

UNIVERSIDADE LUTERANA DO BRASIL
PRÓ-REITORIA ACADÊMICA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENSINO DE
CIÊNCIAS E MATEMÁTICA

COMPETÊNCIA REPRESENTACIONAL NA APRENDIZAGEM QUÍMICA:
ELUCIDANDO AS BASES NEURAIS E OS MECANISMOS MENTAIS ASSOCIADOS
AO RACIOCÍNIO QUÍMICO DE NOVATOS E ESPECIALISTAS

THAYGRA SEVERO PRODANOV



Canoas, 2024.

UNIVERSIDADE LUTERANA DO BRASIL
PRÓ-REITORIA ACADÊMICA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENSINO DE
CIÊNCIAS E MATEMÁTICA



THAYGRA SEVERO PRODANOV

COMPETÊNCIA REPRESENTACIONAL NA APRENDIZAGEM
QUÍMICA: ELUCIDANDO AS BASES NEURAIS E OS MECANISMOS
MENTAIS ASSOCIADOS AO RACIOCÍNIO QUÍMICO DE NOVATOS E
ESPECIALISTAS

Tese apresentada no Programa de Pós-Graduação
em Ensino de Ciências e Matemática da Universidade
Luterana do Brasil para obtenção do título de Doutora
em Ensino de Ciências e Matemática.

Orientador: Prof. Dr. Agostinho Serrano de Andrade Neto

Canoas, 2024.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação – CIP

P964c Prodanov, Thaygra Severo.

Competência representacional na aprendizagem química: elucidando as bases neurais e os mecanismos mentais associados ao raciocínio químico de novatos e especialistas / Thaygra Severo Prodanov. – 2024.

167 f. : il.

Tese (doutorado) – Universidade Luterana do Brasil, Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências e Matemática, Canoas, 2024.

Orientador: Prof. Dr. Agostinho Serrano de Andrade Neto.

1. Raciocínio químico. 2. Competência representacional. 3. Mecanismos mentais. 4. Neurociência cognitiva. 5. Ressonância magnética funcional. I. Andrade Neto, Agostinho Serrano de. II. Título.

CDU 372.854:159.953.51

Bibliotecária responsável – Heloisa Helena Nagel – 10/981

THAYGRA SEVERO PRODANOV

COMPETÊNCIA REPRESENTACIONAL NA APRENDIZAGEM QUÍMICA:
ELUCIDANDO AS BASES NEURAIS E OS MECANISMOS MENTAIS
ASSOCIADOS AO RACIOCÍNIO QUÍMICO DE NOVATOS E ESPECIALISTAS

Linha de pesquisa: Ensino e Aprendizagem em Ciências e Matemática

Tese apresentada no Programa de Pós-Graduação
em Ensino de Ciências e Matemática da Universidade
Luterana do Brasil para obtenção do título de Doutora
em Ensino de Ciências e Matemática.

Data da Defesa: ____/____/____

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Daniele Trajano Raupp
Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

Profa. Dra. Michelle Camara Pizzato
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Sul-rio-grandense (IFSUL)

Profa. Dra. Dione Silva Corrêa
Universidade Luterana do Brasil (ULBRA)

Prof. Dr. Rossano André Dal-Farra
Universidade Luterana do Brasil (ULBRA)

Prof. Dr. Agostinho Serrano de Andrade Neto (Orientador)
Universidade Luterana do Brasil (ULBRA)

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família pela inspiração, incentivo e compreensão.

Ao meu orientador, professor Dr. Agostinho Serrano de Andrade Neto, pelo entusiasmo, paciência e confiança.

Aos professores componentes da banca de defesa, Dra. Daniele Trajano Raupp, Dra. Michelle Camara Pizzato, Dra. Dione Silva Corrêa e Dr. Rossano André Dal-Farra, pela gentileza e disponibilidade de realizar a leitura e as ponderações necessárias para a pesquisa.

Aos professores e estudantes de Química por se disporem a participar da pesquisa e pelo comprometimento demonstrado na realização das atividades.

Aos profissionais do Instituto do Cérebro da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (InsCer - PUCRS) pela receptividade e suporte para o desenvolvimento do paradigma experimental de ressonância magnética funcional.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências e Matemática da Universidade Luterana do Brasil (PPGECIM - ULBRA) por tanto contribuírem com minha formação acadêmica e profissional.

E à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES - Ministério da Educação) pelo apoio no subsídio da pesquisa.

RESUMO

A presente pesquisa buscou investigar comparativamente o processamento do raciocínio químico de químicos novatos e especialistas com diferentes habilidades representacionais, elucidando as bases neurais e os mecanismos mentais associados a tal raciocínio. Como a aprendizagem química é consideravelmente influenciada pela forma como os químicos percebem, interpretam e manipulam representações, como símbolos, fórmulas, equações e modelos moleculares, utilizou-se o aporte teórico da Competência Representacional, que trata das habilidades envolvidas na transição entre diferentes representações químicas e como essas habilidades variam entre químicos novatos e químicos especialistas. Junto a esse aporte teórico, abordou-se teorias fundamentais da psicologia cognitiva, como a Teoria dos Esquemas de Barlett e a Teoria do Desenvolvimento Cognitivo de Piaget. Estas discutem como os esquemas cognitivos e a memória de trabalho influenciam o aprendizado, particularmente o aprendizado químico. Utilizando-se a abordagem metodológica de Métodos Mistos como procedimento de coleta e análise de dados, integrou-se conceitos da psicologia cognitiva, neurociência e ensino de Química. Planejou-se técnicas comportamentais e de neuroimagem para elucidar as bases neurais e os mecanismos mentais envolvidos no raciocínio químico, investigando como diferentes representações moleculares são processadas cognitivamente, destacando-se a interação entre a memória visual e verbal na memória de trabalho. Com os resultados obtidos, percebeu-se que há uma constante interação entre as competências representacionais e os mecanismos mentais, mas de formas distintas entre novatos e especialistas. Os especialistas possuem esquemas cognitivos robustos, em virtude de suas experiências e maior exposição a diferentes tipos de resolução de problemas, que facilitaram o uso de representações simbólicas e diagramáticas. Isso pode ser atribuído à habilidade de abstrair conceitos de representações complexas, utilizando o raciocínio diagramático para navegar pelas particularidades da Estereoquímica. Já os novatos demonstraram ainda estarem no processo de construção desses esquemas cognitivos, dependendo mais da cognição espacial, intuitiva e visual, para compreender a disposição tridimensional das moléculas, um aspecto fundamental da Estereoquímica. Essa preferência reflete a fase inicial de seu desenvolvimento cognitivo, onde a manipulação visual e espacial das representações fornece um caminho mais acessível para entender conceitos complexos. Ainda, pode-se discutir se as habilidades visuoespaciais - visualização espacial, rotação espacial e orientação espacial - são componentes chave para a compreensão de conceitos relacionados à estereoquímica de moléculas orgânicas. Assim, considerou-se relevante propor um desenvolvimento progressivo da competência representacional, onde se empregue estratégias cognitivas variadas para superar as dificuldades da aprendizagem química, principalmente no que tange a Química Orgânica.

Palavras-chave: Raciocínio Químico. Competência Representacional. Mecanismos Mentais. Neurociência Cognitiva. Ressonância Magnética Funcional.

ABSTRACT

The present study aimed to comparatively investigate the processing of chemical reasoning among novice chemists and experts with different representational skills, elucidating the neural bases and mental mechanisms associated with such reasoning. Since chemical learning is significantly influenced by how chemists perceive, interpret, and manipulate representations, such as symbols, formulas, equations, and molecular models, the theoretical framework of Representational Competence was employed. This framework addresses the skills involved in transitioning between different chemical representations and how these skills vary between novice and expert chemists. Along with this theoretical framework, fundamental theories of cognitive psychology were approached, including Bartlett's Schema Theory and Piaget's Theory of Cognitive Development. These discuss how cognitive schemas and working memory influence learning, particularly chemical learning. Utilizing a Mixed Methods methodological approach as a procedure for data collection and analysis, concepts from cognitive psychology, neuroscience, and chemistry education were integrated. Behavioral techniques and neuroimaging were planned to elucidate the neural bases and mental mechanisms involved in chemical reasoning, investigating how different molecular representations are cognitively processed, with a focus on the interaction between visual and verbal memory in working memory. The results indicated a constant interaction between representational competencies and mental mechanisms, albeit in distinct ways between novices and experts. Experts possess robust cognitive schemas, owing to their experiences and greater exposure to different types of problem-solving, which facilitated the use of symbolic and diagrammatic representations. This can be attributed to the ability to abstract concepts from complex representations, using diagrammatic reasoning to navigate through the specifics of Stereochemistry. Conversely, novices were still in the process of building these cognitive schemas, relying more on spatial, intuitive, and visual cognition to understand the three-dimensional arrangement of molecules, a fundamental aspect of Stereochemistry. This preference reflects the initial phase of their cognitive development, where visual and spatial manipulation of representations provides a more accessible path to understanding complex concepts. Furthermore, it may be discussed whether visuospatial abilities - spatial visualization, spatial rotation, and spatial orientation - are key components in understanding concepts related to the stereochemistry of organic molecules. Thus, it was considered relevant to propose a progressive development of representational competence, employing varied cognitive strategies to overcome the challenges of chemical learning, especially concerning Organic Chemistry.

Keywords: Chemical Reasoning. Representational Competence. Mental Mechanisms. Cognitive Neuroscience. Functional Magnetic Resonance Imaging.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Figuras geométricas e fórmulas estruturais químicas: (A) as figuras 2D são incompatíveis, (B) ambas as fórmulas estruturais químicas representam o composto $C_2H_2Br_2$, (C) as figuras 3D são compatíveis e (D) fórmulas estruturais químicas em 3D equivalentes.....	35
Figura 2 - Localizações dos eletrodos na linha média em um mapa cerebral: FZ (frontal zero), CZ (central zero) e PZ (parietal zero).....	36
Figura 3 - Conjunto de procedimentos e tarefas executadas no paradigma da fMRI.....	37
Figura 4 - Região do hipocampo esquerdo (em vermelho) mostrando a diminuição da difusividade média (MD) após a aprendizagem.....	38
Figura 5 - Exemplo de um bloco de estímulo incongruente executado no paradigma da fMRI.....	40
Figura 6 - Ativação das regiões (A) pré-suplementar motora, (B) córtex pré-frontal ventrolateral e (C) córtex pré-frontal dorsolateral durante os blocos de estímulos incongruentes.....	41
Figura 7 - Os três níveis de representação química da matéria.....	52
Figura 8 - Exemplos de representações moleculares comuns apresentadas em Química Orgânica.....	54
Figura 9 - Duas representações da molécula de glicose e como elas podem ser codificadas de acordo com o modelo tripartido de memória de Baddeley.....	64
Figura 10 - Exemplos de abreviações de substituintes e moléculas longas com sequências de letras curtas que omitem informações espaciais.....	65
Figura 11 - Resultados de fMRI: (vermelho) regiões do cérebro ativas durante a tarefa de Física no início do semestre e (azul) regiões do cérebro ativas durante a tarefa de Física depois da finalização do semestre.....	71
Figura 12 - Ativação dos canais no EEG nas situações de observação, execução e nova observação: lobo frontal (vermelho), lobo temporal (azul), lobo parietal (laranja) e lobo occipital (verde).....	72
Figura 13 - Imageamento por ressonância magnética funcional (fMRI).....	74
Figura 14 - Lobos do córtex cerebral (a) e áreas importantes dentro dos lobos (b).....	75

Figura 15 - Exemplo de <i>joint display</i> que apresenta a integração de componentes quantitativos e qualitativos.....	78
Figura 16 - Síntese do protocolo <i>Report Aloud</i>	84
Figura 17 - Janela de construção do paradigma experimental no <i>software PsychoPy</i>	86
Figura 18 - Janela de programação <i>Python</i> no <i>software PsychoPy</i>	76
Figura 19 - Etapas do experimento no paradigma da fMRI.....	87
Figura 20 - Questões do Teste de Competência Representacional (TCR) de maior dificuldade para os novatos.....	98
Figura 21 - Questões do Teste de Competência Representacional (TCR) de maior dificuldade para os especialistas.....	99

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Média de acertos de novatos e especialistas por âmbito da Competência Representacional (CR).....	96
Gráfico 2 - Distribuição de acertos de cada novato por âmbito da Competência Representacional (CR).....	100
Gráfico 3 - Distribuição de acertos de cada especialista por âmbito da Competência Representacional (CR).....	100
Gráfico 4 - Frequência das estratégias escolhidas pelos novatos em cada questão no Questionário de Estratégia (QE).....	106
Gráfico 5 - Eficácia dos novatos relacionada às estratégias escolhidas no Questionário de Estratégia (QE).....	107
Gráfico 6 - Frequência das estratégias escolhidas por cada novato no Questionário de Estratégia (QE).....	108
Gráfico 7 - Frequência das estratégias escolhidas em cada questão pelos especialistas no Questionário de Estratégia (QE).....	109
Gráfico 8 - Eficácia dos especialistas relacionada às estratégias escolhidas no Questionário de Estratégia (QE).....	109
Gráfico 9 - Frequência das estratégias escolhidas por cada especialista no Questionário de Estratégia (QE).....	110

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Visão geral da Revisão Sistemática de Literatura (RSL).....	28
Quadro 2 - Amostra final de documentos da Revisão Sistemática de Literatura (RSL).....	29
Quadro 3 - Resumo dos âmbitos da Competência Representacional (CR).....	56
Quadro 4 - Especificações do Teste de Competência Representacional (TCR)...	81
Quadro 5 - Fragmentos das entrevistas individuais de novatos e especialistas acerca do Questionário de Estratégia (QE).....	105
Quadro 6 - Estratégias dos novatos e especialistas identificadas no Questionário de Estratégia (QE): algorítmica-diagramática (A-D), espacial-imagística (E-I) e complexa-mista (C-M).....	106
Quadro 7 - Detalhamento das questões, frequência e eficácia das estratégias empregadas por novatos e especialistas no Questionário de Estratégia (QE): algorítmica-diagramática (A-D), espacial-imagística (E-I) e complexa-mista (C-M).....	111
Quadro 8 - Estrutura para uma progressão da competência representacional em Química Orgânica.....	123

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição da amostra de pesquisa.....	93
Tabela 2 - Resultados do Teste de Competência Representacional (TCR).....	95
Tabela 3 - Acertos (OK) e erros (X) dos novatos e especialistas no Questionário de Estratégia (QE).....	103

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

2D - Duas dimensões

3D - Três dimensões

AFNI - *Analysis of Functional NeuroImages*

ATP - Adenosina trifosfato

BOLD - *Blood Oxygenation Level Dependent*

CAAE - Certificado de Apresentação para Apreciação Ética

CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

CR - Competência Representacional

dHb - *Deoxyhaemoglobin*

E1-E5 - Especialistas de 1 a 5

EEG - *Electroencephalogram*

ERIC - *Education Resources Information Center*

FCI - *Force Concept Inventory*

FLAIR - *Fluid Attenuated Inversion Recovery*

fMRI - *Functional magnetic resonance imaging*

InsCer - Instituto do Cérebro do Rio Grande do Sul

k - Coeficiente *Kappa* de *Cohen*

KR-20 - Coeficiente de *Kuder-Richardson*

MI - *Modeling Instruction*

mT/m - Militesla por metro

N1-N8 - Novatos de 1 a 8

oHb - *Oxyhaemoglobin*

PPGECIM - Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências e Matemática

PUCRS - Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul

QE - Questionário de Estratégia

RSL - Revisão Sistemática de Literatura

SciELO - *Scientific Electronic Library Online*

STEM - *Science, Technology, Engineering, and Mathematics*

TCLE - Termo de Consentimento Livre e Esclarecido

TCR - Teste de Competência Representacional

UBEA - União Brasileira de Educação e Assistência

ULBRA - Universidade Luterana do Brasil

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	16
1 CONTEXTO DA PESQUISA	23
1.1 JUSTIFICATIVA	23
1.2 PROBLEMA DE PESQUISA	24
1.3 OBJETIVOS	24
1.3.1 Objetivo geral	25
1.3.2 Objetivos específicos	25
2 REVISÃO DE LITERATURA	26
2.1 SELEÇÃO DE ESTUDOS PARA A REVISÃO SISTEMÁTICA DE LITERATURA (RSL)	26
2.2 CATEGORIZAÇÃO E DISCUSSÃO DOS ESTUDOS SELECIONADOS.....	32
2.2.1 Recentes perspectivas neurocientíficas do processo de aprendizagem química	34
3 REFERENCIAL TEÓRICO	43
3.1 TEORIA DOS ESQUEMAS: UMA PERSPECTIVA CONSTRUTIVISTA DA MEMÓRIA.....	43
3.1.1 Relações entre a Teoria dos Esquemas e a Teoria do Desenvolvimento Cognitivo de Piaget	45
3.1.2 O modelo tripartido de memória de Baddeley	47
3.2 USO DE REPRESENTAÇÕES NA QUÍMICA.....	50
3.2.1 Os três níveis de representação química da matéria	51
3.2.2 Dificuldades em transitar entre diferentes representações	53
3.3 COMPETÊNCIA REPRESENTACIONAL (CR).....	55
3.3.1 Diferenças das habilidades representacionais de químicos novatos e especialistas	58
3.4 NEUROCIÊNCIA COGNITIVA APLICADA À EDUCAÇÃO.....	61
3.4.1 Cognição espacial e a memória de trabalho	62
3.4.1.1 <i>Sub-habilidades da cognição espacial</i>	66
3.4.2 Raciocínio diagramático e a memória de trabalho	67

3.4.3 Neurociência e aprendizagem	68
3.4.3.1 Estudos com neuroimagens	69
3.4.3.1.1 Exame de ressonância magnética funcional (fMRI)	73
4 DELINEAMENTO METODOLÓGICO	77
4.1 CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA.....	77
4.2 LOCAL DA COLETA DE DADOS	78
4.3 PARTICIPANTES DA PESQUISA	79
4.4 INSTRUMENTOS PARA A COLETA DE DADOS	80
4.4.1 Teste de Competência Representacional (TCR)	80
4.4.2 Questionário de Estratégia (QE).....	82
4.4.3 Entrevista individual por meio do protocolo <i>Report Aloud</i>	83
4.4.4 Sessão de ressonância magnética funcional (fMRI).....	84
4.5 ANÁLISE DE DADOS	88
4.5.1 Análise de dados quantitativos	88
4.5.2 Análise de dados qualitativos.....	89
4.6 SÍNTESE DA METODOLOGIA DE PESQUISA.....	90
5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	92
5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS PERFIS REPRESENTACIONAIS DE QUÍMICOS NOVATOS E ESPECIALISTAS	94
5.2 IDENTIFICAÇÃO DOS MECANISMOS MENTAIS PARA A RESOLUÇÃO DE PROBLEMAS QUÍMICOS	102
5.3 PROCESSAMENTO DO RACIOCÍNIO QUÍMICO DE NOVATOS E ESPECIALISTAS DE DIFERENTES ÂMBITOS DA COMPETÊNCIA REPRESENTACIONAL	115
5.3.1 Análise comparativa entre os perfis representacionais e os mecanismos mentais	118
5.3.2 Análise teórica do processamento do raciocínio químico: comparativo entre o novato e o especialista com as maiores competências representacionais	120

5.3.3 Proposta de progressão da competência representacional em Química Orgânica: o uso integrado da cognição espacial e do raciocínio diagramático	122
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	126
REFERÊNCIAS	129
APÊNDICES	143
APÊNDICE A - Teste de Competência Representacional (TCR)	143
APÊNDICE B - Questionário de Estratégia (QE)	156
APÊNDICE C - Protocolo <i>Report Aloud</i> para entrevista individual	159
ANEXOS	162
ANEXO A - Carta de anuência do local da coleta de dados	162
ANEXO B - Termo de Consentimento Livre e Esclarecido (TCLE)	163
ANEXO C - Termo de autorização de uso de imagem, nome e voz	166
ANEXO D - Orçamento do Instituto do Cérebro (InsCer - PUCRS)	167

INTRODUÇÃO

Na Química, comumente se utilizam representações para explicar fenômenos naturais e para comunicar ideias químicas, de tal forma que é considerada uma das mais visuais das ciências. Traduzir representações químicas envolve pensar o fenômeno em três níveis diferentes de representação: macroscópico, simbólico e submicroscópico, que estão diretamente relacionados entre si (Gabel, 1999; 2000; Johnstone, 2000).

O nível macroscópico trata das observações diretas de um fenômeno químico, como a mudança de cor ou a formação de um precipitado durante uma reação química. Esse nível de representação é o mais perceptível, pois se baseia em fenômenos diretamente observáveis pelos sentidos humanos, onde pode-se relacionar conceitos químicos a aplicações práticas do cotidiano. Indo-se além das observações, para uma compreensão mais profunda dos processos químicos, adentra-se no nível simbólico. O nível simbólico envolve a utilização de símbolos, fórmulas e equações para representar elementos químicos e suas interações. Este nível possibilita a ligação entre o observável e o teórico, por meio da manipulação de conceitos abstratos para prever comportamentos químicos. Já o nível submicroscópico representa a compreensão teórica de átomos, moléculas e íons, assim como suas estruturas e interações em escalas que não são diretamente observáveis. Esse nível de representação propicia o entendimento dos mecanismos envolvidos nos fenômenos observados no nível macroscópico (Becker *et al.*, 2015; Gabel, 1999; 2000; Johnstone, 2000; Spitha *et al.*, 2023).

Enquanto os químicos especialistas conseguem manipular representações em todos os três níveis, os estudantes de Química podem achar de difícil compreensão quando seus professores parecem estar continuamente alternando entre os domínios macroscópico e submicroscópico. Isso ocorre porque muitos estudantes são incapazes de criar uma ligação entre os três níveis de pensamento simultaneamente. Segundo Johnstone (1997), em geral os estudantes não conseguem lidar com mais de dois níveis de pensamento, sendo o nível submicroscópico o mais complexo.

Estudos mais contemporâneos continuam apontando que estudantes em todos os níveis de Química têm dificuldades em interpretar e usar representações de conceitos químicos (Bernal-Ballen; Ladino-Ospina, 2019; Fernandes; Locatelli, 2021; Tsaparlis; Pappa; Byers, 2018). Essas dificuldades abrangem desde a interpretação

de estruturas moleculares complexas até a aplicação de conceitos em ligações químicas, exigindo dos estudantes não apenas a habilidade de visualizar aspectos tridimensionais no espaço, mas também de aplicar essas visualizações em contextos teóricos e reais.

