

LEITURA NO CÉREBRO: PROCESSOS NO NÍVEL DA PALAVRA E DA SENTENÇA

Cyntia Bailer¹

¹Universidade Regional de Blumenau, Blumenau, Santa Catarina, Brasil

Lêda Maria Braga Tomitch²

²Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil

Resumo: Este artigo apresenta uma revisão de literatura sobre leitura no cérebro com foco na compreensão de palavras e frases. Trata-se de um recorte da tese de Bailer (b), que objetivou investigar cérebros de monolíngues do português-brasileiro e bilíngues do par linguístico português-brasileiro e inglês e sua resposta neuroanatômica ao processamento de frases escritas. Neste artigo, estudos empíricos comportamentais e de neuroimagem sobre os processos de leitura no nível da palavra e no nível da sentença são apresentados, bem como os modelos de leitura de Kintsch e van Dijk, de van Dijk e Kintsch, e de Gagné, Yekovich e Yekovich que retratam o processo de leitura no todo, das palavras ao discurso. Também, discutimos o papel das diferenças individuais, especialmente da capacidade de memória de trabalho na compreensão de leitura. O objetivo é descrever o que acontece na mente do leitor à medida que ele entende palavras, sentenças, parágrafos e constrói representações significativas de textos e também localizar o leitor com relação aos componentes que o estudo de Bailer (b) lidou.

Palavras-chave: Leitura; Cérebro; Modelos de Leitura; Capacidade de Memória de Trabalho

READING IN THE BRAIN: PROCESSES AT THE WORD AND SENTENCE LEVELS

Abstract: This article presents a literature review on reading in the brain with a focus on the comprehension of words and sentences. It is part of



Bailer's thesis (b), which aimed at investigating the brains of Brazilian Portuguese monolinguals and Brazilian-Portuguese and English bilinguals and their neuroanatomical response to the processing of written sentences. In this article, empirical behavioral and neuroimaging studies on reading processes at the word and sentence levels are presented, as well as the reading models by Kintsch and van Dijk, van Dijk and Kintsch, and Gagné, Yekovich and Yekovich that describe the whole reading process, from words to discourse. In addition, we discuss the role of individual differences, especially working memory capacity in reading comprehension. The objective is to describe what happens in the reader's mind as s/he understands words, sentences, paragraphs and builds significant representations of texts and also to locate the reader in relation to the components that the Bailer's study (b) dealt with.

Keywords: Reading; Brain, Reading Models; Working Memory Capacity

1. Introdução

A habilidade de entender e falar uma língua tem sido considerada como uma condição *sine qua non* da cognição humana e tem fascinado diversas comunidades de pesquisa: Linguística, Psicologia, Ciência da Computação e subáreas como Psicolinguística e Psicologia Cognitiva. Assim, inúmeros aspectos relacionados à produção e compreensão da linguagem têm sido investigados. Nesse contexto, é senso comum que as línguas humanas são sistemas simbólicos que estão evoluindo há milhares de anos e que servem a várias funções na comunicação. Evolutivamente, falar parece ser tão antigo quanto a humanidade, enquanto a leitura e a escrita podem ser consideradas uma invenção cultural (Dehaene (a)).

A compreensão da linguagem depende, em primeiro lugar, da compreensão do significado das palavras individuais, de modo que somos capazes de entender a relação entre as palavras em uma frase, em um parágrafo, no discurso como um todo. Neste exato momento, enquanto você está lendo estas páginas, seu cérebro, com suas incontáveis conexões, está realizando um feito fascinante. Seus olhos escaneiam a página em movimentos curtos de contração. Seu olhar se move constantemente pela página. Quatro ou

cinco vezes por segundo, seu olhar pousa em uma palavra ou duas (Dehaene (a)). A fóvea, o centro da retina em seus olhos, com sua excelente resolução, permite o reconhecimento de informações escritas (Just & Carpenter (a)). Seu cérebro recebe a informação capturada por seus olhos e inicia uma surpreendente orquestração paralela de processos que visa construir uma representação mental significativa do que você está lendo. Embora os leitores possam não estar conscientes de todos os processos envolvidos no reconhecimento e compreensão do *input* escrito, isso acontece, a todo o momento, nas diversas situações de leitura a que somos expostos na sociedade em que vivemos.

O cérebro do leitor consiste em um conjunto complexo de mecanismos perfeitamente ajustados à leitura. Com o advento de novas técnicas de investigação, os pesquisadores começaram a desvendar os princípios subjacentes aos circuitos cognitivos do cérebro. Técnicas de neuroimagem são capazes de revelar, em uma velocidade nunca antes imaginada, as áreas do cérebro que se iluminam quando lemos. Tais áreas, em conjunto com modelos teóricos e evidências comportamentais, nos ajudam a entender o que é a leitura. Além da leitura, essas técnicas podem elucidar o que acontece no cérebro quando aprendemos ou quando estamos processando informações escritas em uma nova língua. Para aprender uma nova língua, o cérebro se adapta dinamicamente. Não importa em qual idade, os indivíduos têm a capacidade de aprender, decodificar *input* e se comunicar em um novo idioma. Tal habilidade depende da cognição, “do ato ou processo de conhecer caracteristicamente dinâmico, engenhoso e humano” (Buchweitz 1, *nossa tradução*).

Naturalmente, avanços envolvem esforços e parcerias interdisciplinares. O presente artigo é parte integrante de uma tese de doutorado (Bailer (b)), de um estudo resultante de tais esforços e parcerias. A tese foi desenvolvida no Núcleo de Estudos em Leitura na Universidade Federal de Santa Catarina em parceria com o *Center for Cognitive Brain Imaging na Carnegie Mellon University* (Pittsburgh, PA, EUA). O estudo, de natureza transversal, quantitativa e exploratória, objetivou investigar cérebros de monolíngues do

português-brasileiro e bilíngues do par linguístico português-brasileiro e inglês e sua resposta neuroanatômica ao processamento de frases escritas. Para os fins deste artigo, delimitou-se apresentar a revisão de literatura sobre leitura com foco na compreensão de palavras e frases.

Na próxima seção, apresentaremos, muito brevemente, estudos empíricos comportamentais e de neuroimagem sobre os processos de leitura no nível da palavra, com a visão de Dehaene (a), seguidos dos resultados acerca dos processos de leitura no nível da sentença. Na seção intitulada “Modelos de leitura: o processo todo, das palavras ao discurso”, apresentamos os modelos de leitura de Kintsch e van Dijk, de van Dijk e Kintsch, e de Gagné, Yekovich e Yekovich. O objetivo é descrever o que acontece na mente do leitor à medida que ele entende palavras, sentenças, parágrafos e constrói representações significativas de textos e também com o objetivo de localizar o leitor com relação aos componentes que o estudo de Bailer (b) lidou. Também discutimos o papel das diferenças individuais, como o papel que a capacidade de memória de trabalho desempenha na compreensão de leitura. Por fim, apresentamos as considerações finais.

2. Processos de leitura no nível da palavra

De acordo com Dehaene (a), a leitura é uma habilidade complexa que deve ser aprendida para que vivamos em sociedade. Ele acredita que o cérebro do leitor exibe um conjunto de mecanismos que foram adaptados, por meio da evolução, à leitura. Por vários séculos, tal dádiva permaneceu um mistério. Com o advento da tecnologia, “a caixa preta do cérebro” estava aberta à investigação (Dehaene (a) 1, *nossa tradução*). Avanços em muitos campos, como Psicologia, Linguística e Neurociência, instigaram os pesquisadores a desvendar os mistérios envolvidos em nossa capacidade de ler. Uma variedade de estudos tem fornecido *insights* para a área: estudos comportamentais, de rastreamento ocular, de neuroimagem

(principalmente PET, tomografia por emissão de pósitrons, e fMRI, ressonância magnética funcional) e neurofisiológicos (ERPs, potenciais evocados). Dehaene fez uso de métodos de imageamento cerebral para entender como o cérebro decifra palavras escritas. Ele explica que nossos cérebros não foram projetados para a leitura; fomos ensinados a ler. Nosso circuito cerebral foi reciclado, adaptado para leitura. Para Dehaene e sua hipótese da reciclagem, existe uma área na região occipito-temporal chamada de área da forma visual das palavras (*visual word form area*, VWFA¹), cujos neurônios são originalmente dedicados à atividade de responder a estímulos visuais. Esses neurônios se engajam na nova tarefa de reconhecer letras e palavras. Glezer e colaboradores testaram empiricamente essa hipótese, treinando os participantes implicitamente sobre novas palavras e concluíram que os neurônios da VWFA são seletivos para palavras inteiras, permitindo, assim, o rápido reconhecimento de palavras familiares. Assim, a capacidade de ler é o resultado de um sofisticado processo evolutivo concedido pela plasticidade do cérebro humano e o instinto humano de aprender e ensinar.

