002). Control of goal-directed and stimulus-driven attention in the brain. *Nature reviews. Neuroscience*, 3(3), 201–215. <https://doi.org/10.1038/nrn755>.
- Corbetta, M., Patel, G., & Shulman, G. L. (2008). The reorienting system of the human brain: from environment to theory of mind. *Neuron*, 58(3), 306–324. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2008.04.017>.
- Corkin S. (2018). *Presente permanente: A história de Henry Molaison e de como o estudo de seu cérebro revolucionou a ciência*. Editora Record. (Trabalho original publicado em 2013).
- Corkin S. (2002). What's new with the amnesic patient H.M.?. *Nature reviews. Neuroscience*, 3(2), 153–160. <https://doi.org/10.1038/nrn726>.
- Cowan N. (2022). Working memory development: A 50-year assessment of research and underlying theories. *Cognition*, 224, 105075. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2022.105075>.

Damasio, H., Grabowski, T., Frank, R., Galaburda, A. M., & Damasio, A. R. (1994). The return of Phineas Gage: clues about the brain from the skull of a famous patient. *Science* (New York, N.Y.), 264(5162), 1102–1105. <https://doi.org/10.1126/science.8178168>.

De Vivo, L., Bellesi, M., Marshall, W., Bushong, E. A., Ellisman, M. H., Tononi, G., & Cirelli, C. (2017). Ultrastructural evidence for synaptic scaling across the wake/sleep cycle. *Science* (New York, N.Y.), 355(6324), 507–510. <https://doi.org/10.1126/science.aah5982>.

Dominiczak M. H. (2015). Individuality in science: Richard Feynman. *Clinical chemistry*, 61(6), 894–895. <https://doi.org/10.1373/clinchem.2014.233510>.

Dunlosky, J., Rawson, K. A., Marsh, E. J., Nathan, M. J., & Willingham, D. T. (2013). Improving Students' Learning With Effective Learning Techniques: Promising Directions From Cognitive and Educational Psychology. *Psychological science in the public interest*, 14(1), 4–58. <https://doi.org/10.1177/1529100612453266>.

Ekman, P., & Cordaro, D. (2011). What is Meant by Calling Emotions Basic. *Emotion Review*, 3(4), 364–370. <https://doi.org/10.1177/1754073911410740>.

Elston, G. N. (2007). Specialization of the neocortical pyramidal cell during primate evolution. In J. H. Kaas (Ed.) *Evolution of Nervous Systems*. Amsterdam, Netherlands: Elsevier. v. 4 pp. 191-242. <https://doi.org/10.1016/B0-12-370878-8/00164-6>.

Fan, J., McCandliss, B. D., Sommer, T., Raz, A., & Posner, M. I. (2002). Testing the efficiency and independence of attentional networks. *Journal of cognitive neuroscience*, 14(3), 340–347. <https://doi.org/10.1162/089892902317361886>.

Fan, J., Gu, X., Guise, K. G., Liu, X., Fossella, J., Wang, H., & Posner, M. I. (2009). Testing the behavioral interaction and integration of attentional networks. *Brain and cognition*, 70(2), 209–220. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2009.02.002>.

Feng, Z., Chu, C., Zhu, D., Ji, N., Cui, J., & Huang, Z. (2022). Investigation of intervention methods based on different leading roles in family regarding child road safety education: An experimental study. *Accident; analysis and prevention*, 178, 106874. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2022.106874>.

Foster, N. L., Mueller, M. L., Dunlosky, J., & Finkenthal, L. (2023). What is the impact of interleaving practice and delaying judgments on the accuracy of category-learning judgments? *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 29(2), 374–385. <https://doi.org/10.1037/xap0000444>.

Foster, N. L., Mueller, M. L., Was, C., Rawson, K. A., & Dunlosky, J. (2019). Why does interleaving improve math learning? The contributions of discriminative contrast and distributed practice. *Memory & cognition*, 47(6), 1088–1101. <https://doi.org/10.3758/s13421-019-00918-4>.