A fim de minimizar tais dificuldades, o uso de tecnologias educacionais tem sido indicado para proporcionar experiências de aprendizado mais interativas, facilitando a associação de representações abstratas a fenômenos químicos (Habig, 2020; Ippoliti *et al.*, 2022; Mohsen; Alangari, 2024). O ensino de Estereoquímica, por exemplo, que explora como a disposição espacial dos átomos em moléculas influencia suas propriedades e reações, é fundamental para a compreensão da Química Orgânica. Ao ser ensinado por meio de metodologias tradicionais (como textos e representações bidimensionais), esse conteúdo por ser de difícil compreensão devido a sua natureza tridimensional. As simulações computacionais, por exemplo, oferecem ambientes virtuais onde os estudantes podem manipular estruturas moleculares, observando diretamente os efeitos de suas ações nas configurações espaciais e nas propriedades das moléculas. Assim como o uso de realidade aumentada, que permite aos estudantes a visualização de modelos moleculares tridimensionais em um ambiente imediato, possibilitando uma melhor compreensão espacial (Habig, 2020; Ippoliti *et al.*, 2022).

Dentre as diferentes abordagens que tratam das dificuldades em interpretar e usar representações de conceitos químicos, destaca-se aqui a denominada Competência Representacional, apresentada por Kozma e Russell (1997, 2005), que trata de um conjunto de habilidades e práticas (distribuídas em cinco níveis¹) que possibilita usar reflexivamente uma variedade de representações ou visualizações para pensar, comunicar e agir sobre fenômenos químicos e físicos. A essência da CR está na ideia de que a Ciência, particularmente a Química, utiliza uma linguagem de representações que inclui símbolos, equações, gráficos, modelos moleculares e animações. Essas representações são fundamentais para a visualização de conceitos abstratos, a comunicação de descobertas e a elaboração de teorias sobre o

¹ Ao considerar-se o uso do termo 'níveis' em língua portuguesa, identifica-se uma tendência a interpretar as habilidades em uma escala, onde uma sucede e supostamente supera a anterior. Essa percepção opõe-se a importância do uso múltiplo e variado das representações na Química. Por isso, a presente pesquisa optou em utilizar o termo 'âmbito', uma tradução mais adequada e alinhada aos princípios do aporte adotado, refletindo melhor a variedade de habilidades envolvidas na Competência Representacional.

comportamento dos materiais no nível microscópico. A habilidade de navegar entre essas representações diversas - compreendendo suas conexões e aplicando-as apropriadamente - é essencial para o raciocínio e a solução de problemas científicos.

Os autores Kozma e Russell (1997, 2005) apresentaram uma estrutura para a CR composta por cinco âmbitos (anteriormente referidos como 'níveis'), cada um refletindo um domínio distinto da habilidade de navegar entre as diferenças representações. Brevemente, pode-se descrever o primeiro âmbito como um domínio onde se reconhece e se utiliza representações baseando-se essencialmente em suas características físicas, sem uma compreensão profunda do que elas simbolizam ou como podem ser complementares a outras formas de representação. Como, por exemplo, o uso de modelos moleculares tridimensionais para representar moléculas, manipulando-se fisicamente os modelos para visualizar conceitos de isomerismo conformacional, sem necessariamente aprofundar-se nas implicações das diferentes conformações.

O segundo âmbito trata da incorporação de elementos simbólicos nas representações, reconhecendo-se a necessidade de abstração para capturar conceitos que não podem ser diretamente observados ou que são dinâmicos por natureza. Um exemplo seria o uso de fórmulas estruturais planas para representar moléculas quirais, começando-se aqui a usar representações que abstraem a realidade física para capturar conceitos não observáveis diretamente, como a quiralidade, por meio de símbolos (como asteriscos) para indicar centros quirais.

No terceiro âmbito, usa-se representações formais e aplica-se regras sintáticas que regem o uso de símbolos e diagramas, estando o foco mais na forma do que no conteúdo implícito. Como, por exemplo, a utilização da projeção de Fischer para representar estereoisômeros, onde aplica-se regras formais para desenhar moléculas em duas dimensões que representam sua disposição espacial tridimensional, salientando mais a estrutura da representação do que o seu significado.

Já o quarto âmbito enfatiza mais o significado, utilizando-se representações para se apropriar e comunicar conceitos abstratos. Um exemplo seria o uso de diagramas de energia potencial para reações químicas com mecanismo de substituição nucleofílica bimolecular (S_N2), tendo-se um tipo de representação visual não apenas para ilustrar a dinâmica da reação como também para comunicar conceitos abstratos, como a barreira de energia que precisa ser superada para que a reação ocorra.

E o quinto âmbito envolve a utilização crítica e criativa de representações para explorar e explicar conceitos abstratos. Como, por exemplo, a elaboração de um mecanismo reacional detalhado para a síntese de um composto orgânico, utilizando símbolos e notações padrão para descrever passo-a-passo as etapas, intermediários e estados de transição, demonstrando a capacidade de aplicar e integrar conhecimentos de Química Orgânica para explicar fenômenos complexos.

Assumindo-se a importância da CR para a visualização de conceitos abstratos na Química, a compreensão das diferenças entre químicos novatos e químicos especialistas ao codificarem e decodificarem no cérebro diferentes representações químicas ainda não é conhecida. Nesse contexto, pode-se relacionar o aporte teórico da CR à Teoria dos Esquemas de Barlett (1932). Nesta, o processo de aprendizado envolve processos mentais internos e a aquisição de representações mentais na forma de estruturas cognitivas chamadas 'esquemas'. Estudos sobre atenção e aprendizagem (Souza; Oberauer, 2016; Valenti; Galera, 2020) apontam a relevância de aprender fazendo conexões entre novos conceitos e esquemas existentes na chamada memória de longo prazo. Quando algo é ensinado, espera-se que os indivíduos construam uma rede complexa de conceitos interconectados na memória de longo prazo, acessando-os quando necessário. A abstração é a característica que torna o esquema algo tão importante ao aprendizado, pois codificar cada característica de cada experiência coloca uma alta demanda na capacidade de memória e nos recursos de processamento cognitivo (Pinker, 1985).

Durante a construção dos esquemas, a chamada memória de trabalho interage em conjunto para propiciar o suporte operacional necessário para o processamento ativo das informações, onde os esquemas são acessados, manipulados e expandidos. Considerando-se o modelo tripartido da memória de trabalho de Baddeley (1986), que propõe que a memória de curto prazo (memória de trabalho) funciona como um sistema tripartido, onde há dois subsistemas especializados no processamento de informações - visual e verbal² - pode-se considerar que a maioria da decodificação pode ocorrer na memória de trabalho visual se uma representação conter muitas

² Destaca-se que a presente pesquisa adota o modelo tripartido da memória de trabalho de Baddeley (1986) para fundamentar o processamento visuoespacial e verbal de informações na Química. No entanto, a suposição de que o aprendizado químico depende exclusivamente da capacidade de processar informações visuais ou verbais pode limitar o entendimento de como estudantes com deficiências visuais ou auditivas aprendem. No capítulo 3 aborda-se essa questão, comentando-se sobre as estratégias adaptativas e tecnologias assistivas para o ensino de Química dentro do modelo tripartido da memória de trabalho.

informações espaciais. Por outro lado, pode ser que a complexidade de tais informações espaciais estimule os indivíduos a naturalmente decodificarem representações moleculares, como abreviações, apenas na memória de trabalho verbal.

Na perspectiva da neurociência cognitiva, apesar do papel da cognição espacial na aprendizagem de disciplinas de Ciência, Tecnologia, Matemática e Engenharia ser amplamente investigado (Carlisle; Tyson; Nieswandt, 2015; Guay; McDaniel, 1977; Hegarty, 2004; Lubinski, 2010; West, 1991), poucos estudos investigaram sobre os componentes cognitivos essenciais à cognição espacial e as estratégias utilizadas para resolver problemas espaciais na Química (Kiernan; Manches; Seery, 2021; Stieff, 2011; Stieff *et al.*, 2020).

Os pressupostos tradicionais sobre a cognição espacial na Química supõem que a habilidade de gerar e manipular imagens mentais de estruturas moleculares tridimensionais é uma componente chave para a resolução de problemas químicos (Pappa; Byers, 2018; Stieff *et al.*, 2020; Wu; Krajcik; Soloway, 2001). Esse pressuposto sugere que, devido à natureza tridimensional das moléculas e às interações moleculares que fundamentam os conceitos e processos químicos, os indivíduos devem possuir habilidades de visualização espacial bem desenvolvidas para aprender Química. E que diferenças individuais na habilidade visuoespacial de estudantes podem influenciar seus desempenhos em Química, onde aqueles com habilidades mais desenvolvidas aprendem e compreendem os conceitos químicos mais facilmente. Por isso, diversos estudos destacam a importância do desenvolvimento de habilidades de visualização espacial em estudantes como uma estratégia para melhorar o ensino e a aprendizagem de Química (Carlisle; Tyson; Nieswandt, 2015; Desutter; Stieff, 2020; Moen *et al.*, 2020).

Durante o processamento de informações espaciais, a cognição espacial de um indivíduo pode ser classificada em três sub-habilidades distintas: visualização espacial, rotação espacial e orientação espacial. Essas sub-habilidades descrevem o raciocínio real que está por trás do processamento de informações espaciais em conjunto com o sistema de memória visual (Kozhevnikov; Hegarty, 2001; Logie, 1995). Na aprendizagem química, as habilidades de cognição espacial desempenham um papel importante na capacidade de se visualizar moléculas e estruturas atômicas em três dimensões. Essas habilidades permitem que os estudantes compreendam a geometria molecular, as ligações químicas e a estereoquímica das moléculas.

Ao não empregar habilidades de cognição espacial, mas sim utilizar diagramas, modelos tridimensionais e regras para representar essas estruturas de forma clara e precisa, tem-se o chamado raciocínio diagramático (Kiernan; Manches; Seery, 2021; Wu; Shah, 2004). Trata-se de uma habilidade cognitiva que desempenha um papel fundamental na forma como os indivíduos processam informações visuais e conceituais. Na perspectiva da psicologia cognitiva, essa habilidade envolve a capacidade de criar, interpretar e manipular diagramas, gráficos e representações visuais para resolver problemas (Sowa, 2020). Na Química, por exemplo, ao aprender um processo químico complexo, um estudante pode elaborar um diagrama que representa as etapas da reação química, as moléculas envolvidas e como elas interagem. Estudos na área da Psicologia sobre o raciocínio diagramático já evidenciaram que em tarefas específicas, como deduzir a relação entre estruturas tridimensionais, o uso de diagramas permite que indivíduos identifiquem relações espaciais diretamente do diagrama sem gerar ou manipular uma imagem mental (Coliva, 2012; Lorenat, 2020; Tversky, 2004). Ou seja, não utilizando habilidades de cognição espacial, mas sim usando representações visuais externas.

Nesse contexto, pesquisas e as iniciativas em neurociência prometem uma nova compreensão das interações entre Biologia e Educação, incluindo os mecanismos neurais de aprendizagem e desenvolvimento (Bartley *et al.*, 2019; Coch; Ansari, 2009; Goswami, 2006; Mason, 2009; Staudt, 2020). Essa relação entre a aprendizagem e o cérebro humano estudada pela neurociência cognitiva já demonstrou que, por meio de técnicas que geram imagens do cérebro, o estudo de neuroimagens proporciona respostas sobre como a aprendizagem altera a atividade cerebral de maneiras específicas (Bassett *et al.*, 2015; Mason; Just, 2016) e modifica a estrutura física do cérebro (Mårtensson *et al.*, 2012; Zatorre; Fields; Johansen-Berg, 2012).

Pesquisadores já evidenciaram que a análise de neuroimagens provenientes de ressonância magnética funcional (fMRI - *functional magnetic resonance imaging*) pode de fato medir os desenvolvimentos neurais relacionados a aprendizagem em sala de aula (Huber *et al.*, 2018; Mackey *et al.*, 2013). Esses desenvolvimentos abrem a possibilidade de as investigações neurocientíficas serem cada vez mais integradas às medições e práticas em sala de aula (Costa, 2023; Patten; Campbell, 2011). Assim, pesquisas entre Neurociência e Educação podem trazer entendimentos mais

contemporâneos acerca dos mecanismos neurais envolvidos no raciocínio químico, buscando superar dificuldades de aprendizagem.

Diante do exposto, a presente pesquisa de doutorado objetivou unir a pesquisa educacional com a neurociência cognitiva aplicando técnicas comportamentais e de neuroimagem³ para investigar as bases neurais⁴ e os mecanismos mentais⁵ envolvidos no raciocínio de químicos novatos (estudantes universitários) e químicos especialistas (professores universitários). Com os resultados obtidos nessa investigação, espera-se estabelecer possíveis relações entre as habilidades do uso de representações, as habilidades cognitivas e as regiões cerebrais associadas ao raciocínio químico, podendo-se conectar as descobertas sobre os mecanismos neurais com os fundamentos das dificuldades da aprendizagem química, a fim de superá-las.

³ Em virtude do tempo demandado para a obtenção do recurso financeiro necessário e da sequente indisponibilidade da máquina de fMRI devido a um componente danificado, os resultados de neuroimagem não foram obtidos até a conclusão dessa pesquisa. Decidiu-se em manter essa etapa como parte do delineamento metodológico da pesquisa, pois em trabalhos futuros ela pode ser executada.

⁴ As bases neurais referem-se aos mecanismos e estruturas do sistema nervoso central localizados no cérebro, responsáveis por habilitar e modular funções cognitivas específicas, tais como o raciocínio químico. Isso inclui, mas não se limita a, as regiões cerebrais associadas à percepção visual e ao processamento linguístico.

⁵ Na presente pesquisa, o termo 'mecanismos mentais' é definido como o conjunto de processos cognitivos que são ativados e sustentados pela memória de trabalho durante a resolução de problemas químicos. Estes processos envolvem habilidades cognitivas específicas, tais como a cognição espacial e o raciocínio diagramático.

1 CONTEXTO DA PESQUISA

Nesse capítulo introdutório são apresentados os aspectos que influenciaram o desenvolvimento dessa pesquisa: a justificativa, o problema de pesquisa e os objetivos geral e específicos. A partir destes pretende-se apontar a relevância e a necessidade dessa investigação no âmbito da aprendizagem química.

1.1 JUSTIFICATIVA

A representação de conceitos químicos sempre foi uma área problemática da aprendizagem química. Isso ocorre porque, nessa ciência, os fenômenos no nível macroscópico, como reações químicas, podem ser conceituados em termos de entidades submicroscópicas, como átomos e moléculas, e traduzidos em representações simbólicas, como símbolos químicos, fórmulas e equações (Wu, 2003). São esses vários níveis de representação que muitas vezes tornam a Química um assunto difícil, especialmente para os estudantes iniciantes (Bernal-Ballen; Ladino-Ospina, 2019; Fernandes; Locatelli, 2021; Johnstone, 1991).

Algumas das principais dificuldades relatadas são sobre (I) usar representações para gerar explicações; (II) traduzir uma representação em outra; e (III) fazer conexões entre representações e conceitos ou interligar a aprendizagem. De acordo com Kozma e Russell (2005), todas essas dificuldades indicam a falta de ligações entre fenômenos químicos (macroscópicos), representações (simbólicas) e conceitos relevantes (submicroscópicos).

Compreender como os químicos processam as informações, em nível neuronal, pode trazer novas perspectivas ao iluminar o processo de raciocínio e o uso das habilidades envolvidas na resolução de problemas. Na perspectiva da neurociência cognitiva, esta concebe relações dinâmicas entre comportamento, experiência e estrutura do cérebro (Greenough *et al.*, 1987; Kandel *et al.*, 2013; Kolb *et al.*, 2014).

A Química, em particular, é uma área desafiadora por requerer a aprendizagem combinada entre conhecimento do conteúdo, representações e aquisição de habilidades de resolução de problemas. No âmbito da Neurociência, a resolução de problemas já foi estudada no contexto da inferência baseada em sentenças (Prado; Chadha; Booth, 2011), da Matemática (Arsalidou; Taylor, 2011), do raciocínio

visuoespacial (Ferrer *et al.*, 2009) e da Física (Bartley *et al.*, 2019; Brewe *et al.*, 2018). Pesquisadores já evidenciaram que a análise de neuroimagens provenientes de ressonância magnética funcional (fMRI - *functional magnetic resonance imaging*) pode de fato medir os desenvolvimentos neurais relacionados a aprendizagem em sala de aula (Huber *et al.*, 2018; Mackey *et al.*, 2013).

Esses desenvolvimentos abrem a possibilidade de as investigações neurocientíficas serem cada vez mais integradas às medições e práticas em sala de aula (Costa; 2023; Patten; Campbell, 2011). Assim, considera-se relevante investigar na perspectiva da Neurociência as diferenças entre químicos novatos e químicos especialistas acerca das bases neurais e dos mecanismos mentais envolvidos na resolução de problemas químicos, podendo-se estabelecer relações que amparem o ensino de Química e superem as dificuldades de aprendizagem dessa ciência.

1.2 PROBLEMA DE PESQUISA

Sabendo-se que a Química é comumente apontada como uma ciência de difícil entendimento, principalmente por abordar temas em um nível mais abstrato (Bernal-Ballen; Ladino-Ospina, 2019; Fernandes; Locatelli, 2021; Jenkins; Howard, 2019; Johnstone, 2000; Sirhan, 2007; Talanquer, 2022), pesquisas entre Neurociência e Educação podem propiciar uma melhor compreensão de como os cérebros de novatos e especialistas elaboram o raciocínio químico, conectando-se as descobertas sobre os mecanismos neurais envolvidos com os fundamentos das dificuldades da aprendizagem química, a fim de superá-las.

Assim, a seguinte pergunta de pesquisa norteou essa investigação: *Quais as diferenças do processamento do raciocínio químico entre novatos e especialistas de diferentes âmbitos da Competência Representacional?*

1.3 OBJETIVOS

Buscando-se responder à pergunta de pesquisa desse estudo, estabeleceram-se os objetivos geral e específicos a seguir.

1.3.1 Objetivo geral

O objetivo geral do estudo foi investigar comparativamente o processamento do raciocínio químico de novatos e especialistas de diferentes âmbitos da Competência Representacional, elucidando as bases neurais e os mecanismos mentais associados a tal raciocínio.

1.3.2 Objetivos específicos

- Caracterizar os perfis representacionais de estudantes universitários de Química (novatos) e professores universitários de Química (especialistas).
- Identificar as estratégias de resolução de problemas químicos adotadas por novatos e especialistas, elucidando os mecanismos mentais (cognição espacial ou raciocínio diagramático) utilizados durante a resolução.
- Elucidar as regiões cerebrais mais ativadas durante a resolução de problemas químicos, associando o raciocínio químico a suas respectivas bases neurais.
- Estabelecer relações entre os âmbitos da Competência Representacional, a tendência do uso de cognição espacial ou raciocínio diagramático e as bases neurais apresentados por novatos e especialistas.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Nesse capítulo dedicado à revisão de literatura, são apresentados os estudos educacionais e neurocientíficos que inicialmente guiaram essa pesquisa. A fim de se conhecer as tendências metodológicas de pesquisas na interface Educação Química e Neurociência, recorreu-se a uma Revisão Sistemática de Literatura (RSL). Em um primeiro momento, detalha-se a metodologia empregada para o levantamento de documentos e, em seguida, discorre-se sobre as contribuições dos estudos identificados.

2.1 SELEÇÃO DE ESTUDOS PARA A REVISÃO SISTEMÁTICA DE LITERATURA (RSL)

Para a revisão de literatura, optou-se em empregar uma Revisão Sistemática de Literatura (RSL), guiada por Sampaio e Mancini (2007) e Denver e Tranfield (2009). Segundo estes uma RSL compreende os procedimentos de (I) elaboração da pergunta de investigação; de (II) definição do método de busca; de (III) determinação dos critérios de inclusão e exclusão de documentos; e de (IV) análise da relevância da literatura encontrada para a pesquisa. Esse tipo de investigação possibilita uma melhor orientação para as pesquisas seguintes e identifica as tendências metodológicas da área em estudo.

Objetivando-se averiguar quais as recentes perspectivas neurocientíficas para a área de Educação Química, a nível de processamento neural, a pergunta de investigação que orientou essa RSL foi: *Como as pesquisas da área de Educação Química estão aplicando métodos de neuroimagem para investigar os mecanismos neurais que sustentam a aprendizagem química?*

Limitando-se o período de busca entre os anos de 2008 e 2022 (um recorte abrangente de 15 anos foi aplicado devido a especificidade do tema), foram consultadas as bases de dados *Education Resources Information Center (ERIC)*, *Scopus*, *Scientific Electronic Library Online (SciELO)*, *Science Direct* e *Web of Science*. O acesso livre às bases foi concedido pela Universidade Luterana do Brasil

(ULBRA), realizado por meio do portal Periódicos CAPES⁶ (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Ministério da Educação).

A fim de garantir a contemplação da produção acadêmica nacional, realizou-se uma busca nos periódicos das seguintes revistas brasileiras (igualmente por meio do portal Periódicos CAPES): Educação Temática Digital, Ciência & Educação, Ensaio: Pesquisa em Educação em Ciências, Revista Brasileira de Educação, Educação e Pesquisa e *Acta Scientiae*. Tais revistas foram escolhidas por serem classificadas como periódicos A1 e A2 pelo *Qualis Periódicos CAPES*⁷ (área de Ensino, quadriênio 2013-2016). Também, a produção brasileira em teses e dissertações foi pesquisada por meio do Catálogo de Teses e Dissertações da CAPES⁸.

Os descritores empregados nas buscas foram "*Chemical Education AND Neuroscience*", "*Chemistry Learning AND Neuroscience*", "*Representational Competence AND Neuroscience*", "*Visuospatial Reasoning AND Neuroscience*" (os descritores foram aplicados apenas na língua inglesa, uma vez que as publicações científicas em língua portuguesa contam com resumo e palavras-chave em língua inglesa).

Como critérios de inclusão de documentos, definiu-se: (I) pesquisa publicada em periódico científico revisado por pares (exceto para a busca de teses e dissertações no Catálogo de Teses e Dissertações da CAPES); (II) pesquisa publicada em língua inglesa ou portuguesa; e (III) pesquisa empírica realizada no campo da Neurociência Cognitiva. Já os critérios de exclusão foram: (I) pesquisa que não aborde o ensino ou educação em Química; (II) pesquisa que não aplique método de neuroimagem; e (III) pesquisa de revisão de literatura.

Chegando-se à amostra final de documentos, estes foram organizados quanto aos autores, ano da publicação, país de origem, participantes da pesquisa, técnica utilizada para obtenção de neuroimagens e principais resultados do estudo. Podendo-se então, no corrente momento, verificar as possibilidades de consolidação e ampliação desse tipo de investigação, principalmente no contexto brasileiro.