Just e Carpenter (a) conduziram um estudo de rastreamento ocular para investigar como a leitura ocorre desde a fixação do olho até a compreensão. Eles assumiram que é possível aprender sobre os processos envolvidos na compreensão, examinando onde os leitores pausam, fixando seus olhos. Eles explicam que um leitor fluente é capaz de ler cerca de 200 palavras por minuto em textos científicos. Além disso, os leitores fixam cada palavra e há uma grande variação na duração das fixações individuais, bem como na duração total da mirada em palavras distintas. Os pesquisadores teorizam que as

¹ De acordo com Dehaene (a), a área VWFA está localizada no giro fusiforme, entre o giro temporal inferior e o giro para-hipocampal. As coordenadas MNI (*Montreal Neurological Institute*) são [-44, -58, -15]. Para Bolger, Perfetti e Schneider, eles são [-42, -57, 15]. Para Glezer e colaboradores, as coordenadas devem ser [-46 +/- 7, -57 +/- 7, -15 +/- 6]. Pesquisa recente conduzida por Vogel, Petersen e Schlaggar sugere a VWFA como uma região de uso geral para tarefas que exigem propriedades de processamento, “tornando-a particularmente útil para leitura” (8).

durações das miradas refletem o tempo necessário para realizar processos de compreensão. Quando os leitores estão acessando palavras não frequentes, integrando informações e fazendo inferências, pausas mais longas ocorrem devido a maiores cargas de processamento. Dehaene (a) complementa essa visão explicando que a maioria das palavras de conteúdo, como substantivos e verbos, deve ser fixada pelo menos uma vez, enquanto palavras de função e marcadores gramaticais, por exemplo, podem ser às vezes ignorados.

O reconhecimento de palavras apresentadas na modalidade visual é baseado em uma correspondência entre sequências de caracteres impressos e representações lexicais. Quando nos deparamos com uma palavra, dificilmente é possível evitar a compreensão do seu significado (Pulvermüller). Duas rotas paralelas de processamento podem ser usadas para levar ao significado: (1) a rota fonológica e (2) a rota lexical. A primeira converte letras em sons de fala, enquanto a segunda, dá acesso direto a um dicionário mental de significados de palavras (Dehaene (a); Frost, Katz & Bentin). Jobard e colegas denominam as rotas como rota grafo-fonológica e rota léxico-semântica. Apesar de receber nomes diferentes, seus significados são comparáveis. A primeira via (fonológica/grafico-fonológica) implica ligar as unidades ortográficas aos seus equivalentes fonológicos; consequentemente, o acesso às palavras acontece por meio de sua pronúncia. A segunda rota (lexical/léxico-semântica) parece formas ortográficas de palavras inteiras e suas representações semânticas. Nas línguas alfabéticas como o inglês, os iniciantes na arte da leitura usam a rota fonológica como padrão até que sua familiaridade com a ortografia lhes permita associar formas de palavras a significados. Petersen e colegas (1988), no primeiro estudo PET sobre o processamento de palavras no cérebro com leitores habilidosos, já sinalizaram que as palavras podem ser processadas diretamente a partir de sistemas visuais sem passar por uma recodificação fonológica.

De acordo com Dehaene (a), “todos os sistemas de escrita oscilam entre uma representação precisa do som e a transmissão rápida do significado” (38, *nossa tradução*). Ambas as rotas (fonológica e lexical) são ativadas automaticamente durante o reconhecimento de

palavras e atuam em paralelo para mediar o acesso lexical. Dehaene (a) explica que quando encontram palavras muito irregulares, raras ou novas, os leitores acessam-nas preferencialmente usando a rota fonológica: decodificando as letras, convertendo-as em pronúncia e, finalmente, acessando o significado do padrão sonoro. Por outro lado, quando os leitores são confrontados com palavras frequentes ou aquelas que têm uma pronúncia excepcional, eles usam uma rota direta que acessa o significado das palavras e, em seguida, usa a informação lexical para recuperar sua pronúncia. Geralmente, os indivíduos têm uma razão para querer pronunciar a palavra depois de ter seu significado em mãos, como interesse, necessidade ou tempo.

Entre os sistemas de escrita alfabética, existem diferenças fundamentais na maneira como eles refletem a estrutura fonêmica de suas línguas faladas. Frost, Katz e Bentin, e Katz e Frost propuseram a hipótese da profundidade ortográfica que coloca as linguagens em um contínuo a partir da ortografia rasa (transparente) a profunda (opaca). Em ortografias rasas, os códigos fonêmico e ortográfico combinam, fonemas são representados por grafemas de forma direta, assim, “a ortografia segue a fonologia” (Katz & Frost 149). As ortografias profundas apresentam uma relação mais opaca entre ortografia e som: a mesma letra ou agrupamento de letras pode representar diferentes fonemas em diferentes contextos, portanto, diferentes letras podem representar o mesmo fonema. Como mencionado anteriormente, as línguas variam ao longo do contínuo. Por exemplo, em um extremo, o italiano tem um sistema de ortografia transparente; com 30 fonemas, “cada letra corresponde a um único fonema” (Dehaene (a) 31, *nossa tradução*), facilitando a pronúncia correta das palavras. No outro extremo, o inglês exibe um sistema ortográfico opaco; dependendo do falante e do método de contagem, a língua tem de 40 a 45 fonemas, dificultando o mapeamento das letras em sons. Já o português é menos transparente que o italiano e o espanhol e menos opaco que o francês e o inglês. De acordo com Scliar-Cabral, a língua portuguesa possui 33 fonemas.

Palesu e colegas realizaram estudos comportamentais e com PET com estudantes universitários italianos e ingleses. Eles con-

cluíram que “ler em uma ortografia complexa e inconsistente tem um custo considerável” (93, *nossa tradução*). Os italianos leem mais rápido e mais eficientemente por causa do mapeamento consistente entre sons individuais de letras e sons de tais letras no contexto de palavras. Os leitores ingleses recorreram mais a processos semânticos/ortográficos, que pareciam ser automaticamente evocados, dado o grau de complexidade ortográfica.

No que diz respeito à implementação cerebral dos processos de reconhecimento de palavras, as duas vias que permitem o acesso ao significado e aos sons parecem envolver conjuntos distintos de áreas cerebrais no hemisfério esquerdo. Regiões occipito-temporais apoiam a análise visual [-44, -58, -15]; os giros temporais superior [-53, -13, 0 e -37, -35, 12] e médio [-63, -30, 4], o giro supramarginal [-60, -41, 25] e o *pars opercularis* do giro frontal inferior [-50, 10, 4] estão envolvidos no processamento fonológico; e o giro temporal médio [-49, -54, 13], a região temporal basal² [-48, -41, -16] e o *pars triangularis* do giro frontal inferior [-44, 23, 17] subsidiam o acesso semântico (Dehaene (a)).

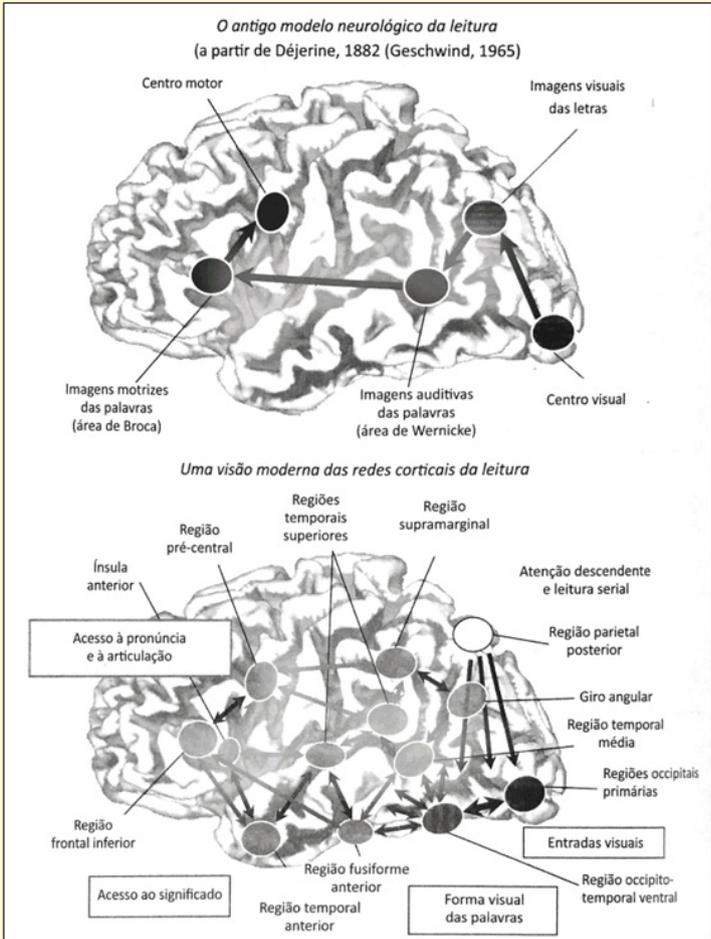
Palesu e colegas encontraram uma ativação mais forte em leitores italianos no *planum temporale* esquerdo na junção temporoparietal, uma região do cérebro tipicamente associada ao processamento fonológico. Os leitores ingleses mostraram maior ativação na região temporal posterior inferior esquerda e na parte anterior do giro frontal inferior esquerdo.