Fraga, G. P., Carvalho, R. B., Hirano, E. S., & Bollela, V. R. (2012). Basic life support: medical students learning by teaching. *Medical education*, 46(11), 1105. <https://doi.org/10.1111/medu.12026>.

Freeman, S., Eddy, S. L., McDonough, M., Smith, M. K., Okoroafor, N., Jordt, H., & Wenderoth, M. P. (2014). Active learning increases student performance in science, engineering, and mathematics. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111(23), 8410–8415. <https://doi.org/10.1073/pnas.1319030111>.

- Friedman, N. P., & Miyake, A. (2017). Unity and diversity of executive functions: Individual differences as a window on cognitive structure. *Cortex*, 86, 186–204. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2016.04.023>.
- Fuster, J. M. (2017). Prefrontal Cortex in Decision-Making: The Perception–Action Cycle. In: J. C. Dreher & L. Trambly (Eds.) *Decision Neuroscience: an integrative approach*. Cambridge: Academic Press. pp. 95-105. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-805308-9.00008-7>.
- Fuster J. M. (2022). Cognitive Networks (Cognits) Process and Maintain Working Memory. *Frontiers in neural circuits*, 15, 790691. <https://doi.org/10.3389/fncir.2021.790691>.
- Ganda, D. R. & Boruchovitch, E. (2018). A autorregulação da aprendizagem: principais conceitos e modelos teóricos. *Psic. da Ed.*, 46: 71-80. <https://doi.org/10.5935/2175-3520.20180008>.
- Gathercole, S. E., Dunning, D. L., Holmes, J., & Norris, D. (2016). Working memory training involves learning new skills. *Journal of memory and language*, 105, 19–42. <https://doi.org/10.1016/j.jml.2018.10.003>.
- Gruber, M. J., Ritchey, M., Wang, S. F., Doss, M. K., & Ranganath, C. (2016). Post-learning Hippocampal Dynamics Promote Preferential Retention of Rewarding Events. *Neuron*, 89(5), 1110–1120. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2016.01.017>.
- Gunzenhauser, C., & Nückles, M. (2021). Training Executive Functions to Improve Academic Achievement: Tackling Avenues to Far Transfer. *Frontiers in psychology*, 12, 624008. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2021.624008>.
- Hare, T. A., Tottenham, N., Davidson, M. C., Glover, G. H., & Casey, B. J. (2005). Contributions of amygdala and striatal activity in emotion regulation. *Biological psychiatry*, 57(6), 624–632. <https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2004.12.038>.
- Hayashi-Takagi, A., Yagishita, S., Nakamura, M., Shirai, F., Wu, Y. I., Loshbaugh, A. L., Kuhlman, B., Hahn, K. M., & Kasai, H. (2015). Labelling and optical erasure of synaptic memory traces in the motor cortex. *Nature*, 525(7569), 333–338. <https://doi.org/10.1038/nature15257>.
- Hebb, D. O. (1949). *The organization of behavior: a neuropsychological theory*. Wiley.
- Helene, A. F., & Xavier, G. F. (2003). A construção da atenção a partir da memória. *Brazilian Journal of Psychiatry*, 25, 12–20. <https://doi.org/10.1590/S1516-44462003000600004>.
- Hermida, M. J., Perez Santangelo, A., Calero, C. I., Goizueta, C., Espinosa, M., & Sigman, M. (2021). Learning-by-Teaching Approach Improves Dengue Knowledge in Children and Parents. *The American journal of tropical medicine and hygiene*, 105(6), 1536–1543. <https://doi.org/10.4269/ajtmh.21-0253>.
- Hesslow G. (2002). Conscious thought as simulation of behaviour and perception. *Trends in cognitive sciences*, 6(6), 242–247. [https://doi.org/10.1016/s1364-6613\(02\)01913-7](https://doi.org/10.1016/s1364-6613(02)01913-7).
- How to DAD. (2023, June 19) *Ban cellphones in schools*. [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=zPg9eoS0woM>.

Immordino-Yang, M.H. and Damasio, A. (2007), We Feel, Therefore We Learn: The Relevance of Affective and Social Neuroscience to Education. *Mind, Brain, and Education*, 1: 3-10. <https://doi.org/10.1111/j.1751-228X.2007.00004.x>.