A busca pelas publicações científicas nas bases de dados e diretamente em periódicos brasileiros resultou em um total de 105 documentos. O Quadro 1 apresenta

⁶ <https://www.periodicos.capes.gov.br>

⁷ <https://sucupira.capes.gov.br/>

⁸ <https://catalogodeteses.capes.gov.br/>

uma visão geral dos parâmetros da pesquisa e da distribuição dos estudos encontrados:

Quadro 1 - Visão geral da Revisão Sistemática de Literatura (RSL)

Pergunta de pesquisa	Como as pesquisas da área de Educação Química estão aplicando métodos de neuroimagem para investigar os mecanismos neurais que sustentam a aprendizagem?						
Período de busca	2008 a 2022						
Descritores	" <i>Chemical Education AND Neuroscience</i> "	" <i>Chemistry Learning AND Neuroscience</i> "	" <i>Representational Competence AND Neuroscience</i> "	" <i>Visuospatial Reasoning AND Neuroscience</i> "			
Crítérios de inclusão	I. Pesquisa publicada em periódico científico revisado por pares (exceto para a busca de teses e dissertações no Catálogo de Teses e Dissertações da CAPES).			II. Pesquisa publicada em língua inglesa ou portuguesa.		III. Pesquisa empírica realizada no campo da Neurociência Cognitiva.	
Crítérios de exclusão	I. Pesquisa que não aborde o ensino ou educação em Química.			II. Pesquisa que não aplique método de neuroimagem.		III. Pesquisa de revisão de literatura.	
Documentos encontrados por fonte (n = 105)	ERIC (n = 16)	Scopus (n = 0)	SciELO (n = 0)	Science Direct (n = 27)	Web of Science (n = 61)	Periódicos nacionais específicos (n = 0)	Catálogo de Teses e Dissertações da CAPES (n = 1)

Fonte: a pesquisa

Seguindo os procedimentos da revisão e realizando a exclusão das duplicatas, todos os estudos foram analisados por meio da leitura do título, resumo e metodologia. Assim, a amostra de documentos que atendiam ao objetivo da pesquisa foi reduzida para 7 documentos. Essa redução ocorreu em função do limitado número de estudos neurocientíficos empíricos voltados à área de Educação Química. O Quadro 2 apresenta a amostra final da RSL (n = 7), com as pesquisas organizadas em ordem crescente de publicação:

Quadro 2 - Amostra final de documentos da Revisão Sistemática de Literatura (RSL)

Estudo	País de origem	Participantes da pesquisa	Técnica para obtenção de neuroimagens	Principais resultados
<p>Huang e Liu (2012)</p> <p><i>“An Event-Related Potentials Study of Mental Rotation in Identifying Chemical Structural Formulas”</i></p>	Taiwan	18 estudantes universitários de Química matriculados em disciplinas de Química Orgânica	Eletroencefalograma (EEG)	Estudantes utilizam a rotação mental com mais frequência para identificar fórmulas estruturais químicas em duas dimensões (2D) do que em três dimensões (3D). Aqueles com melhor desempenho são mais eficientes ao diferenciarem figuras geométricas 2D de fórmulas estruturais químicas 2D, pois aplicam diferentes estratégias de rotação mental. Enquanto estudantes de baixo desempenho tendem a aplicar estratégias semelhantes de rotação mental tanto para figuras 2D quanto para fórmulas estruturais químicas 2D. As regiões do córtex frontal e parietal são as áreas cerebrais mais importantes para a execução da habilidade cognitiva de rotação mental.
<p>Maiato (2013)</p> <p><i>“Neurociências e Aprendizagem: o Papel da Experimentação no Ensino de Ciências”</i></p>	Brasil	3 estudantes da Educação Básica (Ensino Fundamental)	Eletroencefalograma (EEG)	Estudantes apresentam maior e mais intensa ativação de áreas corticais, em especial do córtex pré-frontal, ao participarem efetivamente de experimentos químicos. Essa ativação indica estudantes mais motivados, atentos e envolvidos com a execução da tarefa, evidenciando que atividades experimentais no ensino de Química são oportunas para mobilizar estados de atenção, percepção e formação de memórias.
<p>Just e Keller (2019)</p> <p><i>“Converging Measures of Neural Change at the Microstructural, Informational, and Cortical Network Levels in the Hippocampus During the Learning of the Structure of Organic Compounds”</i></p>	Estados Unidos da América	10 estudantes universitários de diferentes áreas sem estudo prévio de Química Orgânica em seus respectivos cursos	Ressonância magnética funcional (fMRI)	Quando participantes sem conhecimento prévio de Química Orgânica aprendem a associar a configuração espacial de um conjunto de compostos orgânicos com seus nomes, há três tipos de mudanças neurais ocorridas no hipocampo esquerdo do cérebro. A co-localização desses três tipos de mudanças neurais durante a aprendizagem de conceitos indica a centralidade de pequenas partes do hipocampo esquerdo na estabilização de novos conhecimentos.

<p>Bongers, Flynn e Northoff (2020)</p> <p><i>“Is Learning Scale-free? Chemistry Learning Increases EEG Fractal Power and Changes the Power Law Exponent”</i></p>	<p>Canadá</p>	<p>22 estudantes universitários de diferentes áreas que estavam matriculados em disciplinas de Química Orgânica</p>	<p>Eletroencefalograma (EEG)</p>	<p>Ao aprender algo visualmente complexo, como mecanismos de reações orgânicas, uma parte específica da atividade cerebral dos estudantes é aumentada - o componente fractal. Em contraste com os componentes oscilatórios do cérebro, que têm um ritmo mais regular e previsível, os componentes fractais são mais como padrões complexos e irregulares que não seguem uma frequência fixa. Ao monitorarem estudantes a longo prazo, averiguou-se que, para aprender conceitos complexos, o cérebro utiliza essa atividade fractal que é adaptável e pode se ajustar conforme a necessidade do aprendizado. A atividade fractal reflete como o conteúdo de química, que é complexo e dinâmico, exige que as representações mentais sejam reorganizadas para entender e processar as novas informações.</p>
<p>Moen <i>et al.</i> (2020)</p> <p><i>“Strengthening Spatial Reasoning: Elucidating the Attentional and Neural Mechanisms Associated with Mental Rotation Skill Development”</i></p>	<p>Estados Unidos da América</p>	<p>36 estudantes universitários de Química que estavam matriculados em disciplinas de Fundamentos de Química, Química da Vida e do Meio Ambiente ou Química Geral</p>	<p>Ressonância magnética funcional (fMRI)</p>	<p>Ao serem previamente treinados quanto à habilidade de rotação mental, estudantes realizam tarefas de raciocínio espacial de forma mais assertiva do que aqueles estudantes sem treinamento prévio (grupo controle). Estudantes previamente treinados decodificam mais informações nas tarefas e possivelmente apresentam representações mentais mais completas. Estes também apresentam maiores ativações neurais associadas à rotação mental, que podem ser observadas nas áreas cerebrais córtex motor direito e córtex lateral occipital direito.</p>

<p>Potvin <i>et al.</i> (2020)</p> <p><i>“Coexistence of Misconceptions and Scientific Conceptions in Chemistry Professors: a Mental Chronometry and fMRI Study”</i></p>	<p>Canadá</p>	<p>17 professores universitários de Química</p>	<p>Ressonância magnética funcional (fMRI)</p>	<p>Ao responderem tarefas com afirmações verdadeiras ou falsas sobre Química, professores erram mais e demoram mais a responder quando há informações equivocadas (estímulos incongruentes) do que quando há afirmações corretas (estímulos congruentes). Ao se deparar com os estímulos incongruentes, as regiões cerebrais mais ativadas são aquelas relacionadas à autorregulação de comportamentos impulsivos, à tomada de decisões, à atenção, ao planejamento executivo e à organização (regiões pré-suplementar motora, córtex pré-frontal ventrolateral e córtex pré-frontal dorsolateral).</p>
<p>Wang <i>et al.</i> (2022)</p> <p><i>“Mathematics Meets Science in the Brain”</i></p>	<p>China</p>	<p>34 estudantes universitários de Química, Física, Matemática, Computação e Engenharia Civil</p>	<p>Ressonância magnética funcional (fMRI)</p>	<p>Quando estudantes resolvem problemas de Matemática, Física e Química, algumas áreas do cérebro responsáveis por compreender espaços e imagens (rede visuoespacial - lobo frontal lateral e lobo parietal inferior) e o significado de conceitos (a rede semântica - lobo temporal lateral, lobo parietal inferior, lobo frontal inferior e lobo frontal medial) são ativadas de forma muito semelhante. Essas áreas são diferentes daquelas ativadas quando os estudantes efetuam cálculos simples ou leem frases sem contextos matemáticos ou científicos.</p>

Fonte: a pesquisa

A amostra final contém investigações realizadas entre 2012 e 2022, provenientes da América do Norte (n = 4), América do Sul (n = 1) e Ásia (n = 2). As técnicas de neuroimagem aplicadas foram eletroencefalograma (EEG - *electroencephalogram*) (n = 3) e ressonância magnética funcional (fMRI - *functional magnetic resonance imaging*) (n = 4), onde os participantes da pesquisa variaram entre 3 e 36 participantes. Estes eram estudantes ou professores universitários em seis estudos, tendo-se apenas um estudo com estudantes da Educação Básica (Ensino Fundamental).

De forma mais aprofundada, os documentos encontrados foram categorizados e discutidos na seção seguinte, analisando-se como essas investigações apontam as perspectivas neurocientíficas no corrente momento para a área de Educação Química.

2.2 CATEGORIZAÇÃO E DISCUSSÃO DOS ESTUDOS SELECIONADOS

As pesquisas desenvolvidas na interface Educação e Neurociência objetivam elucidar como ocorre o processo de aprendizagem por meio da análise dos mecanismos neurais que amparam esse processo. Resultados provenientes desse tipo de pesquisa podem se articular às teorias psicológicas e educacionais e buscar soluções para as dificuldades relacionadas à aprendizagem em diferentes áreas, como a Química (Liu; Huang, 2015).

A dimensão cognitiva da aprendizagem química envolve processos cognitivos, como a memória e a habilidade visuoespacial de rotação mental, que comumente são acessados por questionários ou entrevistas. Dada a dificuldade de se explicar verbalmente esses processos, a utilização de métodos de neuroimagem pode ampliar a compreensão acerca dos processos cognitivos envolvidos na aprendizagem (Liu; Huang, 2015; Thomas; Ansari; Knowland, 2019).

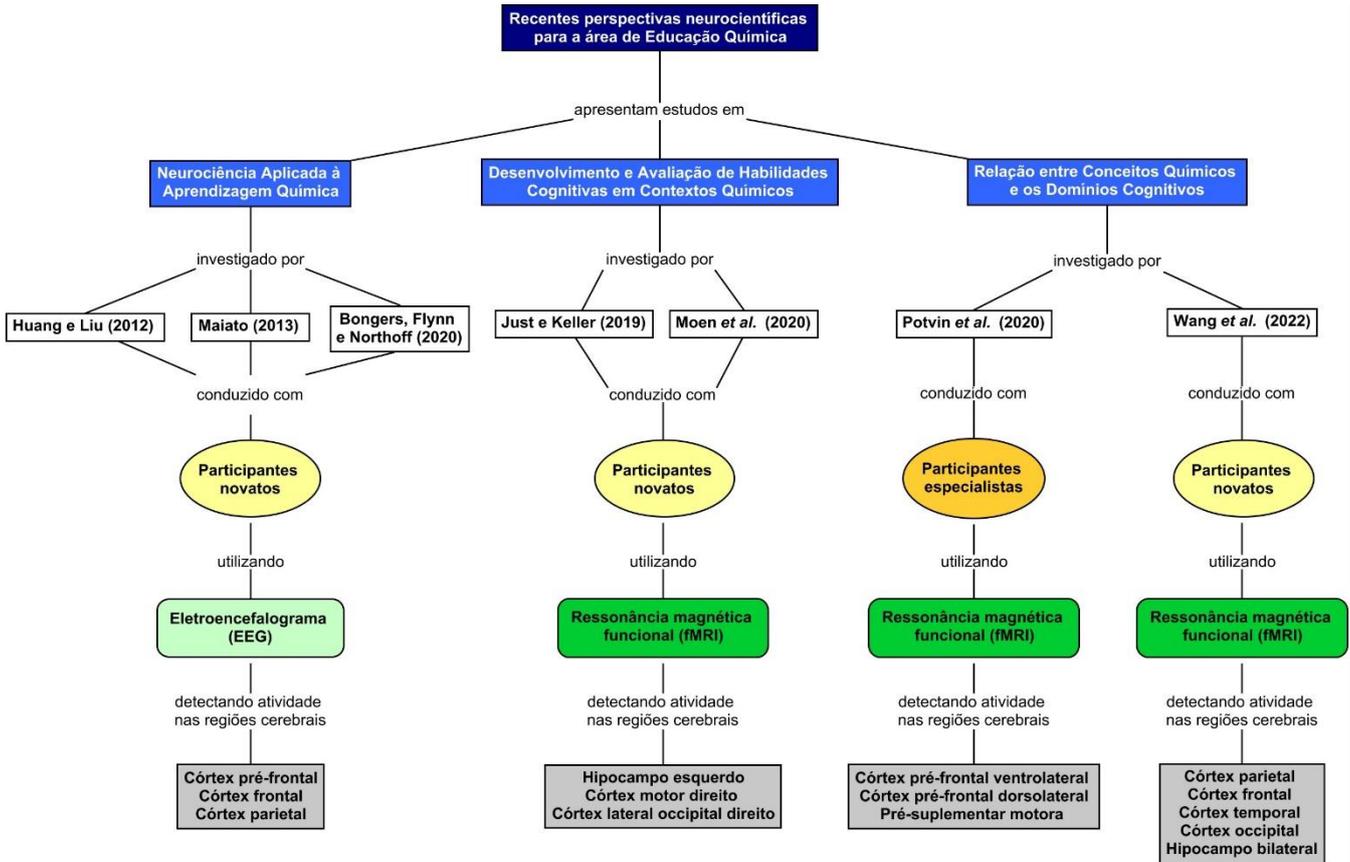
A recente revisão de literatura de Wu *et al.* (2021) evidenciou um considerável aumento nos últimos anos de pesquisas educacionais que utilizam abordagens de neuroimagem. Em um recorte temporal de 2000 a 2019, os autores selecionaram 25 artigos científicos da área de Educação (via *Web of Science* e *Scopus*) que aplicavam técnicas de neuroimagem. Foi apurado que os estudos investigaram o processo de aprendizagem por métodos de neuroimagem em três tópicos principais: Função Cognitiva (linguagem, criatividade, música e atividade física), Educação em Ciências (Matemática, Biologia e Física) e Desenvolvimento do Cérebro (paternidade e desenvolvimento de personalidade). Em relação aos artigos inseridos no tópico Educação em Ciências, os autores identificaram 6 estudos empíricos que examinaram os mecanismos neurais durante a aprendizagem: 3 estudos relacionados ao aprendizado de Matemática (desempenho numérico, processamento de número simbólico e resolução de problemas matemáticos), 2 estudos relacionados ao aprendizado de Biologia (geração de hipóteses e compreensão de hipóteses) e 1 estudo relacionado ao aprendizado de Física (erros conceituais na aprendizagem de eletricidade). Não foi relatada a identificação de artigos relacionando ao aprendizado

de Química com a utilização de métodos de neuroimagem, corroborando os resultados da presente RSL, que obteve um número limitado de documentos prevalentemente após 2019.

No âmbito nacional, a também recente revisão de literatura de Staudt (2020) investigou como as pesquisas brasileiras nas áreas de Educação e Ensino estão incorporando os avanços da área da Neurociência no campo educacional. A revisão centralizou a busca no Catálogo de Teses e Dissertações da CAPES, sem estabelecimento de recorte temporal, encontrando 10 teses e 28 dissertações (publicadas entre 2006 e 2019). O mapeamento das pesquisas revelou que os condicionantes característicos do processo de aprendizagem de maior frequência nas investigações foram: Memória (n = 26), Atenção (n = 17), Emoção (n = 16) e Plasticidade Cerebral (n = 13). Dentre os estudos selecionados, apenas 2 pesquisas averiguaram o processo de aprendizagem por métodos de neuroimagem, sendo 1 estudo relacionado à área de Letras (condicionante Memória) e 1 estudo relacionado à área de Química (condicionantes Atenção e Memória). Esse resultado vai ao encontro da busca executada na presente RSL, que identificou a mesma pesquisa brasileira relacionada à aprendizagem química.

Direcionando-se para a discussão dos estudos objetos de análise dessa revisão, os 7 documentos apresentados na seção anterior foram categorizados (*a posteriori*) em três grupos: 'Neurociência Aplicada à Aprendizagem Química', 'Desenvolvimento e Avaliação de Habilidades Cognitivas em Contextos Químicos' e 'Relação entre Conceitos Químicos e os Domínios Cognitivos', como mostra o Diagrama 1:

Diagrama 1 - Categorização dos estudos da RSL



Fonte: a pesquisa

Baseando-se nas revisões de literatura anteriormente mencionadas (Staudt, 2020; Wu *et al.*, 2021), acredita-se que a partir da categorização proposta no Diagrama 1 pode-se melhor apresentar como abordagens de neuroimagem estão sendo aplicadas em investigações acerca da aprendizagem química.

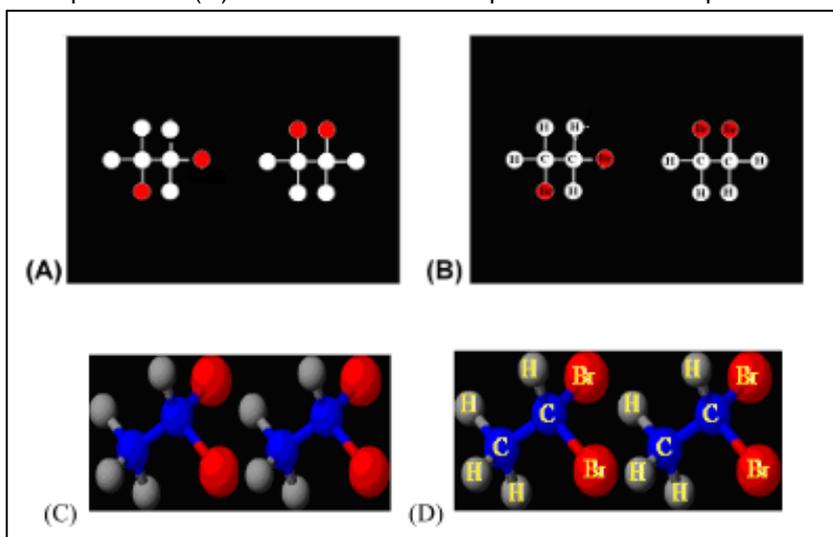
2.2.1 Recentes perspectivas neurocientíficas do processo de aprendizagem química

Os estudos que compõe essa RSL foram categorizados em grupos que refletem a área de interseção entre Neurociência e Educação Química. As pesquisas de Huang e Liu (2012), Maiato (2013) e Bongers, Flynn e Northoff, categorizadas como ‘Neurociência Aplicada à Aprendizagem Química’, exploraram como diferentes técnicas de neuroimagem (EEG) podem elucidar os processos cognitivos envolvidos na aprendizagem química. Os estudos evidenciaram as áreas cerebrais relacionadas

à compreensão de fórmulas estruturais e conceitos químicos, assim como a efetividade de estratégias de ensino.

Um exemplo de pesquisa dessa categoria é o estudo de Huang e Liu (2012), que investigou as estratégias adotadas por estudantes com baixo e alto desempenho acadêmico para identificar figuras geométricas e fórmulas estruturais químicas em duas e três dimensões (2D e 3D). Colaboraram com o estudo 18 estudantes universitários de Química matriculados em disciplinas de Química Orgânica, que participaram de um questionário conceitual de Química, de uma sessão de EEG e de uma entrevista semiestruturada. A pontuação dos participantes no questionário foi utilizada para dividi-los em dois grupos: Baixo Desempenho e Alto Desempenho. Na sessão de EEG, os estudantes visualizaram pares de figuras geométricas (2D e 3D, sem referências a elementos químicos) e pares de fórmulas estruturais químicas (2D e 3D), indicando se as imagens dos pares eram equivalentes ou não. A Figura 1 mostra alguns exemplos utilizados:

Figura 1 - Figuras geométricas e fórmulas estruturais químicas: (A) as figuras 2D são incompatíveis, (B) ambas as fórmulas estruturais químicas representam o composto $C_2H_2Br_2$, (C) as figuras 3D são compatíveis e (D) fórmulas estruturais químicas em 3D equivalentes

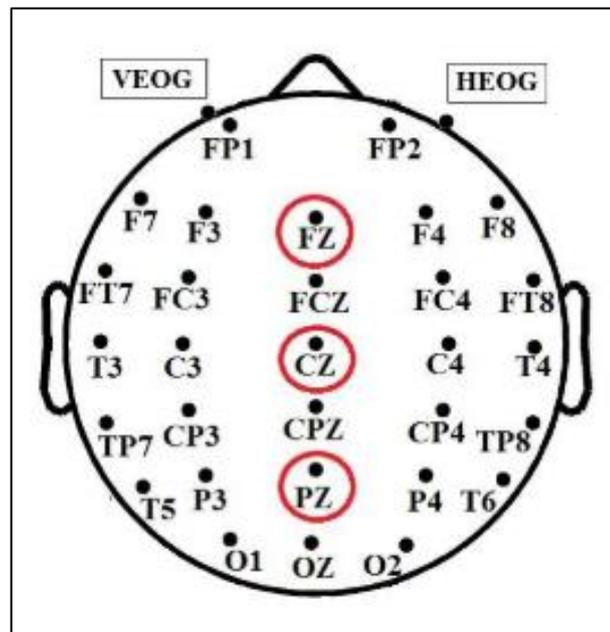


Fonte: Huang e Liu (2012)

Para o mapeamento cerebral, foram coletados dados acerca da atividade elétrica cerebral dos participantes, presumindo-se que estes estavam aplicando a habilidade cognitiva de rotação mental para distinguir os pares compatíveis. Segundo as autoras, estudos anteriores já indicaram que as regiões do córtex frontal e parietal são as áreas cerebrais mais importantes para a execução da rotação mental

(Alivisatos; Petrides, 1997; Cohen *et al.*, 1996; Núñez-Peña; Aznar-Casanova, 2009; Pegna *et al.*, 1997). Logo, foram essas as áreas monitoradas durante a sessão de EEG, como ilustra a Figura 2:

Figura 2 - Localizações dos eletrodos na linha média em um mapa cerebral: FZ (frontal zero), CZ (central zero) e PZ (parietal zero)



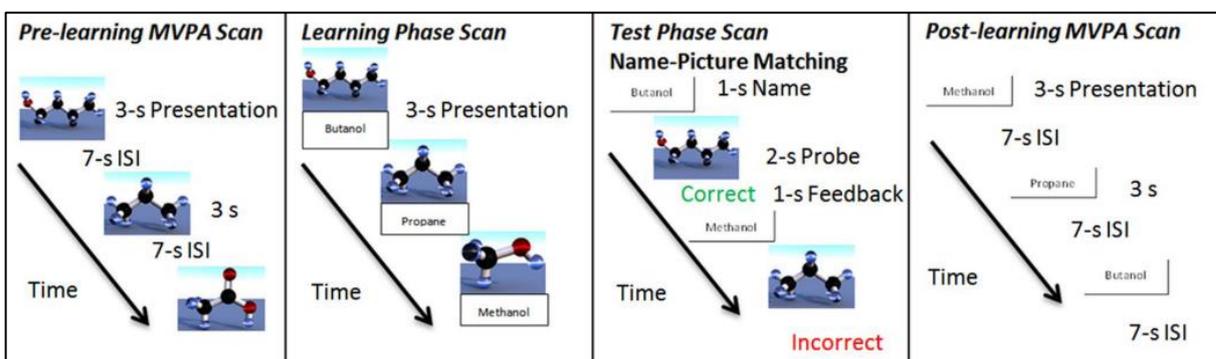
Fonte: adaptado de Huang e Liu (2012)

Após essa etapa, a entrevista semiestruturada buscou confirmar as estratégias usadas em cada grupo, sustentando os resultados do EEG. No geral, os dois grupos apresentaram resultados semelhantes na diferenciação de figuras geométricas 3D e fórmulas químicas estruturais 3D. A rotação mental foi aplicada com mais frequência na identificação de fórmulas estruturais químicas 2D. Constatou-se que os participantes do grupo Alto Desempenho usaram estratégias diferentes para a identificação de figuras geométricas 2D e fórmulas químicas estruturais 2D, enquanto os participantes do grupo Baixo Desempenho tenderam a usar estratégias semelhantes de rotação mental, dificultando a correta identificação dos pares. Os resultados indicam que algumas das dificuldades em identificar fórmulas estruturais químicas 2D se devem às estratégias inadequadas de rotação mental. As autoras sugerem a necessidade de se desenvolver estratégias de aprendizagem prévias ao ensino de Química, que possam primeiramente desenvolver as habilidades de representação por meio da rotação mental.