Dehaene (a), em seu livro, propõe uma alternativa ao modelo sequencial clássico de leitura no cérebro (Figura 1). Em sua perspectiva, áreas occipitais esquerdas, em particular a VWFA, recebem a entrada visual, identificando a forma visual das cadeias de letras. A partir daí, essa informação visual é distribuída para numerosas regiões em todo o hemisfério esquerdo que codificam significado, padrão de som e articulação. Embora a organização detalhada das re-

² A região temporal basal é tradicionalmente conhecida como Área de Linguagem Temporal Basal. Segundo Abou-Khalil e colegas, “está localizada no giro fusiforme no lobo temporal basal; entretanto, pode se estender até o giro temporal inferior e o giro para-hipocampal” (173).

des ainda não seja totalmente conhecida, parece que a leitura implica áreas visuais e de linguagem de maneira bidirecional e simultânea. Dehaene reconhece que a conectividade cortical na leitura pode ser muito mais rica do que a descrita em seu diagrama.

Figura 1 - O modelo neurológico clássico da leitura e uma perspectiva moderna de como a leitura ocorre no cérebro



Fonte: Dehaene ((a) 78).

Corroborando essa visão, Price revisou estudos sobre compreensão e produção de palavras e verificou que o acesso ao sistema semântico envolve mais regiões temporais inferiores anteriores e o córtex parietal inferior posterior no hemisfério esquerdo. Além disso, o giro supramarginal esquerdo (BA 40) está envolvido em traduzir a ortografia para a fonologia. Gitelman e colegas elaboraram um estudo para explorar a resposta neuronal a três processos fundamentais para a linguagem: ortografia, fonologia e semântica. Seus resultados revelaram uma rede comum de regiões cerebrais que apoiam o processamento da palavra: áreas ventrolaterais frontais, motoras suplementares, médio-temporais posteriores, occipito-temporais e parietais inferiores. Em sua revisão, Shaywitz e Shaywitz indicam três sistemas que são importantes para a leitura em nível de palavras: (1) o giro angular³ (região temporo-parietal), que está associado a processos fonológicos e à conversão grafema-fonema; (2) a área VWFA, que responde rapidamente às palavras em cerca de 150 milissegundos após a apresentação da palavra; e (3) o giro frontal inferior esquerdo, tradicionalmente implicado na articulação, que desempenha um papel na leitura silenciosa.

Bolger, Perfetti e Schneider, em sua meta-análise de estudos de leitura de palavras, encontraram uma semelhança de localização em tarefas e sistemas de escrita na área VWFA. Eles analisaram estudos com sistemas de escrita alfabéticos (inglês e francês, por exemplo), silábicos (chinês e o *kana* japonês) e morfo-silábicos (o *kanji* japonês). Eles dividiram a leitura de palavras em três processos componentes: ortográficos, fonológicos e semânticos. O primeiro processo envolve regiões occipitais bilaterais, particularmente o giro fusiforme esquerdo (onde a área VWFA está) e o

³ O giro angular (BA39) “fica na extremidade posterior do fascículo longitudinal inferior que o liga a regiões do lobo temporal implicadas na memória semântica” (Stoeckel *et al.* 1092, *nossa tradução*). Seghier em sua revisão destacou “o papel integrador do giro angular na compreensão e raciocínio” (56, *nossa tradução*). A ativação do giro angular foi encontrada para a manipulação do conhecimento conceitual, processamento semântico, leitura e compreensão de palavras, recuperação de memória, atenção, e cognição espacial e social.

giro temporal inferior esquerdo (BAs 18, 37, 19 e 37). O segundo processo envolve regiões lateralizadas à esquerda: o sulco temporal superior, o lobo parietal inferior, as regiões frontal inferior, ínsula e pré-motoras (BAs 22, 40, 39, 45, 6 e 9). E o terceiro processo envolve áreas lateralizadas à esquerda: o fusiforme anterior, o giro temporal inferior e médio e o giro frontal inferior (BAs 37, 21 e 44). Apesar da variação nas características visuais e em como essas línguas mapeiam a ortografia para a fonologia e a semântica, os autores concluem que diferentes sistemas de escrita utilizam uma rede comum de regiões, mas a localização dentro dessas regiões indica que existem diferenças entre os sistemas de escrita.

Um estudo recente realizado por Zaccarella e Friederici investigou, com fMRI, o processamento de texto no córtex insular, “uma porção inteiramente escondida do córtex cerebral, localizada na profundidade do sulco lateral, abaixo da fissura de Sylvian” (1, *nossa tradução*). Essa região é normalmente associada a funções autônomas como batimentos cardíacos e respiratórios, como também a funções cognitivas como a consciência. Alguns estudos relataram ativações na ínsula durante tarefas de linguagem, como no processamento auditivo e de fala no nível da palavra e da frase. Os pesquisadores apresentaram a 22 participantes alemães palavras escritas (e pseudopalavras) e expressões. Eles usaram uma ferramenta de parcelamento multimodal para conseguir localizações mais precisas da atividade cerebral. Como achados, palavras provocaram ativação insular bilateral significativa. Os agrupamentos de *voxels* tiveram pico em [-33, 23, -2] (55 *voxels* no hemisfério esquerdo) e em [33, 23, -2] (27 *voxels* no hemisfério direito).

Alguns estudos investigaram o efeito do comprimento da palavra na leitura. Os estudiosos acreditam que a resposta cerebral é suscetível a quantas letras são apresentadas por vez, à velocidade de apresentação das palavras e por quanto tempo permanecem no campo visual. Mechelli e colegas, por exemplo, em seu estudo PET com seis participantes examinaram como o tamanho da palavra e o contraste visual afetam a leitura. Eles usaram palavras com três, seis e nove letras e variaram o contraste de como apresentavam as

palavras de baixo a alto. Os participantes foram solicitados a articular as palavras silenciosamente enquanto estavam no PET *scan*. Os resultados revelaram que, em comparação com palavras curtas, as palavras longas provocaram uma maior ativação nos giros lingual medial bilateral e fusiforme bilateral, no giro lingual superior direito, no *cuneus* medial e na região motora esquerda. Palavras curtas, quando comparadas com as longas, não provocaram ativação significativa. Os pesquisadores consideraram o envolvimento da área motora um efeito da subarticulação silenciosa. Em relação ao contraste, o giro lingual foi mais ativado por palavras de baixo contraste e o giro fusiforme por palavras de alto contraste. Tais resultados sugerem que as demandas no processamento de características locais e no processamento de formas globais aumentam com o aumento do comprimento das palavras. Além disso, Wehbe e colaboradores, em seu estudo sobre as regiões cerebrais envolvidas na leitura de um capítulo do livro de *Harry Potter*, encontraram efeitos no comprimento da palavra no córtex occipital, propagando-se pelas áreas fusiformes esquerdas (VWFA).

Com todas essas informações em mente, vamos revisar alguns estudos sobre como a compreensão de sentenças é implementada no cérebro. É importante ressaltar que a maioria dos estudos revisados nesta seção foram todos conduzidos na língua materna dos participantes, a L1.

3. Processos de leitura no nível da sentença

A compreensão da sentença não requer apenas o processamento e a compreensão de palavras individuais, mas exige a combinação de informações de uma sequência de palavras e frases. No nível cognitivo, envolve computar relações sintáticas e temáticas, usando o conhecimento do mundo para construir uma representação do significado da sentença. Além disso, tais processos requerem recursos mentais para compreensão, bem como para manter-se ativo durante o processamento das representações de significados de palavras e

proposições. As proposições são o resultado do processamento e podem ser definidas como unidades estruturadas coerentes no nível da frase ou unidades básicas de significado. Segundo Tomitch (a), as proposições são ideias completas. Para Gagné e colaboradores, as proposições “expressam ou ‘propõem’ relações entre conceitos” (61, *nossa tradução*). Paradis argumenta que quando as palavras são apresentadas fora de contexto, “elas perdem a maioria de suas propriedades específicas de linguagem” (176, *nossa tradução*). Corroborando essa perspectiva, Perfetti e Bolger afirmam que a leitura de sentenças envolve processos de integração de significado, referência, sintaxe e de texto, assim como requer o suporte da memória de trabalho. Esses processos não estão tão envolvidos na identificação de palavras.

Just e colegas foram os primeiros a estudar a compreensão de sentenças com fMRI⁴. No estudo, 15 estudantes destros universitários leram frases e responderam perguntas de compreensão enquanto estavam no aparelho fMRI. Os resultados revelaram que uma rede de quatro áreas foi recrutada para processar sentenças: as áreas clássicas de linguagem do hemisfério esquerdo (BA 44 e 45, área de Broca: giro frontal inferior e BA 22, área de Wernicke: giro temporal superior) e seus homólogos no hemisfério direito. Embora o hemisfério esquerdo tenha sido mais fortemente ativado, áreas do hemisfério direito foram recrutadas quando as sentenças eram estruturalmente mais complexas (orações relativas de sujeito e de objeto). Os autores inferem que o cérebro recruta mais tecido neural de uma rede quando as demandas de compreensão são maiores. Além disso, eles concluem que não apenas uma área, mas várias contribuem para a compreensão de frases.