Iolov, T. V. (2023, June 27) *Will Finland ban smartphones in schools?* TheMayor.EU – the European Portal for Cities and Citizens. <https://www.themayor.eu/en/a/view/will-finland-ban-smartphones-in-schools-11930>.

James, W. (1931). *The principles of psychology*, Vol. 1. Henry Holt and Co. <https://doi.org/10.1037/10538-000>. Trabalho original publicado em 1890.

Johnson, M. S. & Stearns, P. N. (2022). *Education in World History*. Routledge.

Kersten H. W. (1997). The enhancement of learning by teaching. *European journal of dental education: official journal of the Association for Dental Education in Europe*, 1(4), 149–152.

Kim, J. J., Lee, H. J., Han, J. S., & Packard, M. G. (2001). Amygdala is critical for stress-induced modulation of hippocampal long-term potentiation and learning. *The Journal of neuroscience: the official journal of the Society for Neuroscience*, 21(14), 5222–5228. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.21-14-05222.2001>.

Kim, R., & Sejnowski T.J. (2021). Strong inhibitory signaling underlies stable temporal dynamics and working memory in spiking neural networks. *Nat Neurosci* 24, 129–139. <https://doi.org/10.1038/s41593-020-00753-w>.

Kobayashi, K. (2023). Learning by creating teaching materials: Conceptual problems and potential solutions. *Frontiers in psychology*, 14, 1095285. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2023.1095285>.

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

Kristensen, C. H., Almeida, R. M. M., & Gomes, W. B.. (2001). Desenvolvimento Histórico e Fundamentos Metodológicos da Neuropsicologia Cognitiva. *Psicologia: Reflexão e Crítica*, 14(2), 259–274. <https://doi.org/10.1590/S0102-79722001000200002>.

Kuhn, J., Mamede, S., van den Berg, P., Zwaan, L., van Peet, P., Bindels, P., & van Gog, T. (2023). Learning deliberate reflection in medical diagnosis: does learning-by-teaching help?. *Advances in health sciences education : theory and practice*, 28(1), 13–26. <https://doi.org/10.1007/s10459-022-10138-2>.

Kwak, Y., & Curtis, C. E. (2022). Unveiling the abstract format of mnemonic representations. *Neuron*, 110(11), 1822–1828.e5. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2022.03.016>.

Laurence, J. (2003). On being a Kunkel acolyte. *Lupus*, 12(3), 207–208. <https://doi.org/10.1191/0961203303lu358xx>.

Leary, M. R. & Cottrell, C. A. (1999). Evolution of the Self, the Need to Belong, and Life in a Delayed-Return Environment. *Psychological Inquiry*, 10(3): 229-232. <https://www.jstor.org/stable/1449314>.