As pesquisas de Just e Keller (2019) e Moen *et al.* (2020) foram categorizadas como 'Desenvolvimento e Avaliação de Habilidades Cognitivas em Contextos Químicos', por investigarem como a aprendizagem de estruturas químicas orgânicas e de habilidades de rotação mental por participantes sem conhecimento prévio estão relacionadas com mudanças neurais, utilizando fMRI e métodos multimodais para avaliar esses aprendizados.

Um desses estudos, conduzido por Just e Keller (2019), elucidou as mudanças neurais ocorridas durante a aprendizagem de configuração espacial e nomenclatura de compostos orgânicos. Na pesquisa, a região cerebral do hipocampo foi o foco do estudo, pois este está fortemente relacionado à memória espacial, à codificação⁹ de novas informações em memórias de longo prazo e, também, à evocação de memórias quando necessárias (Brown *et al.*, 2014; Chadwick *et al.*, 2010; Mack *et al.*, 2016). Participaram da investigação 10 estudantes universitários de diferentes áreas, sem estudo prévio de Química Orgânica, que foram submetidos à uma sessão de fMRI. Durante a sessão, os participantes visualizaram imagens de compostos orgânicos em três dimensões (3D) e suas respectivas nomenclaturas. Na Química Orgânica, o nome do composto tem uma relação sistemática com sua estrutura, por exemplo: os prefixos -et, -prop, -but, indicam o número de átomos de carbono da cadeia principal. Assim como os sufixos -ol, -al, -ona, indicam a função principal do composto orgânico. Essa relação foi ensinada e avaliada por meio do paradigma executado durante a sessão de fMRI, esquematizado na Figura 3:

Figura 3 - Conjunto de procedimentos e tarefas executadas no paradigma da fMRI

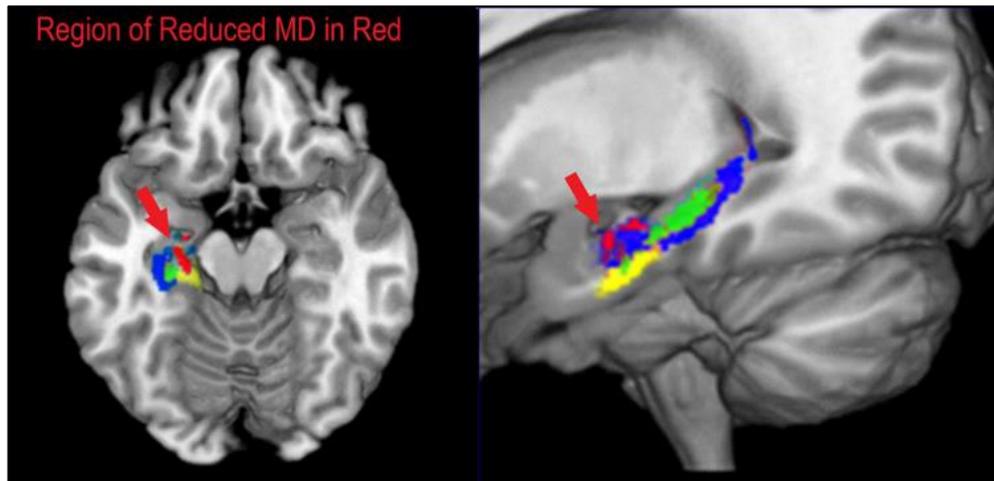


Fonte: Just e Keller (2019)

⁹ Na Psicologia Cognitiva, o termo 'codificação' se refere ao processo pelo qual a informação é transformada em um formato que pode ser armazenado na memória. Já a 'decodificação' se refere ao processo de relembrar ou interpretar a informação armazenada.

Como mostra a primeira etapa do paradigma, os estudantes visualizaram apenas a estrutura de diferentes compostos orgânicos, seguida da etapa onde a nomenclatura de cada composto era associada à estrutura. Na terceira etapa, os participantes foram solicitados a responder se os pares de estrutura e nomenclatura eram compatíveis. E ao término da tarefa, foram mostrados apenas os nomes dos compostos, onde os estudantes foram instruídos a recordar quais estruturas correspondiam a cada nomenclatura. A análise das neuroimagens atentou-se em evidenciar as mudanças ocorridas em uma pequena região do hipocampo à medida que os participantes aprendiam a associar a configuração espacial de compostos orgânicos às suas nomenclaturas. Foram observadas mudanças neurais nos níveis informacional, rede cortical e microestrutural. A mudança informacional (quando conexões nervosas são reorganizadas para acomodar uma nova informação) foi detectada em vários pontos do hipocampo esquerdo quando os participantes tentaram recordar as estruturas correspondentes a cada nome visualizado na tarefa. A mudança na rede cortical (quando há alterações nas conexões nervosas entre as diferentes áreas cerebrais) foi identificada pela comparação da conectividade funcional do hipocampo esquerdo a seis regiões parietais. Foi verificado que quatro das seis regiões parietais apresentaram um aumento de conectividade funcional com o hipocampo esquerdo entre a etapa que os estudantes visualizaram as estruturas e a etapa que eles visualizaram as estruturas com suas respectivas nomenclaturas. Já a mudança microestrutural (quando a estrutura microscópica do tecido nervoso é modificada) foi evidenciada pela diminuição da difusidade média no hipocampo esquerdo entre o início e o término da tarefa. A difusidade média é uma medida da difusão da água no tecido do hipocampo, quando há um aumento de atividade nessa região (devido à aprendizagem, por exemplo), pode haver uma diminuição na difusividade média. A Figura 4 apresenta a identificação dessa mudança microestrutural:

Figura 4 - Região do hipocampo esquerdo (em vermelho) mostrando a diminuição da difusividade média (MD) após a aprendizagem



Fonte: Just e Keller (2019)

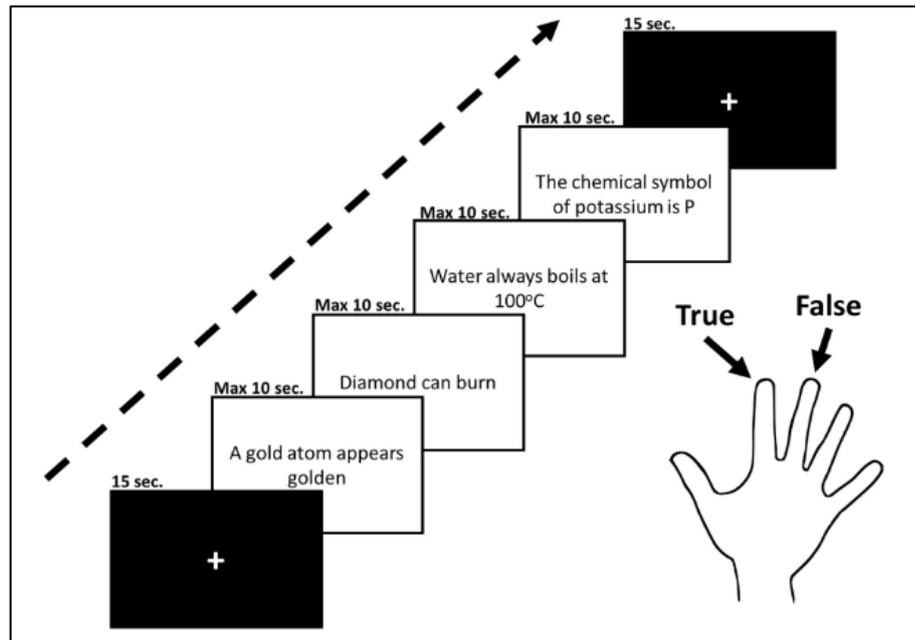
A co-localização dessas três mudanças durante a aprendizagem de conceitos destaca a centralidade do hipocampo esquerdo no estabelecimento de novos conhecimentos e esclarece os mecanismos de aprendizagem envolvidos. Segundo os autores, as descobertas da neurociência cognitiva, como a identificação da representação neural de um novo conceito, possibilitam que tradicionais métodos de ensino sejam atualizados.

Por fim, os estudos publicados por Potvin *et al.* (2020) e Wang *et al.* (2022) foram agrupados na categoria 'Relações entre Conceitos Químicos e Domínios Cognitivos', pois utilizaram cronometria mental e sessões de fMRI para investigar a coexistência de concepções errôneas e científicas entre professores de química e examinar as relações neurais entre conceitos matemáticos e científicos, relacionando-os com os diferentes domínios cognitivos da aprendizagem química.

Presente nessa categoria, a pesquisa de Potvin *et al.* (2020) investigou a coexistência de conceitos científicos e conceitos errôneos em respostas produzidas por especialistas químicos. Participaram do estudo 17 professores universitários de Química, que responderam um questionário no modelo 'verdadeiro ou falso'. Em algumas afirmações foram adicionados erros conceituais comuns à Química (por exemplo, "a força de um ácido depende de sua concentração"). As questões foram divididas entre coerentes e incoerentes, esta última caracterizada pela presença de informações que podem desviar a atenção dos especialistas a afetar a capacidade de responder corretamente. A aplicação do questionário ocorreu durante uma sessão de fMRI, verificando-se o tempo de resposta e as áreas cerebrais ativadas. A Figura 5

exemplifica o protocolo utilizado em um bloco de afirmativas com equívocos (estímulos incongruentes):

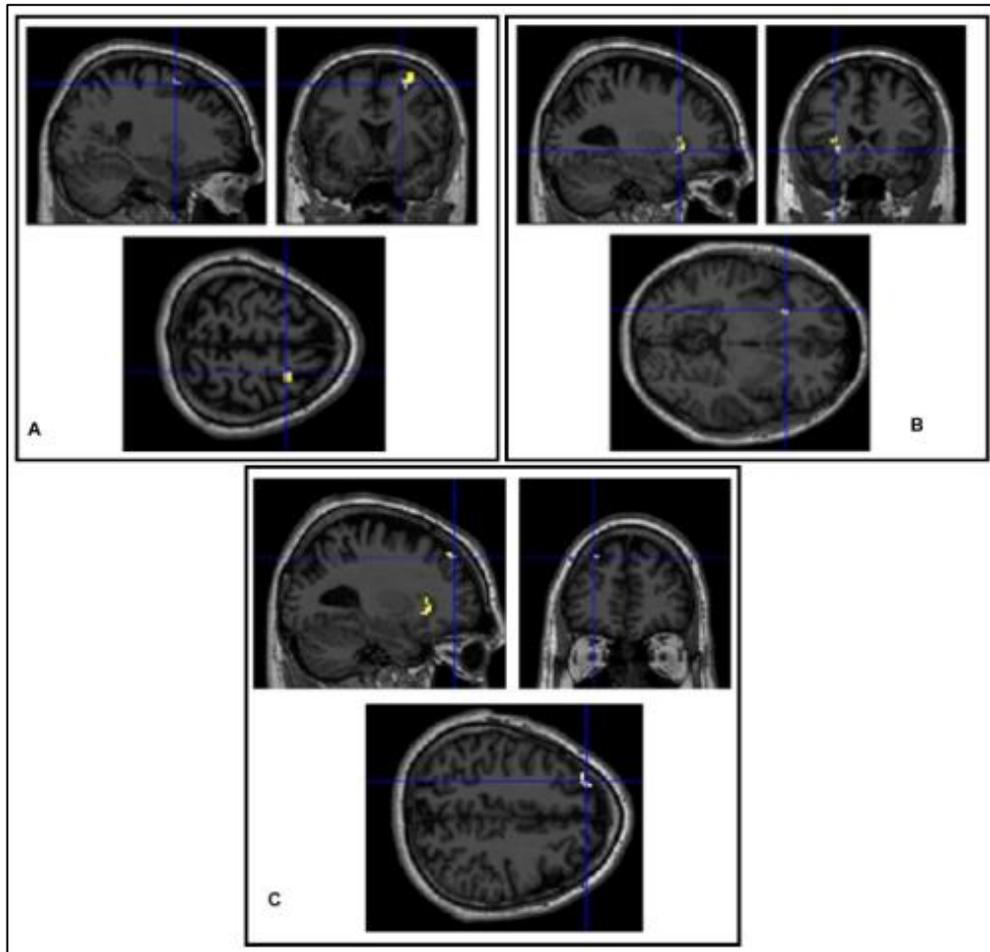
Figura 5 - Exemplo de um bloco de estímulo incongruente executado no paradigma da fMRI



Fonte: Potvin *et al.* (2020)

Os resultados mostraram que, ao responderem as questões, os professores erraram mais e demoram mais a responder quando se tratavam de afirmações com informações equivocadas. E ao se depararem com esses estímulos incongruentes, as regiões cerebrais mais ativadas na sessão de fMRI foram a pré-suplementar motora, o córtex pré-frontal ventrolateral e o córtex pré-frontal dorsolateral, ilustradas na Figura 6:

Figura 6 - Ativação das regiões (A) pré-suplementar motora, (B) córtex pré-frontal ventrolateral e (C) córtex pré-frontal dorsolateral durante os blocos de estímulos incongruentes



Fonte: Potvin *et al.* (2020)

Essas regiões estão envolvidas na autorregulação de comportamentos impulsivos, na tomada de decisões, na atenção, no planejamento executivo e na organização. Com esses dados, os autores corroboraram a hipótese de que a presença de equívocos em tarefas de Química pode interferir na produção de respostas científicas, mesmo se tratando de químicos especialistas.

Em suma, os estudos apresentados nessa RSL apresentam como principal resultado a identificação de processos cognitivos específicos, como a ativação de áreas corticais, fundamentais para o aprendizado químico. Percebe-se que as pesquisas no âmbito da Neurociência vêm proporcionando um novo entendimento sobre os processos cognitivos e elucidando as propriedades neurais envolvidas no aprendizado químico. Apesar das pesquisas disponíveis na literatura envolverem ainda investigações muito exploratórias e descritivas com uma base de dados limitada, estudos envolvendo a aprendizagem química e de que forma ela ocorre no

cérebro podem explicar o processo de ensino-aprendizagem de uma forma diferente do que tem sido compreendido até agora.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

Apresentam-se nesse capítulo os subsídios teóricos que embasaram o caminho percorrido na presente pesquisa. Primeiramente, abordando-se o processo de aprendizagem como um todo, apresenta-se a Teoria dos Esquemas na perspectiva de Barlett (1932), uns dos primeiros a sugerir o conceito de esquema, propondo como a mente organiza e interpreta informações. Por também utilizar o conceito de esquema, a Teoria do Desenvolvimento Cognitivo de Piaget (1971, 1973, 1977) é brevemente discutida junto à Teoria dos Esquemas. Em ambas as teorias, o papel da memória de trabalho é relevante, apresentando-se então o modelo tripartido de memória de Baddeley (1986).

Encaminhando-se para a aprendizagem química, o uso de representações (símbolos, fórmulas, equações e estruturas) para apoiar a compreensão de processos químicos é abordado, assim como as dificuldades em transitar entre essas possíveis representações. As competências envolvidas no uso de representações para pensar, comunicar e agir sobre fenômenos químicos e físicos são descritas no aporte teórico Competência Representacional (CR) de Kozma e Russell (1997, 2005), onde também se apresentam as diferenças entre químicos novatos e químicos especialistas.

Visto que a presente investigação buscou evidências acerca das bases neurais e dos mecanismos mentais envolvidos no raciocínio químico, por meio de técnicas comportamentais e de neuroimagem, aborda-se também nesse capítulo aspectos da neurociência cognitiva envolvidas na aprendizagem química, como a cognição espacial e o raciocínio diagramático. E como técnicas da Neurociência estão sendo utilizadas para melhor compreender como conteúdos científicos são decodificados na memória.

3.1 TEORIA DOS ESQUEMAS: UMA PERSPECTIVA CONSTRUTIVISTA DA MEMÓRIA

O processo de aprendizado envolve processos mentais internos e a aquisição de representações mentais na forma de estruturas cognitivas chamadas 'esquemas'. Estudos sobre atenção e aprendizagem (Souza; Oberauer, 2016; Valenti; Galera, 2020) apontam a relevância de aprender fazendo conexões entre novos conceitos e esquemas existentes na chamada memória de longo prazo. Quando algo é ensinado,

espera-se que os indivíduos construam uma rede complexa de conceitos interconectados na memória de longo prazo, acessando-os quando necessário. No entanto, a experiência em sala de aula indica que muitas vezes o que é ensinado nem sempre é o que é aprendido (O' Dwyer; Childs, 2017; Johnstone, 2000; Talanquer, 2022).

A memória é um dos conceitos mais importantes no aprendizado, se os conteúdos ou assuntos não forem lembrados, o aprendizado então não foi concretizado. Uma das propostas sobre a organização da memória é a Teoria dos Esquemas de Barlett (1932), uma teoria cognitiva da representação mental. O conceito de esquema é central para as primeiras teorias cognitivas de representações, sendo inicialmente usado por Piaget no início dos anos 1930. Piaget propôs que um indivíduo aprende usando esquemas existentes que são acomodados ou assimilados. Barlett (1932) também foi um dos primeiros a propor o conceito de esquema, pois em seus estudos sobre memória, sugeriu que esta assume a forma de esquemas que fornecem uma estrutura mental para entender e lembrar as informações. Mais tarde, Anderson (1977) e Rumelhart (1980) definiram esquema como "uma estrutura de dados para representar os conceitos genéricos armazenados na memória".

Na Teoria dos Esquemas proposta por Barlett (1932), o conhecimento que se tem armazenado na memória é organizado como um conjunto de esquemas ou representações mentais, cada um dos quais incorpora todo o conhecimento de um determinado tipo que se adquire a partir de uma experiência prévia. A teoria fornece uma explicação para a estrutura do conhecimento e enfatiza o fato de que o que é lembrado é influenciado pelo que já se sabe (Rumelhart; Norman, 1981).

Os esquemas são utilizados para organizar o conhecimento, auxiliar no resgate de informações e propiciar sentido a novas experiências. A memória pode ser reestruturada por meio da integração da experiência atual com o conhecimento prévio, onde um esquema pode mudar ao longo do tempo como resultado de nova experiência e aprendizado. Há na literatura diversas descrições do que são esquemas (Anderson, 1977; Rumelhart; Norman, 1981; Winn, 2002; Winn; Snyder, 1996), no entanto, todas as descrições concordam que um esquema possui as seguintes características: (I) é uma estrutura de memória organizada, contendo a soma de todos os conhecimentos; (II) é uma representação mais abstrata do que uma experiência perceptual direta; (III) é uma rede, composta por conceitos que estão ligados entre si; (IV) é dinâmico, sujeito a mudanças pela experiência geral ou por instrução; e (V)

fornece um contexto para interpretar novos conhecimentos, bem como uma estrutura para mantê-los.

A abstração é a característica que torna o esquema algo tão importante ao aprendizado, pois codificar cada característica de cada experiência coloca uma alta demanda na capacidade de memória e nos recursos de processamento cognitivo (Pinker, 1985). O aprendizado requer a modificação de esquemas para que eles possam acomodar com precisão instâncias incomuns, enquanto ainda mantêm um nível de especificidade que os torna úteis (Winn, 2002). Como os esquemas são estruturas dinâmicas, a memória e a compreensão do mundo mudam à medida que novas experiências são interpretadas.

Como mencionado anteriormente, Piaget (1971, 1973, 1977) chamou esses processos de assimilação e acomodação. Esses dois processos interagem dinamicamente em uma tentativa de alcançar o equilíbrio cognitivo. O desenvolvimento cognitivo ocorre à medida que os esquemas mudam quando se acomodam a novas informações no ambiente e à medida que novas informações são assimiladas por eles. No subcapítulo a seguir, discute-se as concepções da Teoria do Desenvolvimento Cognitivo de Piaget presentes na Teoria dos Esquemas.

3.1.1 Relações entre a Teoria dos Esquemas e a Teoria do Desenvolvimento Cognitivo de Piaget

A Teoria do Desenvolvimento Cognitivo de Piaget foi fundamental para o entendimento do desenvolvimento cognitivo, propondo como um indivíduo assimila e compreende conceitos complexos. Piaget (1971, 1973, 1977) explorou a premissa de que existe uma maturação necessária para que as crianças assimilem certas ideias, questionando se seria possível a aquisição de conceitos antes de alcançarem um nível apropriado de desenvolvimento cognitivo. Essa teoria é composta por dois aspectos fundamentais: o processo pelo qual o desenvolvimento cognitivo ocorre e os estágios específicos que marcam esse progresso. As observações de Piaget elucidaram como a criança, ao crescer, vai construindo suas estruturas cognitivas ou esquemas.