⁴ Mazoyer e colegas foram os primeiros a publicar um estudo de neuroimagem (PET) sobre as bases neurais da fala (não apenas de palavras individuais). Eles concluíram que o processamento da fala recruta uma rede de áreas, cada uma das quais pode ser especializada em um aspecto, mas requer apoio dos outros para alcançar a compreensão. Eles sugeriram a área de Broca como crucial para o processamento lexical e conceitual. Como o foco deste artigo é a leitura, optamos por não revisar este estudo.

Hashimoto e Sakai investigaram se existem sistemas neurais especializados para compreensão de sentenças. Dezesesseis falantes nativos de japonês foram testados com fMRI em uma série de decisões sintáticas e tarefas de memória de curto prazo. Na literatura, o giro frontal inferior esquerdo é tradicionalmente implicado em processos de compreensão. Acredita-se que a parte anterior (BAs 45 & 47) participe do processamento semântico e a parte posterior (BA 44 & 45) contribua para o processamento fonológico e lexical, embora outros estudos tenham implicado a parte posterior no processamento sintático. Como resultado, os autores encontraram evidências de áreas pré-frontais esquerdas especializadas na compreensão de sentenças: o córtex pré-frontal dorsal esquerdo para memória de curto prazo e o giro frontal inferior esquerdo para análise de estruturas sintáticas. Gabrieli, Poldrack e Desmond concluíram, em seu artigo de revisão de literatura, que o córtex pré-frontal esquerdo desempenha um papel crucial na linguagem e na memória, como nas análises semânticas e na memória implícita. Eles explicaram que as ativações pré-frontais do hemisfério esquerdo “parecem refletir processos que são importantes para melhorar a memória de materiais encontrados em episódios específicos” (907, *nessa tradução*). Além disso, podem refletir processos de seleção semântica, pois “as ativações do hemisfério esquerdo e do cerebelo direito aumentaram ou diminuíram em *tandem* entre as condições” (908).

Como as informações sintáticas e semânticas estão tão intimamente interligadas, Newman e colegas exploraram a contribuição de duas sub-regiões da área de Broca: *pars opercularis* (BA 44) e *pars triangularis* (BA 45) no processamento de sentenças seguido por uma tarefa de julgamento de gramaticalidade. Treze participantes foram examinados por fMRI enquanto liam sentenças na voz ativa e sentenças relativas de objeto com dois tipos de agramaticalidades: concordância substantivo-verbo e adição de verbo extra. Conforme esperado, as orações relativas de objeto provocaram mais ativação cerebral devido à sua complexidade. Os dados sugerem que o *pars triangularis* está envolvido diferencialmente em aspectos semânti-

cos e temáticos da compreensão; e que o *pars opercularis* está mais envolvido na construção e na manipulação da estrutura sintática de sentenças. Além disso, os pesquisadores encontraram ativação no sulco intraparietal esquerdo, geralmente implicado no processamento visuoespacial. Eles interpretaram essa ativação como a geração de imagens visuais das ações descritas nas sentenças.

Um estudo mais recente conduzido por Frankland e Greene examinou com fMRI como o cérebro codifica “quem fez o quê a quem” (1, nossa tradução) em frases visualmente apresentadas em inglês, como por exemplo, *O caminhão bateu na bola* e *A bola bateu no caminhão*. Eles descobriram que os agentes (quem fez?) são processados pela margem superior do sulco temporal superior esquerdo [-46, -18, 1] e pacientes (a quem foi feito?), pela margem lateral do giro temporal superior esquerdo [-57, -10, 2]. Eles também encontraram ativação na amígdala esquerda [-28, -7, -18], que interpretaram como processamento afetivo. Os resultados reforçam a possibilidade de “que a representação explícita de variáveis semânticas abstratas em circuitos neurais distintos desempenhe um papel crítico em permitir que cérebros humanos componham ideias complexas a partir de ideias mais simples” (6, *nossa tradução*).

Até aqui, o hemisfério esquerdo parece ser o responsável pela compreensão da linguagem no nível da palavra e da sentença, uma vez que os estudos relatados nesta revisão não sugerem papéis específicos para áreas no hemisfério direito (apenas Just e colegas reportaram ativação em áreas do hemisfério direito quando as demandas da tarefas eram altas). No entanto, Purves e colegas explicam que o verdadeiro significado da lateralização para a linguagem “reside na subdivisão eficiente de funções complexas entre os hemisférios, em vez de residir em qualquer superioridade de um hemisfério sobre o outro” (688-689, *nossa tradução*).

Nesta linha, Jung-Beeman sugere que, quando a compreensão da linguagem natural está em jogo, o hemisfério direito desempenha um papel importante. Ele revisou estudos de lesão cerebral, de neuroimagem e neuroanatômicos e sugeriu “pelo menos três componentes distintos, mas altamente interativos, de processamento

semântico” (513, *nossa tradução*). Os três componentes recrutam áreas bilaterais. O primeiro, *ativação semântica*, requer a participação dos giros temporais superiores médios (área de Wernicke). A *integração semântica*, o segundo componente, “apoia a interpretação no nível da mensagem ao computar o grau de sobreposição semântica entre múltiplos campos semânticos” (515, *nossa tradução*) e recruta os giros temporais superiores anteriores, bem como os polos temporais. O último componente, *seleção semântica*, seleciona o conceito relevante entre os anteriormente ativados e implica o giro frontal inferior. Jung-Beeman teoriza que tais processos ocorrem bilateralmente, mas com algumas diferenças. O hemisfério esquerdo processaria “o significado dominante, literal e contextualmente relevante, ao mesmo tempo em que inibe as características relacionadas aos significados subordinados ou contextualmente irrelevantes” (514, *nossa tradução*); apresentando, portanto, uma boa codificação semântica que seleciona rapidamente um pequeno número de significados relevantes. O hemisfério direito manteria uma ativação semântica mais difusa, com características semânticas distantes e incomuns, trazendo significados secundários. Assim, apresenta uma codificação semântica grosseira na qual um amplo espectro de significados é fracamente ativado. Para Jung-Beeman, essas diferenças permitem que os pesquisadores investiguem a linguagem levando em consideração as conexões imediatas e estreitas no hemisfério esquerdo, e a manutenção da ativação mais ampla do significado no hemisfério direito.

A hipótese da codificação grosseira de Jung-Beeman foi investigada em um estudo de fMRI que Mason e Just (b) realizaram para entender como ambiguidades lexicais são resolvidas na compreensão de sentenças em inglês. Seus estímulos eram sentenças com dois tipos de ambiguidades: (1) palavra ambígua tendenciosa, quando um sentido é dominante e o outro, subordinado, por exemplo, a palavra *ball* em *This time the ball was moved because it was always so well attended*; (2) palavra ambígua equilibrada, quando uma palavra tem dois significados igualmente possíveis, como a palavra *pitcher* em *Of course the pitcher was often forgotten because it was kept on*

the back of a high shelf. Eles também incluíram frases controle correspondentes. Como resultado, encontraram ativação extra bilateral no giro frontal inferior, bem como no caudado dos gânglios da base⁵ para palavras ambíguas. Eles também encontraram ativação bilateral média e superior frontal para sentenças com palavras ambíguas tendenciosas. Os autores acreditam que tal ativação seja indicador de um processo de monitoramento da coerência. Eles relacionaram a ativação do caudado com o processo de seleção e a ativação dos giros frontais inferiores com o processo de reanálise semântica. Mason e Just concluíram que “a ambiguidade lexical evoca o processamento extra que poderia ser atribuído à geração, manutenção e seleção de múltiplos significados” ((b) 118, *nossa tradução*).

Mais recentemente, Buchweitz e colaboradores compararam padrões de ativação cerebral associados à leitura e à compreensão auditiva de sentenças em português. Como resultados, eles descobriram que a compreensão de leitura recrutava mais regiões lateralizadas à esquerda, especialmente o córtex frontal inferior e o giro fusiforme, enquanto a compreensão auditiva evocava a ativação cerebral bilateral. Eles concluíram que a área VWFA provavelmente desempenha um papel maior em ortografias mais profundas (como o inglês) que em português.