- Liu, H., Forest, T. A., Duncan, K., & Finn, A. S. (2023). What sticks after statistical learning: The persistence of implicit versus explicit memory traces. *Cognition*, 236, 105439. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2023.105439>.
- Lomo T. (2003). The discovery of long-term potentiation. *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences*, 358(1432), 617–620. <https://doi.org/10.1098/rstb.2002.1226>.
- Loomba, S., Strachle, J., Gangadharan, V., Heike, N., Khalifa, A., Motta, A., Ju, N., Sievers, M., Gempt, J., Meyer, H. S., & Helmstaedter, M. (2022). Connectomic comparison of mouse and human cortex. *Science (New York, N.Y.)*, 377(6602), eabo0924. <https://doi.org/10.1126/science.abo0924>.
- Luria, A.R. (1981) *Fundamentos de Neuropsicologia*. Editora USP. Trabalho original publicado em 1973.
- Markant, D.B., Ruggeri, A., Gureckis, T.M., & Xu, F. (2016), Enhanced Memory as a Common Effect of Active Learning. *Mind, Brain, and Education*, 10: 142-152. <https://doi.org/10.1111/mbe.12117>.
- Maliske, L., & Kanske, P. (2022). The Social Connectome - Moving Toward Complexity in the Study of Brain Networks and Their Interactions in Social Cognitive and Affective Neuroscience. *Frontiers in psychiatry*, 13, 845492. <https://doi.org/10.3389/fpsyt.2022.845492>.
- May, K.E., Elder, A.D. (2018). Efficient, helpful, or distracting? A literature review of media multitasking in relation to academic performance. *Int J Educ Technol High Educ* 15, 13. <https://doi.org/10.1186/s41239-018-0096-z>.
- Menon, V. (2016). A neurodevelopmental perspective on the role of memory systems in children’s math learning. In *Development of Mathematical Cognition* (pp. 79-107). Academic Press.
- Menon V. (2023). 20 years of the default mode network: A review and synthesis. *Neuron*, S0896-6273(23)00308-2. Advance online publication. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2023.04.023>.
- Minagar, A., Ragheb, J., & Kelley, R. E. (2003). The Edwin Smith surgical papyrus: description and analysis of the earliest case of aphasia. *Journal of medical biography*, 11(2), 114–117. <https://doi.org/10.1177/096777200301100214>.
- Mischel, W., & Ebbesen, E. B. (1970). Attention in delay of gratification. *Journal of Personality and Social Psychology*, 16(2), 329–337. <https://doi.org/10.1037/h0029815>.
- Moreira, I. C. (2018). Feynman e suas conferências sobre o ensino de física no Brasil. *Rev. Bras. Ensino Fís.* 40 (4). <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2017-0374>.
- Morel, C., Montgomery, S. E., Li, L., Durand-de Cuttoli, R., Teichman, E. M., Juarez, B., Tzavaras, N., Ku, S. M., Flanigan, M. E., Cai, M., Walsh, J. J., Russo, S. J., Nestler, E. J., Calipari, E. S., Friedman, A. K., & Han, M. H. (2022). Midbrain projection to the basolateral amygdala encodes anxiety-like but not depression-like behaviors. *Nature communications*, 13(1), 1532. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-29155-1>.
- Mueller, P. A., & Oppenheimer, D. M. (2014). The pen is mightier than the keyboard: advantages of longhand over laptop note taking. *Psychological science*, 25(6), 1159–1168. <https://doi.org/10.1177/0956797614524581>.

- Nachonicz, L. A.. (2002). A epistemologia da educação. *Educar Em Revista*, (19), 53–72. <https://doi.org/10.1590/0104-4060.246>.
- National Geographic. (2015, October 27). *Debunking the 'Pointless' Education Myth | StarTalk*. [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=utedyJ7QRBs>.
- Oatley, K. (1999). Emotions. In Wilson R. A., & Keil F. C. *The MIT encyclopedia of the cognitive sciences*. 1^a ed. Cambridge, MA. pp. 273-275. The MIT Press.
- Ochoa, G. & Corey, M. (1995) *The timeline book of science*. New York: The Stonesong Press, Inc. 434p.
- Ophir, E., Nass, C., & Wagner, A. D. (2009). Cognitive control in media multitaskers. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 106(37), 15583–15587. <https://doi.org/10.1073/pnas.0903620106>.
- Ose Askvik, E., van der Weel, F. R. R., & van der Meer, A. L. H. (2020). The Importance of Cursive Handwriting Over Typewriting for Learning in the Classroom: A High-Density EEG Study of 12-Year-Old Children and Young Adults. *Frontiers in psychology*, 11, 1810. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2020.01810>.
- Popper, K. (2002) *The Logic of Scientific Discovery* (Routledge Classics). Londres: Routledge. 513 p. Trabalho original publicado em 1959.
- Posner, M. I., Rothbart, M. K., & Ghassemzadeh, H. (2019). Restoring Attention Networks. *The Yale journal of biology and medicine*, 92(1), 139–143. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6430178/>.
- Radvansky, G. A., Doolen, A. C., Pettijohn, K. A., & Ritchey, M. (2022). A new look at memory retention and forgetting. *Journal of experimental psychology. Learning, memory, and cognition*, 48(11), 1698–1723. <https://doi.org/10.1037/xlm0001110>.
- Raichle, M. E., MacLeod, A. M., Snyder, A. Z., Powers, W. J., Gusnard, D. A., & Shulman, G. L. (2001). A default mode of brain function. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 98(2), 676–682. <https://doi.org/10.1073/pnas.98.2.676>.
- Raichle M. E. (2015). The brain's default mode network. *Annual review of neuroscience*, 38, 433–447. <https://doi.org/10.1146/annurev-neuro-071013-014030>.
- Ranney, M., & Shimoda, T. (1999). Education. In Wilson R. A., & Keil F. C. *The MIT encyclopedia of the cognitive sciences*. 1^a ed. Cambridge, MA. pp. 261-262. The MIT Press.
- Rasch, B., & Born, J. (2013). About sleep's role in memory. *Physiological reviews*, 93(2), 681–766. <https://doi.org/10.1152/physrev.00032.2012>.
- Reisberg, D. (1999). Learning. In Wilson R. A., & Keil F. C. *The MIT encyclopedia of the cognitive sciences*. 1^a ed. Cambridge, MA. pp. 460-461. The MIT Press.
- Richerson, P. J. & Boyd, R. (2005). *Not by Genes Alone: How Culture Transformed Human Evolution*. University of Chicago Press.