Segundo a teoria piagetiana, à medida que os esquemas de um indivíduo vão melhorando, maior é a sua capacidade cognitiva, permitindo-lhes uma melhor adaptação ao ambiente. Ele detalhou os mecanismos de assimilação e acomodação como processos essenciais nessa adaptação, com a assimilação referindo-se à

incorporação de novas informações em esquemas já existentes e a acomodação à modificação destes esquemas ou à criação de novos em resposta a novos conhecimentos. Além disso, Piaget introduziu o conceito de equilíbrio para explicar como as crianças conseguem transitar de um estágio de pensamento para outro, mantendo o equilíbrio entre o uso do conhecimento adquirido e a adaptação a novas informações.

Os estágios de desenvolvimento propostos por Piaget (1971, 1973, 1977) - sensório-motor (do nascimento até 2 anos), pré-operatório (2 a 7 anos), operatório concreto (7 a 11 anos) e operatório formal (11 a 15 anos) - descrevem um percurso dos avanços cognitivos nos quais surgem novas habilidades de processamento de informações. Esses estágios refletem a evolução da mente da criança, desde a exploração do mundo por meio dos sentidos e ações até o ponto em que são capazes de lidar com abstrações e hipóteses complexas.

De acordo com esses quatro estágios do desenvolvimento cognitivo, os participantes do presente estudo (acima de 19 anos) são indivíduos que já passaram pelo estágio operatório formal e são capazes de pensar abstratamente e de usar logicamente as representações relacionadas aos conceitos abstratos da Química. Ao se relacionar a Teoria do Desenvolvimento Cognitivo de Piaget (Piaget, 1971, 1973, 1977) à Teoria dos Esquemas (Barlett, 1932), verifica-se que ambas reconhecem a semelhança nos processos de transformação e aquisição de esquemas. Estas ainda reforçam a ideia de que, independentemente da terminologia (esquema ou estrutura cognitiva), os elementos que constituem o entendimento cognitivo situam-se na memória de longo prazo e são influenciados por conhecimentos prévios. Isso demonstra a interdependência entre o que já se sabe e o que se está aprendendo, indicando a importância que o conhecimento anterior desempenha no processo de assimilação de novas informações.

Nas duas teorias o desenvolvimento cognitivo é compreendido como um processo contínuo e dinâmico, conectando as novas informações com os esquemas cognitivos já existentes. Essa compreensão além de propor como ocorre o desenvolvimento cognitivo, influenciou posteriormente outras teorias construtivistas, como a Teoria da Aprendizagem Significativa de Ausubel (1963, 1968).

Ambas as teorias destacam que, com o passar do tempo, os esquemas se tornam mais elaborados e adaptativos. Na teoria de Bartlett (1932), os esquemas são estruturas cognitivas que auxiliam a compreensão, o processamento e o

armazenamento das informações na memória. Conforme novas experiências são adquiridas, os esquemas existentes podem ser modificados ou novos podem ser produzidos para acomodar essas informações. Isso significa que, ao longo do tempo, os esquemas tornam-se mais complexos, refletindo um acúmulo e uma reorganização do conhecimento baseado em novas experiências e aprendizados. Já Piaget em sua teoria (1971, 1973, 1977) evidenciou o desenvolvimento cognitivo por meio de estágios, argumentando que os esquemas cognitivos evoluem de operações concretas para formas mais abstratas do pensamento. Esse desenvolvimento é marcado por processos de assimilação, onde novas informações são integradas aos esquemas existentes, e acomodação, onde os esquemas são ajustados ou novos esquemas são construídos em resposta a novas experiências. Com o tempo, isso resulta em uma capacidade crescente para abstração e raciocínio lógico, permitindo uma manipulação mais complexa de ideias abstratas (Meylani, 2024; Pudhiyidath *et al.*, 2020).

Observando-se a importância do papel da memória para ambas as teorias, considerou-se relevante apresentar no subcapítulo seguinte a construção dos modelos da memória humana, mais especificamente a memória de trabalho.

3.1.2 O modelo tripartido de memória de Baddeley

Entre as décadas de 1950 e 1960, as primeiras teorias da memória humana apresentavam um modelo dual simples, no qual as informações são processadas em um sistema de memória de curto prazo antes de serem transferidas para um armazenamento de memória de longo prazo (Atkinson; Shiffrin, 1968). Enquanto os psicólogos consideravam as informações na memória de longo prazo relativamente estáveis e, logo, permanentes, acreditava-se que a memória de curto prazo era adaptável e facilmente manipulada durante o aprendizado.

O modelo dual afirmava que, para aprender e lembrar a forma de uma molécula química, por exemplo, o estudante primeiro geraria uma representação mental da molécula na memória de curto prazo ao estudar um diagrama molecular. Para vincular a forma da molécula com o armazenamento de longo prazo, o estudante então empregaria um processo de ensaio, como visualizar repetidamente a estrutura molecular. Após vincular a estrutura com a memória de longo prazo, o modelo dual

afirmava que as informações estariam disponíveis para posterior transferência para a memória de curto prazo para resolução de problemas ou simples recordação.

Embora o modelo dual tenha se mostrado eficiente por um tempo, várias falhas em suas hipóteses tornaram-se aparentes com a divulgação de novos estudos (Greene; Naranjo, 1986). Nesse contexto, a partir da década de 1970, iniciou-se um movimento para reformular o entendimento da memória de curto prazo, que até então era vista simplesmente como um sistema de armazenamento temporário. Dentre os pesquisadores desse movimento, destacam-se Baddeley e Hitch (1974), que propuseram o chamado modelo da memória de trabalho (ou memória operacional) para elucidar como as informações são mantidas temporariamente enquanto processos cognitivos são realizados.

Surgiu então o modelo mais estudado nas abordagens cognitiva, neuropsicológica e de neuroimagem: o modelo tripartido da memória de trabalho de Baddeley (1986), que propõe que a memória de curto prazo não funciona como um sistema unitário e sim como um sistema tripartido, composto de um controlador atencional - executivo central (*central executive*), e dois subsistemas especializados no processamento e manipulação de quantidades limitadas de informações - a alça fonológica (*phonological loop*) e o esboço visuoespacial (*visuospatial sketchpad*).

O executivo central é responsável por controlar e selecionar todas as informações que chegam ao cérebro pelas vias auditiva e visual. A alça fonológica é encarregada de armazenar e manipular informações baseadas na linguagem falada e divide-se em dois subcomponentes essenciais: o armazenamento fonológico, que capta informações tanto de forma direta (audível) quanto indireta (visual); e o processo de reverberação, que ocorre de maneira serial e em tempo real, com o propósito de impedir a perda natural das informações contidas no armazenamento fonológico. Já o esboço visuoespacial, trabalha com as propriedades visuais e espaciais dos objetos e é composto por dois elementos: o armazenador visual (*visual cache*), onde as características físicas dos objetos são representadas, e o mecanismo espacial (*inner scribe*), empregado no planejamento de movimentos e na atualização das informações mantidas em armazenamento (Gathercole, 1998; Logie, 1995; Matlin, 2004).

Numa revisão do modelo, Baddeley (2000) introduziu um novo componente, o *buffer* episódico. Este atua como um armazenador para a integração de informações originadas tanto nos subsistemas fonológicos e visuoespacial quanto na memória de

longo prazo, consolidando-as em uma representação episódica única. Nessa versão, o executivo central desempenharia a função de recuperar as informações integradas no *buffer* episódico sob a forma de "consciência", além de manipular e alterar esses dados quando necessário, com o objetivo de construir episódios lógicos (Matlin, 2004).

Em suma, o modelo tripartido da memória de trabalho de Baddeley (1986) amplia a visão da memória de curto prazo, mostrando que ela não é apenas um armazém temporário, mas um espaço onde ocorre o processamento ativo da informação. Ao se relacionar o aprendizado de Química com o modelo tripartido, percebe-se porque diversos estudos (Bongers; Northoff; Flynn, 2019; Carlisle; Tyson; Nieswandt, 2015; Southam; Lewis, 2013; Wu; Shah, 2004) consideram a visualização espacial algo essencial para a compreensão de conceitos espaciais, uma vez que o subsistema visual (esboço visuoespacial) na memória de trabalho desempenha um papel importante na maneira como os estudantes processam, retêm e utilizam informações visuais e espaciais.

Apesar disso, deve-se observar que o modelo tripartido não se restringe apenas ao processamento visuoespacial, mas também ao processamento verbal. Juntos, eles trabalham na manipulação de informações que pode incluir a decodificação de conceitos químicos que não são exclusivamente visuais ou espaciais. Por isso, embora a visualização espacial seja historicamente considerada fundamental para a resolução de problemas químicos, pode-se argumentar que uma baixa habilidade visuoespacial pode ser compensada pelo processamento das informações na memória de trabalho verbal.

Destaca-se que o presente trabalho adota o modelo tripartido da memória de trabalho de Baddeley (1986) para fundamentar o processamento visuoespacial e verbal de informações na Química. No entanto, a suposição de que o aprendizado químico depende exclusivamente da capacidade de processar informações visuais ou verbais pode limitar o entendimento de como estudantes com deficiências visuais ou auditivas aprendem. Pode-se empregar estratégias adaptativas e tecnologias assistivas para facilitar o aprendizado de Química por esses estudantes, dentro do modelo tripartido da memória de trabalho de Baddeley.

Para estudantes cegos, por exemplo, pode-se usar materiais táteis e descrições verbais detalhadas, como modelos moleculares tridimensionais que podem ser manipulados quanto a estrutura espacial das moléculas, ativando o subsistema de memória de trabalho visual por meio de estímulos táteis. Assim como

a utilização de *software* de leitura de tela e descrições verbais detalhadas das representações moleculares, que podem fortalecer o processamento no subsistema verbal sem a necessidade de visualização direta. Tratando-se da adaptação do ensino de Química para estudantes surdos, pode-se maximizar o uso de representações visuais e materiais escritos, complementados por linguagem de sinais e outras formas de comunicação visual. Isso permite que esses estudantes aproveitem plenamente o subsistema visual da memória de trabalho para processar informações espaciais e conceituais. Além disso, a incorporação de textos e recursos visuais detalhados auxilia no entendimento de conceitos abstratos, facilitando a decodificação de representações moleculares complexas (Braun *et al.*, 2018; Ediyanto; Kawai, 2019; Lynn *et al.*, 2019; Rodrigues *et al.*, 2020).

3.2 USO DE REPRESENTAÇÕES NA QUÍMICA

O aprendizado de Química propicia a compreensão não apenas das transformações e dos processos químicos, como também a construção de um conhecimento científico relacionado às aplicações tecnológicas e suas implicações ambientais, sociais, políticas e econômicas (Brasil, 2013). Por ser considerada a mais visual das ciências (Habraken, 1996), a Química é comumente apontada por estudantes como uma disciplina de difícil entendimento, principalmente por abordar temas em um nível mais abstrato (Jenkins; Howard, 2019; Johnstone, 2000; Sirhan, 2007; Talanquer, 2022). Realmente, os processos químicos estão em um nível submicroscópico que impossibilita a observação direta. Para compreender e manipular objetos no nível submicroscópico, os químicos geraram uma série de símbolos, figuras, fórmulas e diagramas bidimensionais para representar entidades e fenômenos químicos tridimensionais (Stieff *et al.*, 2016).

As representações geradas por químicos (como diagramas e estruturas moleculares) e por instrumentos (como espectros de massa), estão entre os sistemas físicos historicamente construídos pela comunidade científica para apoiar a compreensão de processos químicos (Schank; Kozma, 2002). Em livros e artigos científicos, por exemplo, as representações químicas, como símbolos, fórmulas, equações e estruturas, são comumente utilizadas para descrever e explicar reações e fenômenos químicos. Assim, estar familiarizado com essas representações e seu

uso na Química é essencial para se tornar um especialista na área (Kozma *et al.*, 2000; Kozma; Russell, 1997).

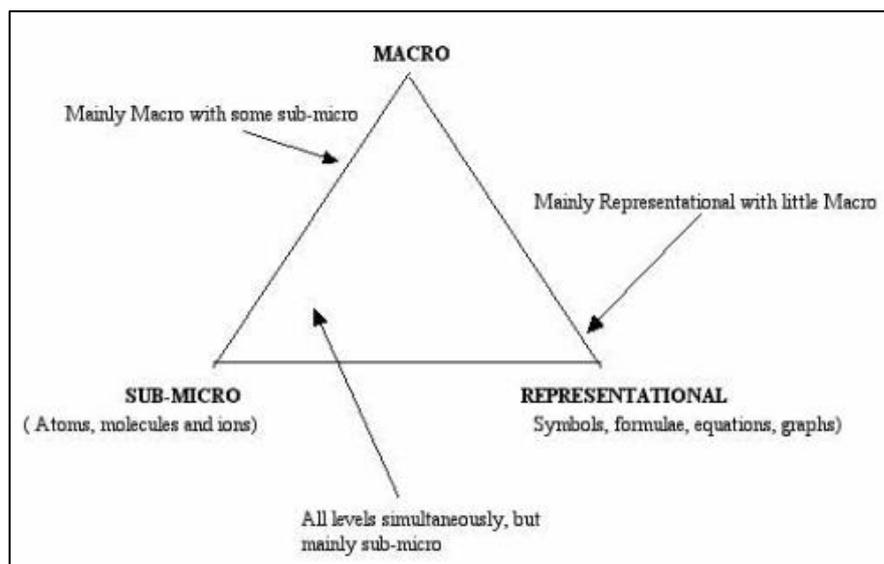
As representações, sejam elas na forma de símbolos, modelos, diagramas ou gráficos, fornecem informações que auxiliam os químicos a visualizar as partículas do mundo microscópico. Ao se utilizar, por exemplo, representações químicas por meio de modelos de “bola e bastão”, que são visíveis e tangíveis, fornece-se uma percepção mais concreta do que acontece com os átomos e as moléculas durante uma reação química (Heitzman; Krajcik, 2005; Stieff *et al.*, 2016; Talanquer, 2022).

Segundo Kozma e Russell (2005), há dois tipos de representações que os químicos usam para compreender os fenômenos químicos: as internas (representações mentais) e as externas (expressões simbólicas). Os autores referem-se às representações internas como conceitos ou princípios que foram codificados, modificados e armazenados no cérebro. Já as representações externas seriam os desenhos, equações e gráficos, que são ferramentas de comunicação. Uma das mais clássicas classificações sobre a representação química da matéria foi proposta inicialmente por Johnstone (1982), que será detalhada no subcapítulo seguinte.

3.2.1 Os três níveis de representação química da matéria

Johnstone (1982) propôs que a matéria pode ser representada quimicamente em três níveis: macroscópico, submicroscópico e representacional (ou simbólico), como mostra a Figura 7. Para o autor, os níveis macroscópicos e submicroscópicos de representação da matéria são de fato a realidade e não uma representação.

Figura 7 - Os três níveis de representação química da matéria



Fonte: Johnstone (2006)

O nível submicroscópico é tão real quanto o nível macroscópico, onde apenas a escala os diferencia. O fato de o nível submicroscópico não poder ser visto facilmente o torna de difícil compreensão e até mesmo aceitação (Chittleborough, 2004).

As representações macroscópicas descrevem propriedades de fenômenos tangíveis e visíveis em experiências cotidianas, como mudanças de cor, formação de gases e precipitação em reações químicas. As representações submicroscópicas fornecem explicações ao nível das partículas, como a descrição do movimento de elétrons, átomos ou moléculas. Esses elementos submicroscópicos são reais, mas muito pequenos para serem observados, então pode-se descrever suas características e comportamentos usando representações simbólicas para construir imagens mentais (Johnstone, 1982). As representações simbólicas envolvem o uso de símbolos químicos, fórmulas e equações, bem como estruturas moleculares, desenhos, diagramas, modelos e animações de computador para simbolizar a matéria (Barak; Dori, 2005; Chandrasegaran; Treagust; Mocerino, 2009).

Todos os três níveis de representação química da matéria são essenciais para a compreensão de conceitos químicos. Por isso, diversos estudos já elucidaram as dificuldades de estudantes e até mesmo professores de moverem-se entre os diferentes níveis de representação (Bernal-Ballen; Ladino-Ospina, 2019; Byers, 2018; Gabel, 1993; Kozma; Russell, 2005; Scheid *et al.*, 2018; Sim, Daniel, 2014; Yarroch, 1985). Segundo Johnstone (1997), o ensino dos três níveis de representação deve

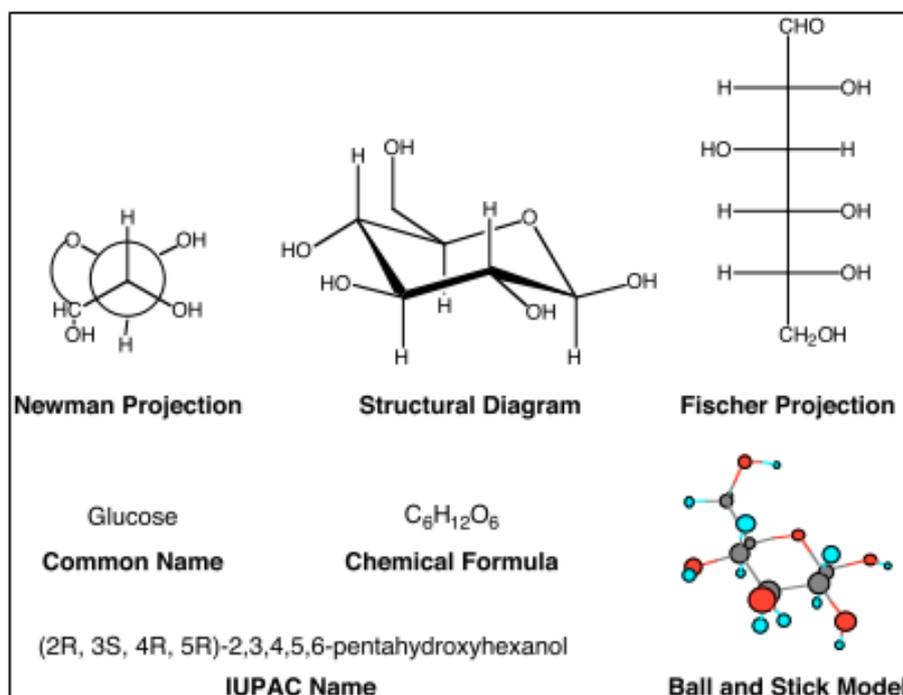
ser desenvolvido de forma gradual, não sendo recomendada a introdução dos três níveis simultaneamente para estudantes que estejam iniciando na Química.

3.2.2 Dificuldades em transitar entre diferentes representações

O aprendizado da química é considerado desafiador devido à natureza abstrata do nível submicroscópico (Gabel, 1999; Gilbert; Treagust, 2009; Johnstone, 1991; O' Dwyer; Childs, 2017; Talanquer, 2022). Para contornar essa limitação e possibilitar a compreensão dos conceitos químicos, como já descrito no subcapítulo anterior, há uma série de representações - símbolos, figuras, fórmulas e diagramas bidimensionais - para simbolizar conceitos e fenômenos químicos tridimensionais. Essas representações são fundamentais para o processo de ensino-aprendizagem de Química, onde os estudantes aprendem a decodificar a tridimensionalidade necessária às representações moleculares e a transitar entre os diferentes níveis de representação (Stieff *et al.*, 2016).

Químicos novatos, como os estudantes, enfrentam dificuldades em se adaptar à complexidade das representações químicas, particularmente ao adentrar no estudo de Química Orgânica (Bongers *et al.*, 2020; Stieff, 2007; Stieff; Raje, 2010). Nessa área, é exigido o domínio de diagramas estruturais, projeções em diferentes perspectivas (traço e cunha, Fischer, Newman), mapas de densidade eletrônica e espectros de ressonância magnética nuclear. A Figura 8 mostra alguns exemplos das diferentes representações empregadas no aprendizado de Química Orgânica:

Figura 8 - Exemplos de representações moleculares comuns apresentadas em Química Orgânica



Fonte: Stieff *et al.* (2016)

A utilização de múltiplas representações é determinada pela relevância dos detalhes conceituais que cada uma pode evidenciar, permitindo ao mesmo tempo a omissão de outros. A literatura indica que estudantes, mesmo em estágios avançados, muitas vezes não conseguem interpretar ou transitar adequadamente entre a variedade de representações possíveis (Bodner; Domin, 1995; Kozma; Russell, 2005; Scheid *et al.*, 2018). Essas dificuldades em transitar entre os diferentes níveis de representação química da matéria já foram elucidadas por pesquisadores como decorrência de indivíduos com baixa habilidade visuoespacial (Heitzman *et al.*, 2004; Wu; Krajcik; Soloway, 2001) ou que utilizam pouco as diferentes representações químicas (Kozma; Russell, 1997; Sim, Daniel, 2014).

Historicamente, a cognição espacial, mais especificamente a visualização espacial, é apontada como componente chave para o aprendizado de Química. É possível encontrar estudos que exploraram a relação entre a habilidade visuoespacial e o desempenho acadêmico de estudantes desde os anos 1980 (Bodner; Guay, 1997; Carter *et al.*, 1987; Small; Morton, 1983; Stieff, 2012; Tsaparlis; Pappa; Byers, 2018; Wu; Krajcik; Soloway, 2001).

Mas, como aponta Raupp (2015), a questão da visualização para o aprendizado de Estereoquímica, por exemplo, já é investigada desde os anos 1940.

Em sua revisão de literatura, a autora apresenta estudos (Beauchamp, 1984; Evans, 1963; Fromm, 1945; Shine, 1957) que investigaram as dificuldades envolvidas nesse tópico tão importante à Química Orgânica. Percebe-se que desde esses estudos precursores, a habilidade visuoespacial e a capacidade de transitar entre as diferentes representações são sinalizadas como essenciais para a resolução de problemas que envolvem aspectos tridimensionais de moléculas. Contudo, a elucidação sobre os motivos que impedem os estudantes de visualizarem relações espaciais ainda não é clara (Harle; Towns, 2010; Stieff *et al.*, 2012).

3.3 COMPETÊNCIA REPRESENTACIONAL (CR)

Competência Representacional (CR) é um aporte apresentado por Kozma e Russell (1997) que descreve um conjunto de habilidades e práticas que possibilitam usar reflexivamente uma variedade de representações ou visualizações para pensar, comunicar e agir sobre fenômenos químicos e físicos.

O êxito da compreensão química passa pelo uso de representações e depende da capacidade do indivíduo em criar significado. Enquanto aqueles com pouca competência representacional dependem principalmente das características superficiais das representações ou da aplicação mecânica de regras simbólicas para originar significado, aqueles com mais habilidade usam uma variedade de representações formais e informais juntas para explicar fenômenos, sustentar alegações ou resolver problemas (Kozma *et al.*, 2000; Kozma; Russell, 1997).