Prat e Just também investigaram diferenças individuais na compreensão de sentenças com 27 estudantes de graduação. Os pesquisadores apresentaram sentenças em vários graus de complexidade. Deste estudo, três conceitos são cruciais: adaptabilidade neural, sincronização neural e eficiência neural. O primeiro, adaptabili-

⁵ Os gânglios da base “consistem em vários núcleos subcorticais interconectados com grandes projeções para o córtex cerebral, tálamo e certos núcleos do tronco encefálico” (Kandel *et al.* 854, *nossa tradução*). São componentes dos gânglios da base: estriado dorsal (núcleo do caudado e putâmen), estriado ventral (núcleo *accumbens* e tubérculo olfativo), globo pálido, pálido ventral, substância negra e núcleo subtalâmico. Relevante para o processamento de linguagem, Bohsali e colegas encontraram conectividade estrutural entre a área de Broca e o tálamo, sugerindo que eles estão envolvidos em funções linguísticas similares àquelas servidas pelas áreas de Brodmann 44 e 45.

dade neural, refere-se a uma rede cortical que está envolvida na execução de uma tarefa, sendo capaz de se adaptar às mudanças nas demandas de processamento de informações. O segundo, sincronização neural, relaciona-se com “a medida em que os níveis de ativação de duas regiões sobem e descem em *tandem*” (Prat & Just 1749, *nossa tradução*). E o terceiro, eficiência neural, refere-se à quantidade de recursos mentais necessários para executar uma tarefa. Prat, Mason e Just explicam que a eficiência neural está relacionada a “fazer mais com menos” (1, *nossa tradução*). Além desses três conceitos, a hipótese do transbordamento dinâmico também é essencial para entender resultados de estudos com neuroimagem. Refere-se à ideia de que “processos lateralizados” transbordam “em hemisférios contralaterais” em tarefas “com maior dificuldade” (Prat, Mason & Just 3, *nossa tradução*). Isso é exatamente o que Just e colegas encontraram em seu estudo quando a complexidade sintática das frases aumentou.

Xu e colegas foram os primeiros a examinar, com fMRI, os sistemas neurais envolvidos no processamento da linguagem em três níveis: palavras isoladas, em uma estrutura sintática (frases individuais) e em uma narrativa (fábulas) em um único experimento. Como resultado, a leitura ativou, em todos os níveis, as áreas da linguagem central do hemisfério esquerdo. No nível das sentenças, os pesquisadores observaram uma ativação mais abrangente em tais áreas, particularmente em regiões dentro do opérculo frontal. No nível narrativo, eles observaram demandas adicionais refletidas em ativações robustas no córtex pré-frontal medial e precúneo. À medida que os níveis aumentaram, eles encontraram a contribuição crescente do hemisfério direito. Como hipotetizado, eles descobriram que ambos os hemisférios estavam ativos na compreensão da narrativa, mas a ativação do hemisfério direito aumentou no final do segmento narrativo, à medida que os detalhes foram sintetizados e entrelaçados em um todo coerente. Tais diferenças se relacionavam “às características combinatórias e semânticas distintivas das condições lexicais, sentenciais e discursivas” (1014, *nossa tradução*).

Mason e Just (a) propõem redes neurais especulativas para compreensão do discurso escrito com base em achados de neuroimagem. Em sua proposta, o primeiro passo no processamento do discurso é o recrutamento de uma rede básica para compreensão de frases no hemisfério esquerdo. Tais processos básicos incluem processamento visual, fonológico, léxico-semântico e sintático. Eles destacam que o processamento do discurso “ocorre em um nível palavra por palavra, momento a momento, em paralelo com os níveis mais baixos do processamento da linguagem” (788, *nossa tradução*). Enquanto cada palavra está sendo processada, uma interpretação está sendo construída dentro do contexto da(s) sentença(s). Essa rede prossegue com uma rede grosseira de processamento semântico no hemisfério direito; uma rede de monitoramento de coerência pré-frontal dorsolateral; uma rede de integração de texto frontal-temporal esquerda; uma rede de interpretação do protagonista/agente frontal medial; e uma rede espacial no sulco intraparietal. Como esta revisão serviu para embasar um estudo sobre o processamento de frases isoladas, tais redes não são revisadas aqui.

4. Modelos de leitura: o processo todo, das palavras ao discurso

Nesta seção, escolhemos revisar alguns modelos de leitura relacionados ao estudo de Bailer (2016), como o modelo *textbase* de Kintsch e van Dijk, o modelo situacional de van Dijk e Kintsch e o modelo componencial de Gagné e colegas. Inicialmente, é necessário estabelecer exatamente o significado do termo modelo. Davies define-o como uma teoria formal, com suposições e previsões sobre um processo oculto, que pode ser testado através de pesquisas experimentais. No caso da leitura, a maioria dos modelos representa visualmente “o que se passa nos olhos e na mente enquanto leitores estão compreendendo (ou não compreendendo) o texto” (Davies 57, *nossa tradução*).

O modelo *textbase* de Kintsch e van Dijk está relacionado às estruturas semânticas, que são o resultado do processamento. Estas estruturas semânticas são caracterizadas em dois níveis, o nível da microestrutura e o da macroestrutura. O nível da microestrutura envolve o nível local do discurso e a estrutura das proposições individuais e suas relações, que os autores da linguística textual chamam de coesão (Koch). Nesta linha de pensamento, a *textbase* é entendida como o conjunto hierarquicamente organizado de proposições da superfície do texto, incluindo as conexões entre elas. Já a macroestrutura se refere ao nível global do discurso, o discurso como um todo significativo, e retrata relações que os linguistas textuais chamam de coerência (Koch & Travaglia). Ambos os níveis se referem a regras de mapeamento semântico, as macroregras, já que se espera que o discurso seja coerente e que as proposições sejam conectadas e globalmente organizadas no nível da macroestrutura para que uma representação mental significativa do texto seja construída. A primeira macroregra proposta por Kintsch e van Dijk envolve a *exclusão* de informações detalhadas e redundantes. A segunda requer *generalização* usando termos ou categorizações superordenadas, uma vez que uma sequência de proposições pode ser substituída por uma proposição mais geral. Finalmente, a terceira macroregra envolve a *construção* de uma sentença tópico quando não é fornecida no texto, como os autores postulam que “cada sequência de proposições pode ser substituída por uma proposição denotando um fato global” (Kintsch & Van Dijk 366, *nossa tradução*).

Van Dijk e Kintsch posteriormente desenvolveram o modelo de representação semântica no modelo situacional. É o resultado da interação entre a construção de uma *textbase* e a construção de uma compreensão geral do texto baseada no conhecimento prévio. A construção de um modelo situacional coerente requer que o leitor perceba o texto como um todo coerente ao mesmo tempo em que constrói uma *textbase*. O modelo situacional é o resultado do processamento, da representação cognitiva de eventos, ações, pessoas e a situação que o texto trata. Van Dijk acrescenta que os leitores

constroem uma representação mental das propriedades da situação que são atualmente relevantes para eles. Para ele, essa representação mental é “a *interpretação subjetiva* do contexto” (124, *nossa tradução*) que restringe a maneira como os leitores entendem o discurso. Nesse campo, leitores bem-sucedidos são aqueles capazes de construir uma representação mental coerente do texto, construindo uma *textbase* e integrando-a ao seu conhecimento prévio, construindo, assim, um modelo situacional do texto.

Em consonância com esses dois modelos, Gagné e colegas entendem a compreensão leitora como a construção de um modelo mental adequado do texto, contando com a interação entre conhecimento declarativo e procedimental. O conhecimento declarativo, também considerado como entendimento conceitual, envolve todo o conhecimento que os leitores possuem sobre letras, fonemas, morfemas, palavras, ideias, esquemas e tópicos; desta forma, o conhecimento semântico. Já o conhecimento procedimental, também conhecido como habilidades e estratégias, inclui os quatro componentes da leitura: decodificação, compreensão literal, compreensão inferencial e monitoramento da compreensão. Em seu modelo, esses processos acontecem em paralelo, simultaneamente, pelo menos na leitura proficiente.

Os processos de nível mais baixo envolvem a *decodificação* de informações impressas e a *compreensão literal*. A *decodificação* refere-se ao ato de quebrar o código impresso para torná-lo significativo, e tal componente é subdividido em *emparelhamento* e *recodificação*. O primeiro se refere a acessar o significado na memória de longo prazo e o segundo, ao pronunciar a palavra silenciosamente para ter acesso ao significado armazenado. Esse componente é enfatizado na visão de leitura de Dehaene (a) apresentada anteriormente. Pode-se relacionar *emparelhamento* à rota lexical e *recodificação* à rota fonológica. O segundo componente, *compreensão literal*, refere-se à compreensão literal do texto e é subdividido em *acesso lexical* e *parseamento sintático*. O primeiro se refere ao acesso à melhor interpretação da palavra, no contexto da frase, dentre todas as opções ativadas em nossos léxicos

mentais. Enquanto o segundo envolve o uso das regras sintáticas e linguísticas para juntar palavras e formar idéias ou proposições significativas, ou seja, as “unidades de conhecimento declarativo que representam o significado do texto” (Gagné *et al.* 273) a que Kintsch e Van Dijk se referem.