Roberts, P., Cosgrave, C., Gillespie, J., Malatzky, C., Hyde, S., Hu, W. C., Bailey, J., Yassine, T., & Downes, N. (2021). 'Re-placing' professional practice. *The Australian journal of rural health*, 29(2), 301–305. <https://doi.org/10.1111/ajr.12717>.

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

Schacter D. L. (2022). Media, Technology, and the Sins of Memory. *Memory, mind & media*, 1, e1. <https://doi.org/10.1017/mem.2021.3>.

Schilling, T. M., Kölsch, M., Larra, M. F., Zech, C. M., Blumenthal, T. D., Frings, C., & Schächinger, H. (2013). For whom the bell (curve) tolls: cortisol rapidly affects memory retrieval by an inverted U-shaped dose-response relationship. *Psychoneuroendocrinology*, 38(9), 1565–1572. <https://doi.org/10.1016/j.psyneuen.2013.01.001>.

Scoville, W. B. (1954). The limbic lobe in man. *Journal of neurosurgery*, 11(1), 64–66. <https://doi.org/10.3171/jns.1954.11.1.0064>.

Scoville, W. B., & Milner, B. (1957). Loss of recent memory after bilateral hippocampal lesions. *Journal of neurology, neurosurgery, and psychiatry*, 20(1), 11–21. <https://doi.org/10.1136/jnnp.20.1.11>.

Schultz, W., Dayan, P., & Montague, P. R. (1997). A neural substrate of prediction and reward. *Science* (New York, N.Y.), 275(5306), 1593–1599. <https://doi.org/10.1126/science.275.5306.1593>.

Schultz W. (2016). Dopamine reward prediction-error signalling: a two-component response. *Nature reviews. Neuroscience*, 17(3), 183–195. <https://doi.org/10.1038/nrn.2015.26>.

Seeley, W. W., Menon, V., Schatzberg, A. F., Keller, J., Glover, G. H., Kenna, H., Reiss, A. L., & Greicius, M. D. (2007). Dissociable intrinsic connectivity networks for salience processing and executive control. *The Journal of neuroscience: the official journal of the Society for Neuroscience*, 27(9), 2349–2356. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.5587-06.2007>.

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

Song, Z., Jeneson, A., & Squire, L. R. (2011). Medial temporal lobe function and recognition memory: a novel approach to separating the contribution of recollection and familiarity. *The Journal of neuroscience: the official journal of the Society for Neuroscience*, 31(44), 16026–16032. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.3012-11.2011>.

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

Squire, L. R., Genzel, L., Wixted, J. T., & Morris, R. G. (2015). Memory consolidation. *Cold Spring Harbor perspectives in biology*, 7(8), a021766. <https://doi.org/10.1101/cshperspect.a021766>.