Em um estudo de Kozma e Russell (2005), o desempenho de químicos indicou que as seguintes habilidades podem compor um currículo de Competência Representacional em Química:

- a capacidade de usar representações para descrever fenômenos químicos observáveis em termos de processos e entidades moleculares essenciais;
- a capacidade de gerar ou selecionar uma representação e explicar porque ela é apropriada para algo em específico;
- a capacidade de usar palavras para identificar e analisar recursos, como um pico em um gráfico de coordenadas ou o comportamento de moléculas em uma animação;
- a capacidade de descrever como diferentes representações podem dizer a mesma coisa de maneiras diferentes e explicar como uma representação pode dizer algo que outra representação não poderia;

- a capacidade de fazer conexões entre diferentes representações, de mapear recursos de um tipo de representação (como um diagrama estrutural) e de explicar a relação entre eles;
- a capacidade de assumir a posição epistemológica na qual as representações correspondem, mas são distintas nos fenômenos observados;
- a capacidade de usar representações e suas características em situações sociais como evidência para apoiar afirmações, fazer inferências e previsões sobre fenômenos químicos observáveis.

Baseada nessas habilidades, os autores propuseram uma estrutura conceitual que as organiza em padrões característicos do uso de representações em cinco níveis diferentes. Antes de descrevê-los, destaca-se que o uso do termo 'níveis' em língua portuguesa pode sugerir uma progressão linear e hierárquica, presumindo-se que competências em um 'nível' superior incluam e superam automaticamente as competências dos 'níveis' anteriores. Essa percepção linear não representa a natureza multifacetada e complexa da CR, onde o domínio de diferentes níveis pode coexistir sem uma sequência predeterminada de desenvolvimento. Por isso, a presente pesquisa optou em utilizar o termo 'âmbito', uma tradução mais adequada e alinhada aos princípios desse aporte, refletindo melhor a variedade de habilidades envolvidas na CR. Diferentemente de 'nível', o termo 'âmbito' não implica em uma progressão linear e hierárquica, enfatizando que cada categoria dentro da CR representa uma área distinta de habilidade, sem pressupor que uma seja pré-requisito à outra. Essa perspectiva mostra que um indivíduo pode apresentar um alto domínio em um determinado âmbito ao mesmo tempo que apresenta dificuldades em outro.

Assim, o Quadro 3 apresenta os cinco âmbitos descritos por Kozma e Russell (2005) para a CR:

Quadro 3 - Resumo dos âmbitos da Competência Representacional (CR)

Âmbito 1: representação como representação
Quando solicitado a representar um fenômeno, o indivíduo gera representações do fenômeno com base apenas em suas características físicas. Ou seja, a representação é uma representação isomórfica e icônica do fenômeno em um ponto no tempo.
Âmbito 2: habilidades simbólicas iniciais
Quando solicitado a representar um fenômeno, o indivíduo gera representações do fenômeno com base em suas características físicas, mas também inclui alguns elementos simbólicos para acomodar as limitações do meio (por exemplo, o uso de elementos simbólicos como setas para representar noções dinâmicas, como tempo ou movimento ou uma causa observável, em um meio estático, como

papel). O indivíduo pode estar familiarizado com um sistema de representação formal, mas seu uso é meramente uma leitura literal das características de superfície de uma representação, independentemente da sintaxe e da semântica.

Âmbito 3: uso sintático de representações formais

Quando solicitado a representar um fenômeno, o indivíduo gera representações do fenômeno com base em características físicas observadas e entidades ou processos essenciais não observados (como uma causa não observada), mesmo que o sistema representacional possa ser inventado e idiossincrático e as entidades representadas ou os processos possam não ser cientificamente precisos. O indivíduo é capaz de usar corretamente representações formais, mas se concentra na sintaxe de uso em vez do significado da representação. Da mesma forma, o indivíduo faz conexões entre duas representações diferentes do mesmo fenômeno com base apenas em regras sintáticas ou características de superfície compartilhadas, em vez do significado fundamental compartilhado das diferentes representações e suas características.

Âmbito 4: uso semântico de representações formais

Quando solicitado a representar um fenômeno, o indivíduo usa corretamente um sistema formal de símbolos para representar entidades e processos essenciais não observáveis. O indivíduo é capaz de usar um sistema de representação formal baseado em regras sintáticas e em significado, relativo a algum fenômeno físico que representa. O indivíduo é capaz de fazer conexões entre duas representações diferentes ou transformar uma representação em outra com base no significado compartilhado das diferentes representações e suas características. O indivíduo pode fornecer um significado específico comum para vários tipos de representações superficialmente diferentes e transformar qualquer representação dada em uma representação equivalente em outra forma. O indivíduo espontaneamente usa representações para explicar um fenômeno, resolver um problema ou fazer uma previsão.

Âmbito 5: uso reflexivo e retórico de representações

Quando solicitado a explicar um fenômeno, o indivíduo usa uma ou mais representações para explicar a relação entre propriedades físicas e entidades e processos fundamentais. O indivíduo pode usar características específicas da representação para garantir reivindicações dentro de um contexto retórico social. Ele pode selecionar ou construir a representação mais apropriada para uma situação em particular e explicar porque essa representação é mais apropriada do que outra. O indivíduo é capaz de assumir a posição epistemológica de que não é capaz de vivenciar diretamente certos fenômenos e estes só podem ser compreendidos por meio de suas representações. Consequentemente, esse entendimento está aberto à interpretação, onde a confiança em uma interpretação é aumentada à medida que as representações podem ser geradas para corresponder umas às outras e esses argumentos são atrativos para outros indivíduos dentro de uma comunidade.

Fonte: adaptado de Kozma e Russell (2005)

Essa estrutura conceitual corresponde a uma trajetória de desenvolvimento que geralmente se move do uso de características de superfície para o uso retórico de representações para explicar fenômenos (Dunbar, 1995; Goodwin, 1995; Kozma *et al.*, 2000; Kozma; Russell, 1997). Inicialmente, ambos os químicos novatos e químicos especialistas começam com a capacidade de reconhecer e replicar representações físicas de fenômenos químicos, enfatizando suas características diretas e visuais. No entanto, à medida que avançam, os novatos tendem a introduzir elementos simbólicos em suas representações de maneira mais superficial, muitas vezes sem uma compreensão profunda do que esses símbolos realmente significam ou representam.

Por outro lado, especialistas demonstram um maior domínio na utilização sintática dessas representações formais, além da capacidade de se aprofundarem no significado semântico. Os especialistas realizam conexões mais significativas entre diferentes representações, transformando-as uma na outra com facilidade, baseando-se no entendimento profundo dos conceitos que essas representações tratam (Kozma, 2020; Kozma *et al.*, 2000; Kozma; Russell, 1997).

3.3.1 Diferenças das habilidades representacionais de químicos novatos e especialistas

Para compreender os conceitos da Química, os químicos não devem apenas aprender a codificar a tridimensionalidade inserida em uma representação molecular, mas também aprender a traduzir vários tipos de representação para se tornarem solucionadores de problemas químicos. Embora inicialmente os estudantes de Química aprendam apenas sobre o uso de algumas representações, como fórmulas químicas, nomes químicos e modelos de “bola e bastão”, à medida que avançam seus estudos na área são apresentados a representações adicionais. Esse caminho percorrido entre indivíduos novos em um domínio de conhecimento até indivíduos com um domínio significativo emergiu com uma área de pesquisa, onde as investigações buscavam inicialmente caracterizar um “estado inicial” e um “estado final” de conhecimentos de determinada área (Kozma, 2020).

Assim, os denominados ‘novatos’ apresentam um entendimento acerca dos fenômenos científicos baseado em características superficiais. Em relação ao uso de representações, os novatos tendem a agrupar representações do mesmo tipo, independentemente do sistema químico que representam, demonstrando dificuldades em transformar uma forma representacional em outra. Já os denominados ‘especialistas’ possuem uma quantidade significativa de conhecimento em sua área, sendo capazes de reconhecer padrões em representações externas variadas. Eles transformam de forma eficiente uma representação em outra, selecionam representações apropriadas para explicar como representações distintas podem comunicar a mesma informação de maneiras diferentes.

Embora cada uma das possíveis representações possa descrever qualquer molécula, os químicos especialistas são seletivos em seu uso. Por meio do uso extensivo de múltiplas representações, os especialistas aprendem a selecionar a representação apropriada para qualquer problema, manipulá-la e traduzi-la em outras representações, conforme necessário (Stieff *et al.*, 2016). Já os químicos novatos (estudantes de Ensino Médio ou de Nível Superior) que cursam disciplinas de Química, apresentam muita dificuldade na interpretação ou tradução da ampla variedade de representações (Bernal-Ballen; Ladino-Ospina, 2019; Fernandes; Locatelli, 2021; Johnstone, 1993; Kozma *et al.*, 2000; Tsaparlis; Pappa; Byers, 2018).

Apesar de muitas das representações incorporarem elementos conceituais idênticos, várias delas parecem, a “olhos destreinados”, completamente sem relação entre si. Pesquisadores da área de Educação Química apontam que a principal dificuldade que os estudantes encontram nesse processo reside em compreender como as representações bidimensionais tentam transmitir a tridimensionalidade (Ealy, 2004; Stull; Hegarty, 2016; Wu; Shah, 2004; Yang; Wang, 2023).

Para se tornarem especialistas, os novatos podem aprender técnicas de resolução de problemas mais complexas que se baseiam no reconhecimento de informações espaciais incorporadas e na geração correta de representações alternativas que destaquem ou encobrem corretamente essas informações. Em Química Orgânica, por exemplo, os métodos pedagógicos tradicionais dependem fortemente da representação de diagrama estrutural para o ensino e a solução de problemas que se baseiam no formalismo linha-ângulo. Porém, como Raupp e colaboradores (2020) alertam, uma abordagem voltada unicamente na questão na visualização espacial pode ignorar outros aspectos relacionados às dificuldades dos estudantes, como o domínio de conceitos químicos básicos que precedem a habilidade visuoespacial.

Há exemplos de pesquisas que compararam novatos e especialistas para documentar semelhanças e diferenças em suas estruturas e processos cognitivos, como o estudo de Glaser e Chi (1988). Segundo os autores, uma descoberta comum é que geralmente os especialistas são capazes de agrupar problemas ou situações aparentemente diferentes em grandes agrupamentos significativos com base em conceitos e princípios fundamentais. Por exemplo, diferenças significativas foram encontradas nas estruturas cognitivas de especialistas e novatos em Física (Chi; Feltovich; Glaser, 1981). Em uma tarefa, físicos especialistas criaram grandes grupos

significativos de problemas de Física de livros com base em princípios físicos específicos, como 'problemas de força' ou 'problemas de energia'. Os novatos organizaram seus grupos com base em características superficiais (ou aparentes), como 'problemas de polia' ou 'problemas de plano inclinado'.

No trabalho de Schank e Kozma (2002), os novatos em geral usaram recursos sensoriais, como cor, movimento e indicações de gesto para tentar construir uma compreensão dos fenômenos químicos representados. No entanto, esses recursos restringiram seu entendimento. Ao contrário dos químicos especialistas, os novatos eram incapazes de mover-se com fluidez entre diferentes representações e conectá-las para criar uma compreensão que ia além das características superficiais de um determinado tipo de representação. Já os especialistas foram capazes de visualizar os mesmos princípios ou conceitos químicos por meio de diferentes representações, conectando-as para expressar sua compreensão dos fenômenos químicos.

No estudo de Stieff (2007) sobre as habilidades visuoespaciais de especialistas, os especialistas confiaram substancialmente no conhecimento semântico para resolver problemas relativos à configuração de um grupo de átomos em uma molécula, indicando a relevância de se identificar quais as estratégias aplicadas por especialistas e desenvolvê-las durante o aprendizado de Química de novatos.

Já a investigação de Popova e Jones (2021) sobre químicos especialistas (professores universitários) revelou que, embora muitos não tenham como objetivo claro desenvolver habilidades da Competência Representacional em seus estudantes, suas práticas de docência e de avaliação acabam contribuindo para o desenvolvimento de várias habilidades da Competência Representacional. Contudo, percebeu-se no estudo que os professores abordavam as habilidades apenas de um ou dois âmbitos propostos pelo aporte, como a capacidade de interpretar e gerar representações sem uma compreensão profunda do que elas simbolizam. Segundo os autores, esse resultado sugere uma falta de contato com o aporte ou de reconhecimento da importância de direcionar claramente as habilidades da Competência Representacional no ensino de Química.

3.4 NEUROCIÊNCIA COGNITIVA APLICADA À EDUCAÇÃO

Para apoiar a aprendizagem, as pesquisas educacionais auxiliam e estruturam práticas pedagógicas e ambientes de aprendizagem para melhorar os resultados educacionais. No entanto, esse tipo de pesquisa não abrange investigações sobre características fundamentais da aprendizagem, como a forma como o conhecimento do conteúdo e as habilidades de pensamento crítico são apoiados no cérebro (Owens; Tanner, 2017).

Por outro lado, as pesquisas na área da Neurociência têm fornecido informações sobre os vários mecanismos que fundamentam a cognição relacionada à aprendizagem, contudo as investigações normalmente não consideram suficientemente a aprendizagem do estudante em uma perspectiva integrativa social, cognitiva e afetiva. Não havendo conexão com as descobertas das pesquisas educacionais, as investigações neurocientíficas da aprendizagem permanecerão inadequadamente adaptadas para relacionar aspectos essenciais das experiências dos estudantes com estratégias que impactem ou impedem a aprendizagem (Mackey *et al.*, 2013; Wu *et al.*, 2021).

Objetivando preencher essa lacuna, a interseção entre Neurociência e Educação emergiu como um campo interdisciplinar que aplica métodos e técnicas da Neurociência para considerar a aprendizagem de uma perspectiva formada pela teoria, pesquisa e prática da Educação. As pesquisas e as iniciativas entre Neurociência e Educação prometem uma compreensão mais contemporânea das interações entre Biologia e Educação, incluindo as bases neurais de aprendizagem e desenvolvimento (Bartley *et al.*, 2019; Coch; Ansari, 2009; Goldwater; Hilton; Davis, 2022; Goswami, 2006; Mason, 2009; Staudt, 2020). Fundamentar estudos da neurociência da aprendizagem em teorias educacionais pode construir a extensão para a qual as alterações neurobiológicas são influenciadas ou suportadas por fatores intrapessoais e ambientais (Butterworth *et al.*, 2011; Pera, 2014).

No presente subcapítulo, além de discorrer sobre as implicações dos estudos da Neurociência voltados ao processo de aprendizagem, considerou-se relevante apresentar previamente alguns conceitos da Psicologia Cognitiva importantes para a aprendizagem química e que são objetos de interesse dessa pesquisa. Como o papel da cognição espacial na aprendizagem de disciplinas de Ciência, Tecnologia, Matemática e Engenharia (STEM - *Science, Technology, Engineering, and*

Mathematics), que tem sido investigado ao longo de várias décadas (Carlisle; Tyson; Nieswandt, 2015; Guay; McDaniel, 1977; Hegarty, 2004; Lubinski, 2010; West, 1991), mas com poucos estudos investigando sobre os componentes cognitivos essenciais à cognição espacial e as estratégias utilizadas para resolver problemas espaciais na Química (Kiernan; Manches; Seery, 2021; Stieff, 2011; Stieff *et al.*, 2020).

Os pressupostos tradicionais sobre a cognição espacial na Química supõem que a habilidade de gerar e manipular imagens mentais de estruturas moleculares tridimensionais é uma componente chave para a resolução de problemas químicos (Pappa; Byers, 2018; Stieff *et al.*, 2020; Wu; Krajcik; Soloway, 2001). Esse pressuposto sugere que, devido à natureza tridimensional das moléculas e às interações moleculares que fundamentam os conceitos e processos químicos, os indivíduos devem possuir habilidades de visualização espacial bem desenvolvidas para aprender Química. E que diferenças individuais na habilidade visuoespacial de estudantes podem influenciar seus desempenhos em Química, onde aqueles com habilidades mais desenvolvidas aprendem e compreendem os conceitos químicos mais facilmente. Por isso, diversos estudos destacam a importância do desenvolvimento de habilidades de visualização espacial em estudantes como uma estratégia para melhorar o ensino e a aprendizagem de Química (Carlisle; Tyson; Nieswandt, 2015; Desutter; Stieff, 2020; Moen *et al.*, 2020).

Apesar de haver evidências que apoiem a cognição espacial como componente chave para o aprendizado químico, essa suposição não leva em conta a diversidade de estratégias de resolução de problemas que os químicos podem empregar que não necessariamente dependam de habilidades visuoespaciais. Por isso, acredita-se que investigar o papel da cognição espacial na aprendizagem química na perspectiva da Neurociência pode esclarecer, definir e criar diferentes modelos de aprendizagem que forneçam uma melhor compreensão sobre os fundamentos das dificuldades de aprendizagem de estudantes e como evitá-las.

3.4.1 Cognição espacial e a memória de trabalho

Na área da Psicologia Cognitiva, diferentes abordagens quantitativas buscam caracterizar como indivíduos utilizam a cognição espacial em tarefas variadas. O cerne da maioria dos estudos sobre a psicologia da cognição espacial aborda de que forma as pessoas codificam ou decodificam informações, constatando-se que a

habilidade visuoespacial não é simples nem uniforme (Carbonell-Carrera; Hess-Medler, 2017; Kozhevnikov; Hegarty; Mayer, 2002; Lowrie; Logan, 2018).

Comumente, indivíduos podem codificar informações independentemente de sua modalidade, ou seja, nem sempre estes raciocinam sobre informações espaciais usando cognição espacial. É possível codificar informações que são superficialmente de natureza espacial (por exemplo, a forma de um objeto ou a distância entre dois objetos) com representações mentais analógicas e proposicionais, baseando-se apenas no contexto do problema (Kosslyn; Jolicoeur, 2021; Pylyshyn, 1981; Thomson; Piccinini, 2018).

Como já introduzido no subcapítulo 3.1.2 desse capítulo, informações que são codificadas analogicamente, como uma imagem mental, são manipuladas e armazenadas em um sistema de memória dedicado ao processamento de informações espaciais. Esse sistema é distinto de um sistema de memória verbal, que armazena informações codificadas como afirmações proposicionais (Barrett, 1971; Den Heyer; Finke; Pinker, 1982; Pickering, 2001). Porém, informações não espaciais, como palavras ou números, podem acionar representações espaciais internas, como quando indivíduos comparam tamanho e forma apenas com nomes de objetos (Pylyshyn, 2002; Shepard; Chipman, 1970; Thomson; Piccinini, 2018).

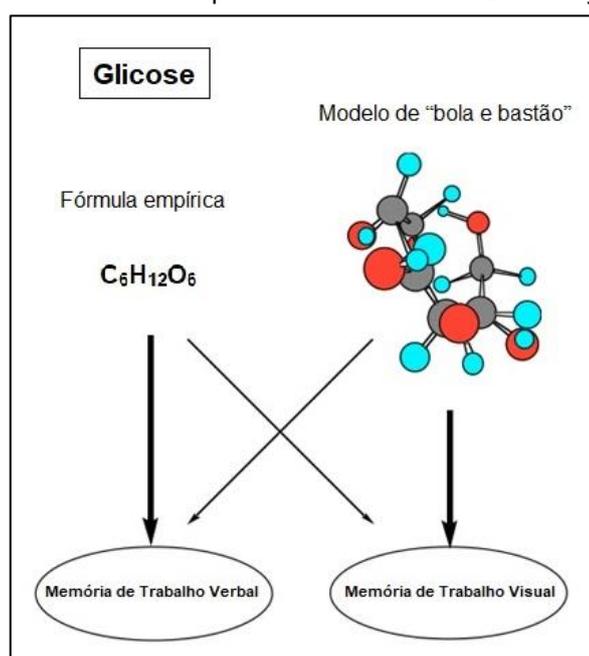
Na Química, diversas representações moleculares possuem características tanto espaciais quanto não espaciais que envolvem os sistemas de memória verbal e visual, contudo os educadores ainda não possuem um consenso sobre o papel que cada sistema desempenha no processo de ensino-aprendizagem (Harle; Towns, 2010; Stieff, 2011; Stieff *et al.*, 2012; Vlacholia *et al.*, 2017). Alguns pesquisadores da área de Educação Química sugerem que o sistema de memória visual descrito por psicólogos é nitidamente o principal sistema cognitivo necessário para o raciocínio químico (Carter; Larussa; Bodner, 1987; Coleman; Gotch, 1998; Dwiningsih *et al.*, 2022). Estes destacam as semelhanças entre as representações moleculares e os objetos tridimensionais de experimentos cognitivos clássicos relacionados à imaginação mental e à visualização.

Embora haja semelhanças ao se comparar representações moleculares a objetos tridimensionais, vários fatores podem dificultar o uso do processamento visuoespacial na Química. Geralmente a partir dos oito anos de idade, os indivíduos começam a depender menos das características perceptuais dos objetos e mais das denominações que atribuem a eles, ou seja, as palavras que identificam os objetos

(Pickering, 2001). Mesmo que indivíduos adultos sejam melhores em lembrar imagens visuais do que denominações, estes tendem a decodificar informações de objetos com as palavras que os identificam (Paivio, 1986). Por isso, a influência dos sistemas de memória verbal e visual durante a resolução de problemas químicos ainda é uma questão. O fato de muitas representações moleculares conterem informações tanto espaciais quanto verbais sugere que elas requerem um esforço cooperativo entre os dois sistemas mentais.

Ao se representar uma molécula em particular, pode-se representá-la de forma a destacar ou omitir suas características espaciais. A Figura 9 ilustra duas representações possíveis da molécula de glicose, onde pode-se codificar (e posteriormente decodificar) cada representação em ambas as memórias - visual e verbal.

Figura 9 - Duas representações da molécula de glicose e como elas podem ser codificadas de acordo com o modelo tripartido de memória de Baddeley



Fonte: a pesquisa

A fórmula empírica (assim como o nome glicose) omite as informações espaciais da estrutura da molécula, enfatizando a composição atômica. A ênfase nas informações verbais da fórmula empírica incentivaria um indivíduo a codificar essa representação em seu armazém de memória verbal. O modelo de "bola e bastão", no entanto, enfatiza as características espaciais da glicose, destacando a posição relativa de cada átomo e a estrutura torcida do açúcar, sem apresentar informações verbais.

Em contraste com a fórmula empírica, um indivíduo deveria ser mais propenso a codificar essa representação na memória de trabalho visual em vez da verbal.