Os processos de nível mais alto envolvem a *compreensão inferencial* e o *monitoramento da compreensão*. O primeiro permite ao leitor ir além da informação literalmente declarada no texto, dando ao leitor uma compreensão mais ampla das ideias do texto. A *compreensão inferencial* é subdividida em *integração*, *sumarização* e *elaboração*. O primeiro subcomponente é responsável por conectar proposições e ocorre dentro das sentenças, entre sentenças e entre parágrafos. Nesse nível, o leitor faz as inferências necessárias para entender o texto, no nível microestrutural (Tomitch, comunicação pessoal). O segundo subcomponente, *sumarização*, visa produzir, na mente do leitor, uma macroestrutura que expresse as principais ideias do texto. Os processos de *integração* e de *sumarização* envolvem a produção de inferências necessárias para que o leitor seja capaz de extrair a essência do texto para produzir uma representação mental coerente do conteúdo do texto (Tomitch (b)). E o terceiro subcomponente, *elaboração*, permite ao leitor usar seu conhecimento prévio para complementar as novas ideias do texto, referindo-se ao que Van Dijk e Kintsch chamam de modelo situacional. Finalmente, o *monitoramento da compreensão* é o processo de mais alto nível, embora isso não signifique que aconteça por último. Leitores proficientes monitoram suas leituras durante todo o evento de leitura. No início, estabelecem um objetivo e selecionam as estratégias apropriadas para atingir tal objetivo. Na sequência, eles verificam se o objetivo está sendo alcançado durante a leitura e remediam, em outras palavras, mudam as estratégias quando a leitura não está atingindo o objetivo previamente definido.

Nesse âmbito, é possível concluir que os modelos contribuem para entender como as sentenças são processadas. No estudo de Bailer (b), frases como *A família foi feliz* e *O casal visitou a embaixada* foram apresentadas aos participantes na modalidade escrita

e eles foram convidados a pensar sobre o significado de tais sentenças. Ao ler e pensar sobre cada palavra, cada expressão, cada frase, os participantes ativaram áreas do cérebro relacionadas aos subprocessos. Assim, nos termos de Kintsch e Van Dijk, o estudo de Bailer (b) se situou no nível da microestrutura, da *textbase*. No modelo de Gagné e colegas, nos processos de nível mais baixo: componentes de *decodificação* e *compreensão literal*, já que os participantes acessaram significado em suas memórias de longo prazo ou pronunciando silenciosamente as palavras (*emparelhamento* e *recodificação*) tão logo eles encontraram cada palavra na tela. Além disso, eles acessaram a melhor interpretação de tais palavras no contexto de sentenças (*acesso lexical*) e formaram uma representação significativa vívida de tais sentenças.

Bailer (b) reconhece o fato de que trabalhou com processos componentes de baixo nível, que podem ser menos relevantes para algumas linhas de pesquisa; no entanto, não diminui a importância de se investigar a representação de frases no cérebro. De acordo com Mason e Just (b), “um dos elementos constitutivos da compreensão da linguagem é a capacidade de acessar o significado das palavras à medida que elas são encontradas e desenvolver uma interpretação que seja consistente com o contexto” (115, *nossa tradução*). Além disso, nós acrescentaríamos que, ao compreendermos como as sentenças são processadas em monolíngues e bilíngues, nos informamos melhor sobre como a compreensão do discurso ocorre no cérebro. Além disso, devemos ter em mente que existem diferenças individuais na compreensão de leitura, o tópico da seção a seguir.

5. Diferenças individuais na compreensão leitora: foco na memória de trabalho

A linguagem é um processo de criação livre; suas leis e princípios são fixos, mas a maneira pela qual os princípios de geração são usados é livre e infinitamente variada. Até mesmo a interpretação e o uso de palavras envolve um processo de criação livre.

(Noam Chomsky 152, *nossa tradução*)

Em nossa perspectiva, a compreensão leitora é vista como um processo cognitivo complexo e como a interação entre texto e leitor. Varia de indivíduo para indivíduo devido a uma ampla gama de fatores tais como motivação, aptidão, capacidade de memória de trabalho (CMT), conhecimento prévio, entre outros. Esta seção apresenta uma breve revisão⁶ sobre a literatura relevante acerca da memória de trabalho (MT). A MT é essencial para muitas tarefas cognitivas e depende da capacidade de manter representações ativas estáveis por curtos períodos de tempo (Bledowski, Rahm & Rowe).

Baddeley e colegas (Baddeley & Hitch ((a); (b)); Baddeley ((a); (b); (c)) propuseram um modelo multicomponente de MT, um sistema de controle de capacidade atencional limitada, composto por um executivo central, que é auxiliado por três sistemas subsidiários: alça fonológica, o bloco de notas visuoespaciais e o *buffer* episódico. Resumidamente, o executivo central desempenha um papel essencial nas funções executivas tais como foco, divisão e troca de atenção, relacionando o conteúdo da MT à memória de longo prazo. A alça fonológica armazena temporariamente e repete informações de cunho verbal até que as mesmas sejam integradas ao que está sendo processado. O bloco de notas visuoespaciais é o local onde se mantêm e se manipula informações visuais e espaciais. Finalmente, assume-se que o *buffer* episódico representa um sistema de armazenamento usando um código multimodal.

Há concordância entre os pesquisadores de que a MT desempenha um papel importante em todos os tipos de atividades cognitivas humanas (Tomitch (a)), pois é o sistema responsável pelo armazenamento, manutenção e processamento simultâneos de informações no curto prazo. É conhecida como uma arena de computação, onde o armazenamento e o processamento competem por capacidade no sistema (Daneman & Carpenter; Just & Carpenter (b); Tomitch (a)). É o lugar onde a atividade mental acontece. Sua limitação refere-se a quanto trabalho pode ser feito por vez, quanta CMT está

⁶ Para uma revisão mais aprofundada sobre o construto e modelos, sugerimos ao leitor a dissertação de Bailer (a).

disponível para ser compartilhada entre os processos simultâneos. Tal capacidade limitada difere entre os indivíduos e essas diferenças são bons preditores de desempenho em tarefas cognitivas: indivíduos com CMT maior apresentam um desempenho melhor em tarefas que indivíduos com menor capacidade. Autores explicam que quem tem uma CMT maior é capaz de manter e manipular na MT mais informações relevantes para concluir tarefas complexas e, como resultado, apresentar melhor desempenho.

A pesquisa sobre diferenças individuais na CMT tem sido, mais extensivamente, realizada na L1 e, menos extensivamente, na L2. Correlações positivas têm sido encontradas em uma ampla variedade de tarefas cognitivas de ordem superior, como leitura e compreensão auditiva em geral, mas também em subprocessos como construção de ideia principal, resolução de ambiguidades, compreensão inferencial, implementação de estratégias e estrutura de texto, para mencionar alguns (Bailer (a)). Em comparação aos monolíngues, os bilíngues são mais capazes de direcionar sua atenção para informações relevantes para a tarefa e manter sua atenção, apesar da interferência adversa (Yang *et al.*).

Para medir a CMT, Daneman e Carpenter criaram o Teste de Capacidade em Leitura (*Reading Span Test*). Esse teste envolve a compreensão de frases além da memorização das últimas palavras de um grupo de frases apresentadas. A capacidade em leitura de um indivíduo é o número máximo de palavras finais lembradas na ordem em que foram apresentadas. Como o teste apresenta requisitos laboriosos de processamento, a suposição subjacente (Daneman & Carpenter) é que esses requisitos podem diminuir a quantidade de informações adicionais que podem ser mantidas. Os resultados são “usados para prever o desempenho em outras habilidades cognitivas, como leitura, compreensão e raciocínio” (Tomitch (a) 33, *nossa tradução*). Daneman e Carpenter enfatizam que a capacidade de um indivíduo varia de acordo com a eficiência em relação aos processos correlacionados com uma tarefa específica. Seguindo esta linha, o teste é considerado um bom preditor de compreensão, pois captura muitos dos requisitos de processamento

da compreensão de sentenças (Daneman & Merikle). Como Cantor e Engle (1102, *nossa tradução*) destacam, “ao ler, bons leitores têm processos de leitura rápidos e eficientes que requerem menos CMT que os processos de leitores pobres. Assim, bons leitores têm funcionalmente mais capacidade em tarefas relacionadas à leitura”.

Para explicar como a CMT restringe a compreensão, Just e Carpenter (b) propuseram um modelo computacional denominado Modelo de Compreensão com Restrição de Capacidade. Os autores afirmam que “tanto o processamento quanto o armazenamento são mediados pela ativação e que a quantidade total de ativação disponível na memória de trabalho varia entre os indivíduos” (122, *nossa tradução*). Quando as demandas de recursos da tarefa excedem o suprimento disponível, o processamento diminui, produtos parciais são gerados e o desempenho é afetado. Os leitores com capacidade maior exibem mais capacidade residual para armazenar as palavras a serem lembradas na tarefa, porque são mais eficientes na recuperação de informações da memória de longo prazo e na alocação de recursos para atender às demandas da tarefa.

Neste contexto, os estudos de neuroimagem têm fornecido informações sobre como a MT é implementada no cérebro humano. Uma grande variedade de técnicas e tarefas tem revelado o córtex pré-frontal, a área frontal do cérebro, como subjacente à MT (D’Esposito *et al.*; Alloway & Alloway). Essa área tem sido repetidamente relatada em estudos de MT. Perani explica que o córtex pré-frontal dorsolateral esquerdo está envolvido em muitas tarefas de linguagem, como geração de palavras, monitoramento semântico e sintático, bem como na geração e monitoramento de seqüências, associações de aprendizagem entre estímulos e na MT. Nas palavras de Perani, o córtex pré-frontal “não é homogêneo, abrange muitas áreas citoarquitetônicas diferentes, cada uma exibindo um padrão único de conexões com outras áreas corticais e subcorticais” (211, *nossa tradução*), como com a área de Broca, o sulco intraparietal, o hipocampo e a amígdala.