Sun, N. Z., Maniatis, T., & Steinert, Y. (2019). Learning by teaching: benefits for frontline clinician-teachers. *Medical education*, 53(11), 1154–1155. <https://doi.org/10.1111/medu.13977>.

Nobel Prize Outreach AB (2023, Jul 6). *The Nobel Prize in Physics 1965*. NobelPrize.org. <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1965/summary/>.

Tononi, G., & Cirelli, C. (2014). Sleep and the price of plasticity: from synaptic and cellular homeostasis to memory consolidation and integration. *Neuron*, 81(1), 12–34. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2013.12.025>.

Ullman M. T. (2004). Contributions of memory circuits to language: the declarative/procedural model. *Cognition*, 92(1-2), 231–270. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2003.10.008>.

Umejima, K., Ibaraki, T., Yamazaki, T., & Sakai, K. L. (2021). Paper Notebooks vs. Mobile Devices: Brain Activation Differences During Memory Retrieval. *Frontiers in behavioral neuroscience*, 15, 634158. <https://doi.org/10.3389/fnbeh.2021.634158>.

Veloso, S. G., Pereira, G. S., Vasconcelos, N. N., Senger, M. H., & de Faria, R. M. D. (2019). Learning by teaching basic life support: a non-randomized controlled trial with medical students. *BMC medical education*, 19(1), 67. <https://doi.org/10.1186/s12909-019-1500-7>.

Wenyan, X., Tiandong, D., Sen, Y., 2021. *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), 561. <https://doi.org/10.2991/assehr.k.210617.156>.

Whitaker, K. J., Vértes, P. E., Romero-García, R., Váša, F., Moutoussis, M., Prabhu, G., Weiskopf, N., Callaghan, M. F., Wagstyl, K., Rittman, T., Tait, R., Ooi, C., Suckling, J., Inkster, B., Fonagy, P., Dolan, R. J., Jones, P. B., Goodyer, I. M., NSPN Consortium, & Bullmore, E. T. (2016). Adolescence is associated with genomically patterned consolidation of the hubs of the human brain connectome. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 113(32), 9105–9110. <https://doi.org/10.1073/pnas.1601745113>.

Whitehead, H. (2009). *Culture in Whales and Dolphins*. Encyclopedia of Marine Mammals, 292–294. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-373553-9.00068-7>.

Woods, R. (2021, March 5). *Note Taking in Class*. Law Library, University of Hawai‘i at Mānoa. <https://law-hawaii.libguides.com/notetaking/feynman>.

DECLARAÇÃO DE CONFLITO DE INTERESSE

O autor declara que não há conflito de interesse com o presente artigo.

This preprint was submitted under the following conditions:

- The authors declare that they are aware that they are solely responsible for the content of the preprint and that the deposit in SciELO Preprints does not mean any commitment on the part of SciELO, except its preservation and dissemination.
- The authors declare that the necessary Terms of Free and Informed Consent of participants or patients in the research were obtained and are described in the manuscript, when applicable.
- The authors declare that the preparation of the manuscript followed the ethical norms of scientific communication.
- The authors declare that the data, applications, and other content underlying the manuscript are referenced.
- The deposited manuscript is in PDF format.
- The authors declare that the research that originated the manuscript followed good ethical practices and that the necessary approvals from research ethics committees, when applicable, are described in the manuscript.
- The authors declare that once a manuscript is posted on the SciELO Preprints server, it can only be taken down on request to the SciELO Preprints server Editorial Secretariat, who will post a retraction notice in its place.
- The authors agree that the approved manuscript will be made available under a [Creative Commons CC-BY](#) license.
- The submitting author declares that the contributions of all authors and conflict of interest statement are included explicitly and in specific sections of the manuscript.
- The authors declare that the manuscript was not deposited and/or previously made available on another preprint server or published by a journal.
- If the manuscript is being reviewed or being prepared for publishing but not yet published by a journal, the authors declare that they have received authorization from the journal to make this deposit.
- The submitting author declares that all authors of the manuscript agree with the submission to SciELO Preprints.