Geralmente, é comum encontrar em materiais didáticos problemas de Química Orgânica que não fazem uso de representações complexas (com destaque de informações espaciais). Esses problemas acabam induzindo os estudantes a usarem diagramas estruturais ou fórmulas empíricas para se concentrarem em porções pequenas das estruturas moleculares (Stieff *et al.*, 2016). Assim, eles acabam utilizando várias abreviações verbais para estruturas comuns ao resolverem problemas. A Figura 10 demonstra a relação entre algumas estruturas e suas abreviações, onde as abreviações verbais são relativamente simples em comparação com as estruturas inteiras:

Figura 10 - Exemplos de abreviações de substituintes e moléculas longas com sequências de letras curtas que omitem informações espaciais

Structure					
Name	Acetyl	<i>t</i> -butyl	isopropyl-	Glucose	Alanine
Abbreviation	-OAc	-tBu	-iPr	Glc	Ala

Fonte: Stieff *et al.* (2016)

Quanto à resolução de problemas, a literatura ainda não apresenta quais são as diferenças entre os químicos novatos e químicos especialistas ao decodificarem diferentes representações moleculares em cada sistema de memória de trabalho (visual e verbal). Por um lado, a maioria da decodificação pode ocorrer na memória de trabalho visual se uma representação conter muitas informações espaciais. Por outro lado, pode ser que a complexidade de tais informações espaciais estimule os indivíduos a naturalmente decodificarem representações moleculares, como abreviações, apenas na memória de trabalho verbal. Neste último caso, ao decodificarem representações moleculares na memória verbal, os indivíduos podem permitir que o executivo central aloque mais recursos para o esboço visuoespacial para a construção e manipulação de diagramas, já que a alça fonológica na memória

verbal lida com a decodificação e o *recall* (Stieff, 2011; Stieff *et al.*, 2020; Stieff; Raje, 2010).

Para testar essa hipótese, os estudos de Stieff e Raje (2010) e Stieff *et al.* (2012) elaboraram e validaram um instrumento contendo questões acerca do conteúdo de Estereoquímica, onde era necessário identificar relações espaciais entre moléculas e analisar transformações espaciais de diagramas moleculares. Esse instrumento, um questionário de estratégia, chamou a atenção da presente pesquisa, pois no primeiro estudo (Stieff; Raje, 2010) foi aplicado exclusivamente a químicos especialistas (professores universitários) e no segundo estudo (Stieff *et al.*, 2012) a químicos novatos (estudantes do Ensino Superior). Foi verificado que a escolha de estratégias que envolviam a cognição espacial (como visualização e a rotação mental) foi observada mais nos novatos. E que o raciocínio diagramático (manipular informações espaciais sem gerar uma imagem mental da estrutura molecular) foi a estratégia mais empregada pelos especialistas.

3.4.1.1 Sub-habilidades da cognição espacial

Durante o processamento de informações espaciais, a habilidade visuoespacial de um indivíduo pode ser classificada em três sub-habilidades distintas: visualização espacial, rotação espacial e orientação espacial. Essas sub-habilidades descrevem o raciocínio real que está por trás do processamento de informações espaciais em conjunto com o sistema de memória visual (Kozhevnikov; Hegarty, 2001; Logie, 1995).

A visualização espacial refere-se à habilidade de um indivíduo visualizar um resultado de uma transformação complexa ou da manipulação de um objeto, como os testes de dobradura de papel e de identificação de figuras embutidas usados na área da Psicologia. A rotação espacial é a habilidade de realizar operações espaciais específicas em um objeto, como a rotação mental de um objeto ou seu reflexo em relação a um eixo. E a orientação espacial refere-se à habilidade de imaginar a aparência de um objeto ou de um conjunto de objetos a partir de perspectivas diferentes, bem como manter um senso de direção (Hegarty; Waller, 2004).

Ainda que as sub-habilidades estejam correlacionadas entre si, o grau em que cada uma influencia o desempenho em tarefas espaciais é variável (Kozhevnikov; Hegarty, 2001). Há estudos que objetivaram estabelecer correlações entre o desempenho em testes padronizados de habilidade visuoespacial e o desempenho

em resolução de problemas químicos, porém, o papel que cada sub-habilidade visuoespacial desempenha ainda não é claro (Harle; Towns, 2010). Elucidando-se a função de cada sub-habilidade visuoespacial na aprendizagem química, pode-se, por exemplo, identificar a necessidade de estudantes serem treinados quanto ao processo cognitivo de rotação mental.

3.4.2 Raciocínio diagramático e a memória de trabalho

A maior parte do aprendizado e da resolução de problemas na Química requer o uso de diagramas para representar estruturas moleculares e suas relações. Porém, não há na literatura amplas discussões sobre o papel do raciocínio diagramático na resolução de problemas (Stieff, 2007; Stieff; Hegarty; Dixon, 2010). Os estudos comumente abordam o uso dos diagramas moleculares como representações de conceitos e objetos, discutindo sobre as dificuldades dos estudantes em relacionar representações moleculares diferentes, sem discutir como os estudantes usam essas representações para resolver problemas (Bodner; Domin, 1995; Hoffmann; Laszlo, 1991; Johnstone, 1993; Kozma; Russell, 1997).

O raciocínio diagramático é uma habilidade cognitiva que desempenha um papel fundamental na forma como os indivíduos processam informações visuais e conceituais. Na perspectiva da psicologia cognitiva, essa habilidade envolve a capacidade de criar, interpretar e manipular diagramas, gráficos e representações visuais para resolver problemas (Sowa, 2020). Na Química, por exemplo, ao aprender um processo químico complexo, um estudante pode elaborar um diagrama que representa as etapas da reação química, as moléculas envolvidas e como elas interagem. Isso não apenas simplifica a compreensão, mas também ajuda a identificar padrões e conexões que podem não serem óbvios em uma descrição textual (Hegarty, 2004; Stieff, 2011).

Estudos na área da Psicologia sobre raciocínio diagramático já evidenciaram que em tarefas específicas, como deduzir a relação entre estruturas tridimensionais, o uso de diagramas permite que indivíduos identifiquem relações espaciais diretamente do diagrama sem gerar ou manipular uma imagem mental. Ou seja, não utilizando habilidades de cognição espacial (Coliva, 2012; Lorenat, 2020; Tversky, 2004). O uso de representações externas interage especialmente com os componentes executivo central e esboço visuoespacial da memória de trabalho. O

executivo central coordena a interpretação e a manipulação dessas representações visuais externas, integrando as informações dessas representações com os conhecimentos prévios e aplicando estratégias de raciocínio lógico e analítico para resolver problemas. Já o esboço visuoespacial auxilia na interpretação de informações visuais presentes em diagramas, mas sem necessariamente gerar imagens mentais, utilizando as representações externas como um recurso para entender e manipular informações espaciais (Toth; Lewis, 2002).

A preferência entre raciocínio diagramático e cognição espacial na resolução de problemas não está apenas relacionada a habilidade visuoespacial, mas sim a uma interação complexa de fatores que incluem experiência, estilo de aprendizado, contexto educacional e habilidades individuais. Além disso, a escolha pode variar de acordo com a situação e a complexidade do problema em questão (Kiernan; Manches; Seery, 2024; Stieff, 2007; Stieff; Hegarty; Dixon, 2010). Enquanto a cognição espacial desempenha um papel importante na capacidade de se visualizar moléculas e estruturas atômicas em três dimensões, permitindo a compreensão da geometria molecular, das ligações e da estereoquímica das moléculas, o raciocínio diagramático é empregado quando utilizam-se diagramas, modelos tridimensionais e regras para representar essas estruturas de forma clara e precisa (Fiorella; Mayer, 2017; Kiernan; Manches; Seery, 2021; Wu; Shah, 2004).

3.4.3 Neurociência e aprendizagem

As pesquisas no âmbito da Neurociência vêm proporcionando um novo entendimento dos processos cognitivos e elucidando as propriedades neurais essenciais à fala, linguagem, pensamento, raciocínio, leitura e matemática. Diversas técnicas de obtenção de imagens e medidas psicofisiológicas têm sido empregadas para estudar o cérebro e contribuir com as pesquisas em educação (Bassett *et al.*, 2015; Mason; Just, 2016).

Considerando-se os estudos que relacionam o processo de aprendizagem a modificações cerebrais específicas, pode-se ponderar que a aprendizagem é entendida como o fortalecimento ou enfraquecimento das conexões neurais, que são constantemente remodeladas em resposta a estímulos externos, percepções, pensamentos e ações, em um contexto complexo que envolve biologia, psicologia e

cultura (Cole; Laurent; Stocco, 2013; Dehaene; Kerszberg; Changeux, 1998; Mashour *et al.*, 2020; Raschle; Zuk; Gaab, 2012).

Sabe-se que no ambiente escolar, fatores como a relação professor-aluno e o contexto familiar do estudante podem influenciar muito o processo educacional. Por isso, as possíveis contribuições dos estudos desenvolvidos na interface Neurociência e Educação não objetivam reduzir a complexidade dos processos educacionais, mas sim melhor discutir como o cérebro humano aprende.

Todo processo educacional está intrinsecamente relacionado a mudanças no córtex cerebral, onde o ato de aprender implica em alterações na conectividade entre neurônios, seja por meio de mudanças na potencialização das sinapses ou pelo reforço de conexões. Conseqüentemente, um ensino eficaz precisa impactar diretamente as funções cerebrais (Goldwater; Hilton; Davis, 2022; Huber *et al.*, 2018; Mackey *et al.*, 2013).

A compreensão de como as informações do ambiente são codificadas no cérebro pode fornecer informações importantes sobre a aprendizagem de conteúdos científicos que seriam impossíveis de obter de outra forma. Ao se aprofundar pesquisas neurocientíficas sobre os processos de aprendizagem, pode-se melhor compreender a educação de maneira fundamentalmente diferente do que tem sido obtido até agora, estabelecendo uma ligação relevante entre a Neurociência e a Educação (Thomas; Ansari; Knowland, 2019).

3.4.3.1 Estudos com neuroimagens

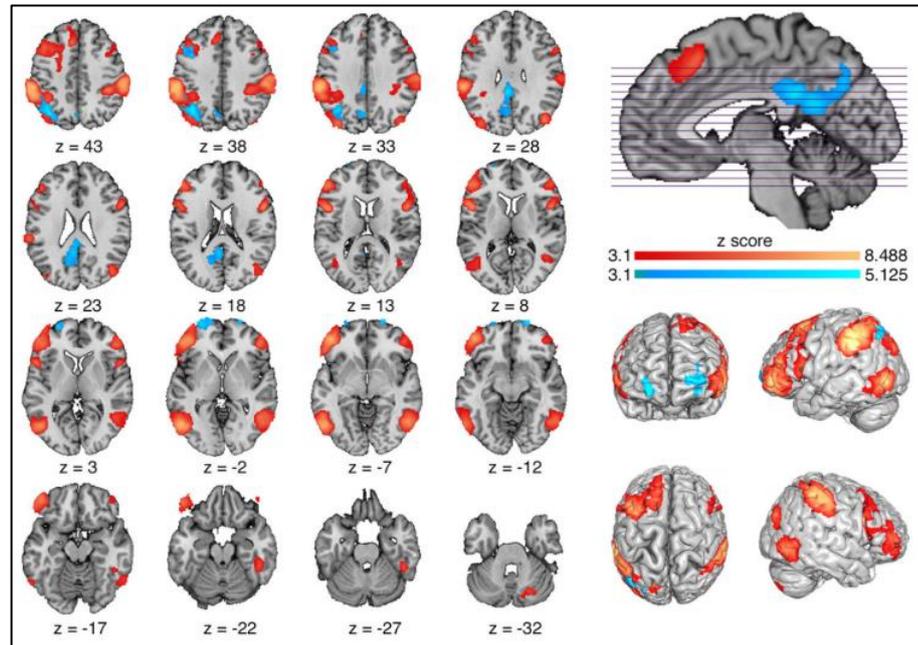
A relação entre a aprendizagem e o cérebro humano é uma das diversas questões que a neurociência cognitiva vem estudando. Por meio de técnicas que geram imagens do cérebro, as neuroimagens obtidas estão proporcionando respostas sobre como a aprendizagem altera a atividade cerebral de maneiras específicas (Bassett *et al.*, 2015; Mason; Just, 2016) e modifica a estrutura física do cérebro (Mårtensson *et al.*, 2012; Zatorre; Fields; Johansen-Berg, 2012).

Pesquisadores já demonstraram que a análise de neuroimagens provenientes de ressonância magnética funcional (fMRI - *functional magnetic resonance imaging*) pode de fato medir os desenvolvimentos neurais relacionados a aprendizagem em sala de aula (Huber *et al.*, 2018; Mackey *et al.*, 2013). Esses desenvolvimentos abrem a possibilidade de as investigações neurocientíficas serem cada vez mais integradas

às avaliações e práticas escolares (Costa, 2023; Patten; Campbell, 2011). Há, por exemplo, estudos sobre a compreensão do desenvolvimento de sistemas neurais relacionados à atenção e ao controle cognitivo que podem desencadear discussões sobre as limitações da aprendizagem, revelando como o desenvolvimento de habilidades aritméticas pode depender de uma maturação cerebral e não necessariamente de uma metodologia de ensino ou da falta de competência do estudante (Ansari *et al.*, 2011). No contexto do aprendizado de Ciências, há estudos neurocientíficos relacionados à resolução de problemas de Matemática (Arsalidou; Taylor, 2011), raciocínio visuoespacial (Ferrer *et al.*, 2009), raciocínio dedutivo (Prado; Chadha; Booth, 2011) e Física (Bartley *et al.*, 2019; Brewe *et al.*, 2018).

Um exemplo da área da Física é o estudo apresentado por Brewe *et al.* (2018), que investigou como os estudantes aprendem Física e desenvolvem representações mentais de fenômenos físicos. Para isso, eles partiram da hipótese que a abordagem pedagógica e curricular *Modeling Instruction* (MI) (Hestenes, 1987; Wells *et al.*, 1995) promove o engajamento e desenvolve habilidades para resolução de problemas, uma vez que a abordagem emprega a construção de modelos conceituais científicos. Participaram da pesquisa 55 graduandos de Física, que cursaram aulas com a abordagem MI ao longo de um semestre. No início e ao término das aulas, os participantes foram submetidos a sessões de fMRI (Figura 11), onde, durante a análise, responderam o questionário *Force Concept Inventory* (FCI) (Halloun; Hestenes, 1985; Hestenes *et al.*, 1992), que avalia a compreensão sobre os conceitos newtonianos de força.

Figura 11 - Resultados de fMRI: (vermelho) regiões do cérebro ativas durante a tarefa de Física no início do semestre e (azul) regiões do cérebro ativas durante a tarefa de Física depois da finalização do semestre



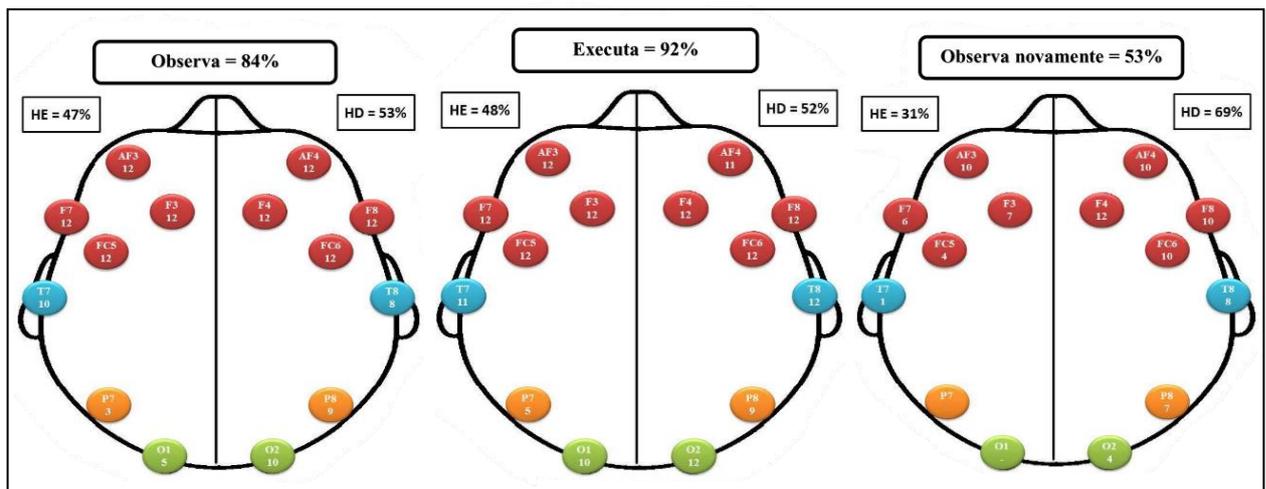
Fonte: Brewe *et al.* (2018)

Comparando os questionários pré e pós com as neuroimagens, os pesquisadores buscaram compreender como o raciocínio físico pode ser traduzido em funções cerebrais analisadas por fMRI. Os resultados mostraram um aumento da atividade cerebral em áreas associadas às funções de atenção e resolução de problemas, referentes ao sistema executivo central da memória de trabalho. Essas áreas incluem os córtices pré-frontais laterais e parietais, elucidando as bases neurais relacionadas ao raciocínio de Física e, ainda, que uma metodologia em específico pode modificar uma atividade cerebral.

Envolvendo o aprendizado químico, um dos poucos estudos neurocientíficos disponíveis na literatura é a investigação conduzida por Maiato (2013), brevemente apresentada no capítulo de revisão de literatura dessa pesquisa. A pesquisadora avaliou a atividade cerebral de estudantes durante diferentes situações envolvendo um experimento químico sobre o conteúdo de Estados Físicos da Matéria, verificando de que forma esse tipo de atividade pode mobilizar estados de atenção e formação de memórias. Participaram da pesquisa 3 estudantes da Educação Básica (Ensino Fundamental), que participaram de sessões de eletroencefalograma (EEG) e responderam a testes de memória após três situações pedagógicas: (I) observação do experimento realizado pela autora; (II) execução do experimento pelos próprios

estudantes; e (III) observação do experimento já observado e executado anteriormente. As imagens cerebrais foram capturadas ao longo dos três momentos, analisando-se quatro regiões: lobo frontal, lobo temporal, lobo parietal e lobo occipital. Unindo-se os dados das sessões de EEG dos 3 participantes, obtiveram-se os níveis de ativação cerebral mostrados na Figura 12:

Figura 12 - Ativação dos canais no EEG nas situações de observação, execução e nova observação: lobo frontal (vermelho), lobo temporal (azul), lobo parietal (laranja) e lobo occipital (verde)



Fonte: adaptado de Maiato (2013)

Os resultados demonstraram que na situação de ‘observação’, foram ativados 84% das quatro regiões de análise (47% no hemisfério esquerdo e 53% no hemisfério direito), onde o lobo frontal apresentou maior ativação, seguido do lobo temporal. Na situação de ‘execução pelos próprios estudantes’, foram ativados 92% das regiões de análise (48% no hemisfério esquerdo e 52% no hemisfério direito), onde o lobo frontal apresentou maior ativação, seguido do lobo temporal. E na situação de ‘nova observação’, houve uma queda significativa da atividade cerebral: 53% das quatro regiões de análise (31% no hemisfério esquerdo e 69% no hemisfério direito), onde o lobo frontal apresentou maior ativação, seguido do lobo temporal. No geral, verificou-se maior ativação de áreas corticais, em especial do córtex pré-frontal, destacando-se a situação de ‘execução pelos próprios estudantes’. Os testes de memória corroboraram as imagens cerebrais, concluindo-se que a execução do experimento pelos próprios estudantes demanda um empenho cognitivo maior e, conseqüentemente, aumenta a retenção de informações na memória. Tendo evidências dos diferentes usos de experimentação, a autora reforça que o uso de

experimentos pode otimizar a formação de memórias e estados de atenção em sala de aula.

Em geral, resultados derivados de fMRI sugerem que as bases neurais que suportam a resolução de problemas variam entre os tipos de tarefas (Newman; Willoughby; Pruce, 2011) e as habilidades cognitivas utilizadas (Keller; Menon, 2009). Em geral, os estudos de fMRI caracterizam a resolução de problemas em contextos ou conteúdo específicos, mas as bases neurais características para a resolução de problemas químicos ainda não foram totalmente elucidadas.

A interseção entre Neurociência e Educação continua sendo um campo em desenvolvimento no qual a pesquisa básica deve primeiro ser estabelecida antes que ferramentas educacionais mais amplas possam ser refinadas para uso em sala de aula (Bruer, 2006). Além disso, sabe-se que os professores possuem maior conhecimento sobre quais técnicas de aprendizagem funcionam melhor em sala de aula do que os neurocientistas.

Logo, deve-se ter atenção sobre como tratar os resultados provenientes de varreduras cerebrais, uma vez que estes não substituem as observações comportamentais das experiências e êxitos dos estudantes (Bassett *et al.*, 2015; Coch; Ansari, 2009; Van Kesteren *et al.*, 2014), mas podem complementar e oferecer uma melhor compreensão da ciência do aprendizado.

3.4.3.1.1 Exame de ressonância magnética funcional (fMRI)

A fMRI é um procedimento que mensura e mapeia a atividade cerebral por meio da detecção de alterações nos níveis de oxigênio no sangue. Rastreamento dessas alterações, é possível monitorar quais áreas cerebrais estão ativas quando indivíduos realizam tarefas ou experimentam eventos particulares (Gazzaniga; Heatherton; Halpern, 2018). A Figura 13 ilustra uma sessão de fMRI e o tipo de neuroimagem obtida:

Figura 13 - Imageamento por ressonância magnética funcional (fMRI)



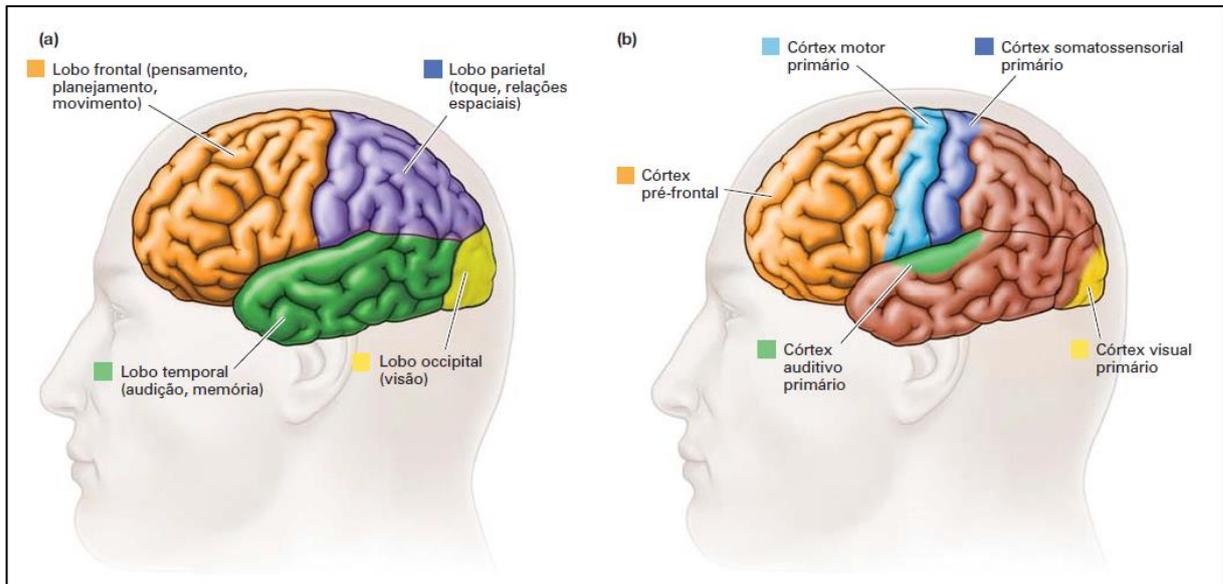
Fonte: Gazzaniga, Heatherton e Halpern (2018)

A ativação neuronal leva a um incremento no consumo de adenosina trifosfato (ATP), uma molécula que assegura a liberação de energia para as células, ocasionando um aumento na demanda por glicose e oxigênio. Conseqüentemente, há um aumento no volume e fluxo do sangue na região ativada. Ao percorrer a rede de vasos capilares, a hemoglobina carregando o oxigênio (oHb - *oxyhaemoglobin*) libera este para as células, transformando-se em desoxihemoglobina (dHb - *deoxyhaemoglobin*). Em função de suas propriedades paramagnéticas, a dHb afeta o sinal de ressonância magnética, produzindo variações que podem ser detectadas pelo equipamento de fMRI (Huettel; Song; Mccarthy, 2004).