Cabeza e Nyberg revisaram 275 estudos com PET e fMRI e revelaram que as regiões pré-frontal, frontal e parietal do cérebro estão

associadas à MT. Eles explicam que as áreas são recrutadas de acordo com a natureza da tarefa e a dificuldade. Investigações que aplicam tarefas verbais geralmente relatam ativações na BA 44 (área de Broca) no hemisfério esquerdo. As áreas frontais normalmente implicadas na MT geral são BAs 6 (área motora suplementar, SMA), 9 e 46 (córtex pré-frontal dorsolateral). Interpreta-se a ativação de tais áreas como uma reflexão de um processo de ensaio que “atualiza o conteúdo” da MT (Cabeza & Nyberg 19). As regiões parietais, particularmente as BAs 7 e 40, estão tipicamente relacionadas a operações linguísticas, como recuperação de palavras da memória de longo prazo e o acesso ao armazenamento fonológico. Em suma, acredita-se que a MT envolve uma rede de áreas dedicadas à realização de tarefas diárias cognitivas de alta ordem, como leitura e fala.

A MT medida pelo Teste de Capacidade em Leitura (Daneman & Carpenter) também é considerada uma estimativa da capacidade de leitura. Segundo Daneman e Merikle, correlaciona-se bem com testes verbais globais, como o *SAT* norteamericano (Teste de Aptidão Escolar Verbal), e com testes específicos que avaliam a compreensão de frases escritas e parágrafos. Para ilustrar, o estudo de Jobard e colegas considera o resultado do teste como um índice de capacidade em leitura. Eles investigaram a leitura de palavras e a habilidade leitora com 33 leitores de francês com fMRI. Eles exigiam que os participantes executassem o Teste de Capacidade em Leitura e, dentro do scanner, lessem as palavras em suas mentes (leitura oculta), uma vez que o movimento da boca na leitura em voz alta produziria ruído nos dados e ativaria áreas da linguagem relacionadas à fala. Eles usaram palavras muito frequentes como estímulos, uma vez que “se pensa que eles se beneficiam de uma ligação direta entre as representações ortográficas armazenadas e a semântica” (126, *nossa tradução*).

Os resultados de Jobard e colegas estão de acordo com a literatura sobre as duas rotas para acessar palavras. Em termos de áreas cerebrais, eles encontraram ativação inesperada no giro pré-central esquerdo, o que pode estar refletindo o acesso aos procedimentos motores necessários para proferir palavras no contexto da leitura

silenciosa. Análises revelaram que leitores com baixa capacidade em leitura ativam mais áreas envolvidas no processamento visual, fonológico e semântico: a VWFA, o giro pré-central, a parte média do sulco temporal, o *planum temporale* próximo ao giro supramarginal, a parte posterior do giro temporal médio e o *pars orbitalis* do giro frontal inferior. Leitores com baixa capacidade em leitura dependem mais de regiões visuais dorsais, o que pode indicar uma mudança do processamento paralelo de dados visuais - os participantes podem estar decompondo as palavras para acessá-las através de uma reconstrução grafo-fonológica e não através da rota ortográfico-semântica. Leitores com maior capacidade em leitura dependem menos das regiões acima mencionadas; eles geralmente ativam apenas as regiões implicadas no acesso direto ao significado a partir da análise visual das palavras escritas. Nas próprias palavras dos autores,

nossos resultados indicam que a reconstrução grafo-fonológica das palavras pode ser alcançada através do recrutamento de regiões cerebrais adicionais àquelas que permitem a rota lexical quando não há ligação direta entre ortografia e semântica (Jobard *et al.* 127, *nossa tradução*).

Por fim, suas descobertas mostram que a proficiência em leitura do participante (CMT, medida pelo Teste de Capacidade em Leitura) é um fator que influencia a rota que os participantes utilizam durante a leitura.

Prat e Just investigaram a conectividade funcional associada às demandas de processamento em uma tarefa de leitura. Os participantes foram divididos em dois grupos: indivíduos com maior e menor CMT. Os resultados mostraram que os indivíduos com maior CMT exibiram maior eficiência, maior adaptabilidade e melhor sincronização das redes neurais de linguagem que os participantes com menor CMT na compreensão de sentenças.

6. Considerações finais

Conforme já mencionado, a compreensão da linguagem depende, em primeiro lugar, da compreensão do significado das palavras individuais, de modo que somos capazes de entender a relação entre as palavras em uma frase, em um parágrafo, bem como no discurso como um todo. Ao ler estas páginas, seu cérebro tem realizado um feito fascinante, com muitas conexões, áreas e processos envolvidos, os quais muitas vezes, nos passam despercebidos. O cérebro do leitor, evolutivamente, se ajustou à leitura, uma invenção cultural. Os modelos comportamentais têm tentado explicar o que acontece enquanto lemos, mas graças às técnicas de neuroimagem funcional, os pesquisadores puderam começar a desvendar como a leitura ocorre no cérebro em tempo real.

Este artigo teve por objetivo apresentar a revisão de literatura sobre leitura com foco na compreensão de palavras e frases, da tese de doutorado de Bailer (b), originalmente escrita em língua inglesa e para os fins deste artigo, traduzida e adaptada para o português. É importante deixar claro que tal revisão não é exaustiva, já que existem muitos modelos para explicar a leitura e novos estudos são publicados continuamente.

Agradecimento

As autoras aproveitam a oportunidade para agradecer à CAPES pela bolsa de pesquisa concedida à Cyntia Bailer durante seu doutorado na UFSC (2012-2016) e pelo processo CAPES BEX 14636-13-1 da bolsa de doutorado sanduíche no exterior para que a pesquisadora pudesse conduzir seu estudo na *Carnegie Mellon University* (CMU) no período 2014-2015, com Dr. Marcel Just, no *Center for Cognitive Brain Imaging*. O artigo aqui apresentado é fruto das leituras e discussões na UFSC e na CMU.

Referências

Alloway, Tracy; Alloway, Ross. *The working memory advantage: Train your brain to function stronger, smarter, faster*. New York: Simon and Schuster, 2013.

Baddeley, Alan D.; Hitch, Graham J (a). "Working memory". *The Psychology of learning and motivation: Advances in research and theory*, Bower, Gordon H. (Ed.). Cambridge: Academic Press. 1974, pp. 47-89.

Baddeley, Alan D. (a). "Working memory". *Science*. 255.5044, (1992): 556-559.

Baddeley, Alan D.; Hitch, Graham J (b). "Developments in the concept of working memory". *Neuropsychology*. 8.4, (1994): 485-493.

Baddeley, Alan D. (b). "Is working memory still working?". *American psychologist*. 56.11, (2001): 851-864.

Baddeley, Alan D. (c). "Working memory: looking back and looking forward". *Neuroscience*. 4, (2003): 829-839.

Bailer, Cyntia (a). *Working memory capacity and attention to form and meaning in EFL reading*. Dissertação de Mestrado em Letras: Inglês e Literatura Correspondente, Pós-Graduação em Inglês, Universidade Federal de Santa Catarina, 2011.

Bailer, Cyntia (b). *The neural processing of sentences in bilinguals and monolinguals: an fMRI study of portugues-english bilinguals and portuguese monolinguals reading comprehension effects on brain activation*. Tese de Doutorado em Estudos da Linguagem-Inglês, Pós-Graduação em Inglês, Universidade Federal de Santa Catarina, 2016.

Bledowski, Christoph; Rahm, Benjamin; Rowe, James B. "What 'works' in working memory? Separate systems for selection and updating of critical information". *The Journal of Neuroscience*. 29.43, (2009): 13735-13741.

Bohsali, Anastasia A.; *et al.* “Broca’s area–thalamic connectivity”. *Brain and language*. 141, (2015): 80-88.

Bolger, Donald J.; Perfetti, Charles A.; Schneider, Walter. “Cross-cultural effect on the brain revisited: Universal structures plus writing system variation”. *Human brain mapping*. 25.1, (2005): 92-104.

Buchweitz, Augusto; *et al.* “Brain activation for reading and listening comprehension: An fMRI study of modality effects and individual differences in language comprehension”. *Psychology & neuroscience*. 2.2, (2009): 111-123.

Buchweitz, Augusto. *Two languages, two input modalities, one brain: An fMRI study of Portuguese-English bilinguals and Portuguese listening and reading comprehension effects on brain activation*. Tese de Doutorado, Pós-Graduação em Inglês, Universidade Federal de Santa Catarina, 2006.

Cabeza, Roberto; Nyberg, Lars. “Imaging cognition II: An empirical review of 275 PET and fMRI studies”. *Journal of cognitive neuroscience*. 12.1, (2000): 1-47.

Cantor, Judy; Engle, Randall W. “Working-memory capacity as long-term memory activation: An individual-differences approach”. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*. 19.5, (1993): 1101-1114.

Chomsky, Noam. “Interpreting the world: language and freedom”. *The chomsky reader*, Peck, James. (Ed.). New York: Pantheon Books. 1987: 139-156.

Daneman, Meredyth; Carpenter, Patricia A. “Individual differences in working memory and reading”. *Journal of Memory and Language*. 19.4, (1980): 450-466.

Daneman, Meredyth; Merikle, Philip M. “Working memory and language comprehension: A meta-analysis”. *Psychonomic bulletin & review*. 3.4, (1996): 422-433.

Davies, Florence. “Studying the reading process: models of reading”. *Introducing reading*, F. Davies. (Ed.). New York: Penguin Books. 1995, pp. 57-83.

Dehaene, Stanislas (a). *Reading in the brain*. New York: Viking, 2009.

Dehaene, Stanislas (b). “Os neurônios da leitura - como a ciência explica a nossa capacidade de ler”. *Porto Alegre, Penso*. (2012): 274-277.

D’Esposito, Mark; *et al.* “The neural basis of the central executive system of working memory”. *Nature*. 378.6554, (1995): 279-281.

Frankland, Steven M.; Greene, Joshua D. “An architecture for encoding sentence meaning in left mid-superior temporal cortex”. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. Early edition, 1.6, (2015): 11732-11737.

Frost, Ram; Katz, Leonard; Bentin, Shlomo. “Strategies for visual word recognition and orthographical depth: a multilingual comparison”. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*. 13.1, (1987): 104-115.

Gabrieli, John D. E.; Poldrack, Russell A.; Desmond, John E. “The role of left prefrontal cortex in language and memory”. *Proceedings of the national Academy of Sciences*. 95.3, (1998): 906-913.

Gagné, Ellen. D.; Yekovich, Carol W.; Yekovich, Frank R. *The cognitive psychology of school learning*. New York: Harper Collins College Publishers, 1993.

Gitelman, Darren R.; *et al.* “Language network specializations: an analysis with parallel task designs and functional magnetic resonance imaging”. *Neuroimage*. 26.4, (2005): 975-985.

Glezer, Laurie S.; *et al.* “Adding words to the brain’s visual dictionary: novel word learning selectively sharpens orthographic representations in the VWFA”. *Journal of Neuroscience*. 35.12, (2015): 4965-4972.

Hashimoto, Ryuichiro; Sakai, Kuniyoshi L. “Specialization in the left prefrontal cortex for sentence comprehension”. *Neuron*. 35.3, (2002): 589-597.

Jobard, G.; *et al.* “The weight of skill: interindividual variability of reading related brain activation patterns in fluent readers”. *Journal of Neurolinguistics*. 24.1, (2011): 113-132.

Jung-Beeman, Mark. "Bilateral brain processes for comprehending natural language". *Trends in cognitive sciences*. 9.11, (2005): 512-518.

Just, Marcel A.; Carpenter, Patricia A. (a). "A theory of reading: From eye fixations to comprehension". *Psychological review*. 87.4, (1980): 329-354.

Just, Marcel A.; Carpenter, Patricia A. (b). "A capacity theory of comprehension: individual differences in working memory". *Psychological review*. 99.1, (1992): 122-149.

Just, Marcel Adam; *et al.* "Brain activation modulated by sentence comprehension". *Science*. 274.5284, (1996): 114-116.

Kandel, Eric R.; Schwartz, James H.; Jessell, Thomas M. *Principles of neural science*. Vol. 4. New York: McGraw-Hill. 2000.

Katz, Leonard; Frost, Ram. "The reading process is different for different orthographies: The orthographic depth hypothesis". *Haskins Laboratories Status Report on Speech Research*. SR-111/112, (1992): 147-160.

Kintsch, Walter; Van Dijk, Teun A. "Toward a model of text comprehension and production". *Psychological review*. 85.5, (1978): 363-394.

Koch, Ingedore Grunfeld Villaça; Travaglia, Luiz Carlos. *Texto e coerência*. Vol. 4. São Paulo: Cortez Editora, 1989.

Koch, Ingedore Grunfeld Villaça. *A coesão textual*. São Paulo: Contexto, 1993.

Mason, Robert A.; Just, Marcel Adam (a). "Neuroimaging contributions to the understanding of discourse processes". *Handbook of psycholinguistics*, Traxler, Matthew and Morton Ann Gernsbacher. (Eds.). Amsterdam: Elsevier. 2006, pp. 765-799.

Mason, Robert A.; Just, Marcel Adam (b). "Lexical ambiguity in sentence comprehension". *Brain research*. 1146, (2007): 115-127.

Mazoyer, Bernard M.; *et al.* “The cortical representation of speech”. *Journal of cognitive neuroscience*. 5.4, (1993): 467-479.

Mechelli, Andrea; *et al.* “Differential effects of word length and visual contrast in the fusiform and lingual gyri during”. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*. 267.1455, (2000): 1909-1913.

Newman, Sharlene D.; *et al.* “Differential effects of syntactic and semantic processing on the subregions of Broca’s area”. *Cognitive Brain Research*. 16.2, (2003): 297-307.

Paulesu, Eraldo; *et al.* “A cultural effect on brain function”. *Nature neuroscience*. 3.1, (2000): 91-95.

Paradis, Michel. *A neurolinguistic theory of bilingualism*. Vol. 18. Amsterdam: John Benjamins Publishing, 2004.

Perani, Daniela. “The neural basis of language talent in bilinguals”. *Trends in Cognitive Sciences*. 9.5, (2005): 211-213.

Perfetti, Charles A.; Bolger, Donald J. “The brain might read that way”. *Scientific studies of reading*. 8.3, (2004): 293-304.

Petersen, Steven E.; *et al.* “Positron emission tomographic studies of the cortical anatomy of single-word processing”. *Nature*. 331.6157, (1988): 585-589.

Prat, Chantel S.; Just, Marcel Adam. “Exploring the neural dynamics underpinning individual differences in sentence comprehension”. *Cerebral cortex*. 21.8, (2011): 1747-1760.

Prat, Chantel S.; Mason, Robert A.; Just, Marcel Adam. “Individual differences in the neural basis of causal inferencing”. *Brain and language*. 116.1, (2011): 1-13.

Price, Cathy J. “The functional anatomy of word comprehension and production”. *Trends in cognitive sciences*. 2.8, (1998): 281-288.

Pulvermüller, Friedemann. “Meaning and the brain: The neurosemantics of referential, interactive, and combinatorial knowledge”. *Journal of Neurolinguistics*. 25.5, (2012): 423-459.

Purves, Dale; *et al.* “Neuroscience. 4th”. *Sunderland, Mass.: Sinauer*. xvii. 857, (2008): 944.

Scliar-Cabral, Leonor. *Introdução à lingüística*. Porto Alegre: Globo, 1974.

Seghier, Mohamed L. “The angular gyrus: multiple functions and multiple subdivisions”. *The Neuroscientist*. 19.1, (2013): 43-61.

Shaywitz, Sally E.; Shaywitz, Bennett A. “Dyslexia (specific reading disability)”. *Biological psychiatry*. 57.11, (2005): 1301-1309.

Stoekel, Cornelia; *et al.* “Supramarginal gyrus involvement in visual word recognition”. *Cortex*. 45.9, (2009): 1091-1096.

Tomitch, Leda Maria Braga (a). *Reading: text organization perception and working memory capacity*. PGI/UFSC, ARES - Advanced Research in English Series. Florianópolis: LLE/CCE/UFSC. 2003.

Tomitch, Leda Maria Braga (b). *Produção Textual Acadêmica*. Florianópolis: LLE/CCE/UFSC. 2012.

Van Dijk, Teun Adrianus; Kintsch, Walter. *Strategies of discourse comprehension*. New York: Academic Press. 1983.

Van Dijk, Teun A. “Context models in discourse processing”. *The construction of mental representations during reading*, Van Oostendorp, Herre and Susan R. Goldman. (Eds.). New Jersey, USA: LEA. 1999, pp. 123-148.

Wehbe, Leila; *et al.* “Simultaneously uncovering the patterns of brain regions involved in different story reading subprocesses”. *PLoS one*. 9.11, (2014): 1-19.

Xu, Jiang; *et al.* “Language in context: emergent features of word, sentence, and narrative comprehension”. *Neuroimage*. 25.3, (2005): 1002-1015.

Yang, Hwajin; *et al.* “Effects of bilinguals’ controlled-attention on working memory and recognition”. In: Cohen, James; *et al.* (Eds.). *ISB4: Proceedings of the 4th International Symposium on Bilingualism*. Somerville, MA: Cascadilla Press, 2005.

Zaccarella, Emiliano; Friederici, Angela D. “Reflections of word processing in the insular cortex: a sub-regional parcellation based functional assessment”. *Brain and language*. 142, (2015): 1-7.

Recebido em: 05/08/2020

Aceito em: 19/10/2020

Publicado em dezembro de 2020

Cyntia Bailer. E-mail: cbailer@furb.br. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9049-8003>.

Lêda Maria Braga Tomitch. E-mail: leda@cce.ufsc.br. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4183-8072>.