Este fenômeno é a base do efeito BOLD (*Blood Oxygenation Level Dependent*), que mede a resposta hemodinâmica de atividades neurais temporárias decorrida da mudança na proporção de oHb e dHb. A fMRI então utiliza essas mudanças naturais no sangue - relação entre oHb e dHb - para criar imagens funcionais do cérebro, sem a necessidade de injetar no corpo substâncias de contraste externas a este. Com essas neuroimagens, pode-se compreender como diferentes regiões do cérebro processam as funções cognitivas e reagem a estímulos externos (Huettel; Song; Mccarthy, 2004).

Acerca das regiões do cérebro, estas compõem o chamado o córtex cerebral - a camada externa dos hemisférios cerebrais. A Figura 14 mostra as divisões presentes no córtex cerebral:

Figura 14 - Lobos do córtex cerebral (a) e áreas importantes dentro dos lobos (b)



Fonte: Gazzaniga, Heatherton e Halpern (2018)

Cada hemisfério tem seu próprio córtex, onde estão localizados os lobos occipital, parietal, temporal e frontal. De forma breve, segundo Gazzaniga, Heatherton e Halpern (2018), essas regiões do córtex cerebral são descritas como:

- lobos occipitais: localizados na parte posterior do cérebro, importantes para a visão;
- lobos parietais: localizados em frente aos lobos occipitais e atrás dos lobos frontais, importantes para o sentido do tato e para a atenção ao ambiente;
- lobos temporais: localizados embaixo aos lobos parietais e em frente dos lobos occipitais, importantes para o processamento da informação auditiva, memória e percepção de objetos e faces;
- lobos frontais: localizados na frente do cérebro, importantes para o movimento e processos psicológicos de nível superior associados ao córtex pré-frontal;
- córtex pré-frontal: a parte mais frontal dos lobos frontais, importante para a atenção, a memória funcional, a tomada de decisão, o comportamento social apropriado e a personalidade.

Abaixo do córtex cerebral, estão as regiões subcorticais, que são estruturas importantes para a compreensão das funções psicológicas que incluem o hipotálamo, o tálamo, o hipocampo, a amígdala e os gânglios basais. Destaca-se aqui o hipocampo (situado no interior do lobo temporal em uma posição medial), envolvido na formação de novas memórias e na orientação espacial.

Sucintamente destacados alguns conceitos relevantes sobre as áreas cerebrais de interesse dessa pesquisa e sobre o princípio básico de funcionamento da fMRI, no capítulo a seguir detalha-se o planejamento do experimento para a coleta de dados.

4 DELINEAMENTO METODOLÓGICO

A fim de relatar o caminho metodológico percorrido nessa pesquisa, esse capítulo apresenta a abordagem escolhida para a coleta e análise dos dados, detalhando-se os instrumentos, local e participantes da pesquisa, assim como a análise de resultados planejada para a investigação.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA

A presente pesquisa utilizou a abordagem de Métodos Mistos (Dal-Farra; Fetters, 2017; Fetters; Curry; Creswell, 2013) como procedimento de coleta e análise de dados. Essa integração de dados quantitativos e qualitativos oportuniza uma melhor compreensão do problema de pesquisa investigado, se comparada ao uso das abordagens em separado (Dal-Farra; Fetters, 2017). Como orientam Fetters, Curry e Creswell (2013), o procedimento com métodos mistos pode ser implementado nos diferentes níveis da pesquisa (no *design*, na metodologia, na interpretação e apresentação dos resultados).

Dentre os tipos de *design* propostos para pesquisas com métodos mistos, considerou-se o *design* convergente o mais apropriado para essa investigação. Este consiste em uma abordagem onde se coleta e se analisa dados quantitativos e qualitativos em separado para em seguida uni-los e comparar ou combinar os resultados obtidos (Creswell; Clark, 2017).

Nessa pesquisa, a união dos dados ocorreu pela junção (ou *merge*) dos componentes quantitativos e qualitativos, onde os dados obtidos por essas duas abordagens foram reunidos para análise e comparação. O *merging* em Métodos Mistos vai além da análise de conteúdo por comparar os dados qualitativos transformados com uma base de dados quantitativa (Fetters; Curry; Creswell, 2013).

Já a apresentação dos resultados foi apoiada pela elaboração de *joint displays*, comumente empregados na área da Saúde. Os *joint displays* são formas de demonstrar a integração entre os elementos quantitativos e qualitativos (usando tabelas ou figuras que combinem os dados), permitindo uma melhor visualização dos resultados obtidos e até mesmo novas interpretações (Fetters; Curry; Creswell, 2013). A Figura 15 ilustra um exemplo desse tipo de apresentação de resultados proveniente

do estudo de Legocki *et al.* (2015) sobre os aspectos éticos envolvidos em ensaios clínicos adaptativos:

Figura 15 - Exemplo de *joint display* que apresenta a integração de componentes quantitativos e qualitativos



Fonte: Legocki *et al.* (2015)

Os instrumentos que compõe essa pesquisa de métodos mistos, assim como a análise destinada ao tratamento dos dados quantitativos e qualitativos, são apresentados mais adiante nesse capítulo.

4.2 LOCAL DA COLETA DE DADOS

A coleta de dados desse estudo foi planejada para ocorrer, em uma primeira etapa, em uma universidade federal situada no município de Porto Alegre/RS. Participaram da pesquisa professores do departamento de Química Orgânica e estudantes do curso de Química Bacharelado da instituição. A escolha pelo local de coleta de dados se deu pela tradição e excelência do Instituto de Química da universidade, que atua no ensino de graduação e pós-graduação, extensão e pesquisa na área da Química desde 1925. A anuência do local para a coleta foi concedida pelo coordenador da graduação, por meio de carta datada e assinada (Anexo A).

Uma segunda etapa (planejada, mas não finalizada), é referente as sessões de ressonância magnética funcional (fMRI - *functional magnetic resonance imaging*) realizadas no Instituto do Cérebro da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (InsCer - PUCRS), localizado na cidade de Porto Alegre/RS. O InsCer - PUCRS

é uma entidade filantrópica, mantida pela União Brasileira de Educação e Assistência (UBEA), que além de desenvolver pesquisas na área da Saúde, oferece à população diversos serviços especializados. Em virtude do tempo demandado para a obtenção do recurso financeiro necessário e da sequente indisponibilidade da máquina de fMRI devido a um componente danificado, os resultados de neuroimagem não foram obtidos até a conclusão dessa pesquisa.

4.3 PARTICIPANTES DA PESQUISA

A pesquisa foi aplicada a oito estudantes graduandos em Química (caracterizados como 'novatos') e cinco professores de Química (caracterizados como 'especialistas') oriundos do departamento de Química Orgânica da universidade. Definiu-se a Química Orgânica como área específica de investigação em resposta aos obstáculos comumente relatados na literatura sobre as dificuldades de estudantes em se adaptar à complexidade das representações químicas ao adentrarem no estudo de Química Orgânica (Bongers *et al.*, 2020; Stieff, 2007; Stieff; Raje, 2010).

Os participantes foram recrutados por conveniência, por meio dos canais de comunicação da universidade, levando-se em conta os critérios de inclusão (estudante ou professor de bacharelado ou licenciatura em Química) e exclusão (para estudantes apenas - não ter cursado a disciplina de Química Orgânica I) da amostra de pesquisa. Esta se caracteriza como amostragem por acessibilidade, quando o pesquisador seleciona os elementos a que tem acesso, considerando que esses possam representar o universo (Gil, 2018).

Quanto aos aspectos éticos da pesquisa, esta foi aprovada pelo Comitê de Ética em Pesquisas em Seres Humanos da Universidade Luterana do Brasil (ULBRA), via Plataforma Brasil, sob o número CAAE 51331621.8.0000.5349. Os participantes do estudo foram previamente apresentados ao Termo de Consentimento Livre e Esclarecido (TCLE) (Anexo B) e ao Termo de Autorização de Uso de Imagem, Nome e Voz (Anexo C), consentindo por meio de assinatura a coleta e análise de seus dados. O sigilo quanto à identidade dos participantes foi mantido por meio de códigos, adotando-se as identificações de N1 a N8 (novatos) e E1 a E5 (especialistas). Os dados dos participantes foram utilizados exclusivamente nessa pesquisa, onde, após a conclusão das análises, foram armazenados em arquivo próprio da pesquisadora, sendo os materiais físicos descartados ao término do estudo.

4.4 INSTRUMENTOS PARA A COLETA DE DADOS

Com o intuito de coletar dados que venham a responder à questão diretriz dessa investigação, foram selecionados instrumentos de acordo com as características de uma pesquisa de métodos mistos. Estes consistiram em um teste para identificar habilidades representacionais, um questionário de resolução de problemas químicos, uma entrevista individual e uma sessão de fMRI, detalhados a seguir.

4.4.1 Teste de Competência Representacional (TCR)

O Teste de Competência Representacional (TCR) é um instrumento de avaliação desenvolvido por Sim (2010) que possibilita identificar quais dos cinco âmbitos da Competência Representacional (CR) descritos por Kozma e Russell (1997, 2005) os participantes apresentam maior facilidade ou dificuldade. O instrumento foi desenvolvido com o objetivo de medir as habilidades representacionais de estudantes de Química, sendo aplicado a 441 participantes. O TCR consiste em um questionário dividido em duas partes: Parte A com 25 questões de múltipla escolha e Parte B com 15 questões dissertativas.

Foi aplicado na presente pesquisa a versão original (sem adaptações) do TCR, apenas realizando-se a tradução para a língua portuguesa, como apresentado no Apêndice A. A escolha do instrumento ocorreu pela extensa pesquisa da autora previamente à aplicação do questionário, por meio da revisão de currículos e materiais didáticos, além de entrevistas com profissionais da área de Educação Química, o que gerou um instrumento com validade e com alta confiabilidade.

A validade foi obtida por meio das revisões de professores de Química e a confiabilidade avaliada pelos coeficientes¹⁰ *Kuder-Richardson* (KR-20 = 0,90) e *Kappa de Cohen* (k = 0,864). O Quadro 4 apresenta a relação entre as questões do TCR e os cinco âmbitos da CR (Kozma; Russell, 2005):

Quadro 4 - Especificações do Teste de Competência Representacional (TCR)

Âmbitos da Competência Representacional (CR)	Questões	
	Parte A	Parte B
CR1: a capacidade de interpretar os significados de representações químicas.	A1, A3, A8, A18	B5(a), B5(b), B5(c), B6(a), B6(b)
CR2: a capacidade de alternar entre diferentes representações em um mesmo contexto conceitual.	A2, A4, A5, A15, A16, A17, A20	B1(a)
CR3: a capacidade de alternar entre diferentes representações em diferentes contextos conceituais.	A12, A14, A19, A21, A22, A23, A25	B7(a)
CR4: a capacidade de usar representações para gerar explicações.	nenhuma questão	B2(a), B2(b), B3(a), B3(b), B3(c), B4, B7(b)
CR5: a capacidade de fazer conexões entre representações e conceitos.	A6, A7, A9, A10, A11, A13, A24	B1(b)

Fonte: adaptado de Sim (2010)

Como proposto por Sim (2010), o questionário conta com um total de 40 questões, devendo-se verificar a quantidade de acertos por âmbito de CR. Âmbitos com maiores quantidades de acerto indicam as competências que os participantes possuem maior facilidade. O TCR foi aplicado na presente pesquisa de forma presencial a cada um dos participantes, no formato impresso, sendo disponibilizado um tempo total de 60 minutos para sua conclusão.

¹⁰ O coeficiente *Kuder-Richardson* (KR-20) é uma medida estatística usada para avaliar a confiabilidade (consistência) de um teste. Um teste com alta confiabilidade (KR-20 varia de 0 a 1) indica que os itens estão bem correlacionados entre si, sugerindo que eles estão medindo efetivamente o mesmo conceito ou habilidade. Já o coeficiente *Kappa de Cohen* (k) é uma medida estatística usada para avaliar a concordância entre dois ou mais avaliadores que classificam, categorizam ou avaliam um conjunto de itens. Os valores de k (varia de -1 a 1) podem ser interpretados como indicativos do nível de concordância: valores negativos sugerem pouca ou nenhuma concordância; valores entre 0,01 e 0,20 indicam concordância leve; 0,21 a 0,40 indicam concordância razoável; 0,41 a 0,60 indicam concordância moderada; 0,61 a 0,80 indicam concordância substancial; e 0,81 a 1 indicam concordância quase perfeita.

4.4.2 Questionário de Estratégia (QE)

O Questionário de Estratégia (QE) trata-se de um questionário de escolha de estratégia desenvolvido nos estudos sequentes de Stieff e Raje (2010) e Stieff *et al.* (2012). Segundo os autores, a Química Orgânica é uma área oportuna para se investigar o papel da cognição espacial durante a resolução de problemas.

Na pesquisa de Stieff e Raje (2010), o instrumento foi aplicado a 10 químicos especialistas (professores universitários). E no estudo seguinte, Stieff *et al.* (2012), o questionário foi adaptado e aplicado a 103 químicos novatos (estudantes universitários matriculados em uma disciplina de Química Orgânica).

O instrumento foi validado junto a químicos da área de Química Orgânica e apresentou confiabilidade por meio do coeficiente *Kappa* de *Cohen* ($k = 0,95$), contendo 6 problemas de Estereoquímica que requerem aos participantes identificar as relações espaciais entre moléculas e considerar as transformações espaciais em diagramas moleculares. Essas questões foram desenvolvidas com o intuito de identificar os mecanismos mentais utilizados pelos participantes ao resolverem problemas químicos, indo ao encontro dos objetivos da presente pesquisa de investigar os processos cognitivos envolvidos nesse tipo de resolução.

Os autores propuseram que ao responderem o QE, as resoluções dos participantes devem ser categorizadas como estratégias do tipo 'espacial-imagística' (se utilizada a cognição espacial), 'algorítmica-diagramática' (se utilizado o raciocínio diagramático) e 'complexa-mista' (quando o indivíduo utiliza ambas as estratégias). Essas categorias são empregadas após a conclusão do questionário e da entrevista individual, onde pela triangulação das respostas registradas no QE, das explicações verbalizadas e dos gestos descritivos, é possível verificar a tendência dos participantes de utilizar mais a cognição espacial (estratégia espacial-imagística), o raciocínio diagramático (estratégia algorítmica-diagramática) ou ambos (estratégia complexa-mista).

Na presente pesquisa, foi utilizada a versão original (sem adaptações) do QE apresentado no estudo de Stieff *et al.* (2012), apenas efetuando-se a tradução para a língua portuguesa, como apresentado no Apêndice B. Este foi aplicado de forma presencial a cada um dos participantes, no formato impresso, sendo propiciado 30 minutos para sua conclusão.

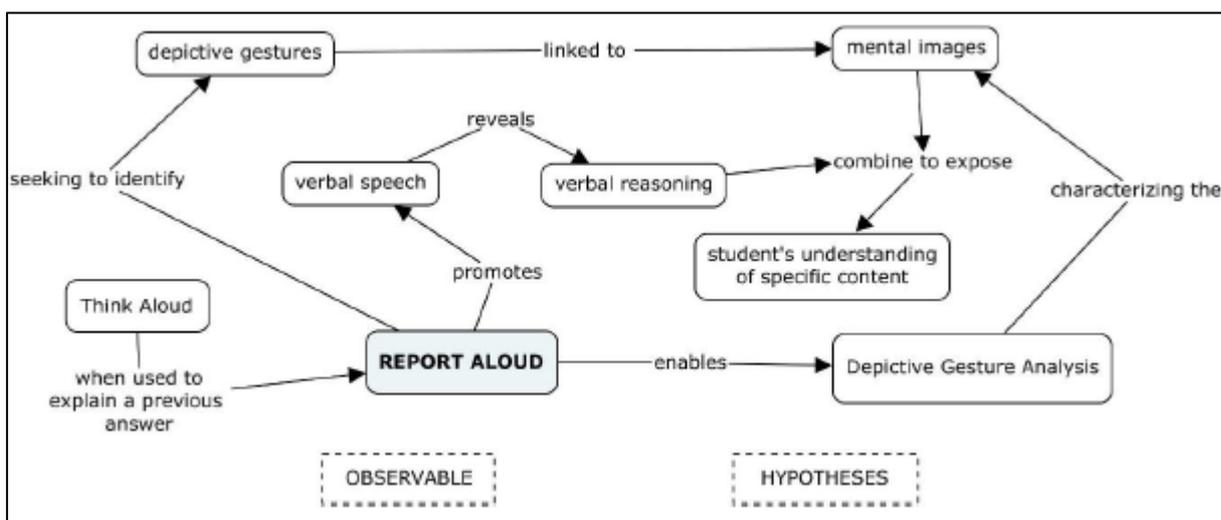
4.4.3 Entrevista individual por meio do protocolo *Report Aloud*

Como parte da investigação de elucidação dos processos cognitivos envolvidos durante a resolução de problemas químicos, foram realizadas entrevistas individuais por meio do protocolo *Report Aloud* (Trevisan *et al.*, 2019), averiguando-se a linguagem verbal e gestual descritiva dos participantes.

O protocolo *Report Aloud* é uma adaptação do método *Think Aloud* (Van Someren; Barnard; Sandberg, 1994), comumente utilizado em pesquisas educacionais para entender o processo cognitivo dos indivíduos. No *Think Aloud*, os participantes verbalizam seus pensamentos em tempo real enquanto realizam uma atividade. Isso significa que, enquanto resolvem um problema, eles expressam em voz alta o que estão pensando. Esse método permite aos pesquisadores capturar o raciocínio dos participantes à medida que ele ocorre. Contudo, um ponto negativo do *Think Aloud* é que ele pode alterar o processo cognitivo do participante, pois exige que ele compartilhe sua atenção entre resolver o problema e verbalizar seus pensamentos.

Já no protocolo *Report Aloud*, os participantes primeiro completam a atividade ou resolvem o problema para depois relatar o raciocínio utilizado. Isso permite que os indivíduos se concentrem totalmente na atividade, sem a distração de ter que verbalizar seus pensamentos simultaneamente. A escolha do protocolo se deu por este proporcionar uma interpretação mais precisa sobre os processos cognitivos dos participantes, sem o risco de alterá-los devido à exigência de verbalização simultânea.

Em uma entrevista conduzida pelo protocolo *Report Aloud*, o entrevistador atenta-se ao discurso verbal e gestual do participante durante a externalização de ideias, a fim de identificar, se for o caso, as imagens mentais geradas ao longo do processo de raciocínio. A Figura 16 apresenta a síntese do protocolo elaborada por Trevisan e colaboradores (2019):

Figura 16 - Síntese do protocolo *Report Aloud*

Fonte: Trevisan *et al.* (2019)

Na presente pesquisa, a entrevista foi aplicada logo após a conclusão do QE, onde o participante relatava a resolução de cada uma das 6 questões. Nesse momento, a duração da entrevista não foi cronometrada, estando o participante à vontade para explicar as estratégias utilizadas. As entrevistas foram gravadas em vídeo e áudio para a identificação e análise das expressões verbais e dos gestos descritivos, que foram registrados conforme o protocolo apresentado no Apêndice C.

4.4.4 Sessão de ressonância magnética funcional (fMRI)

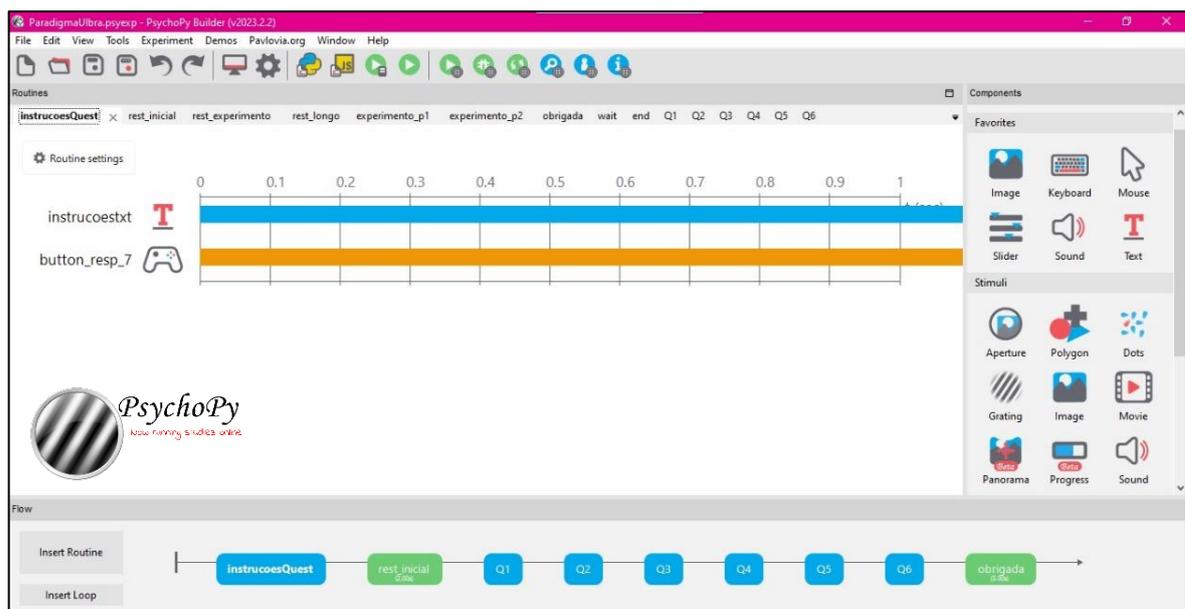
As neuroimagens provenientes da fMRI¹¹ permitiriam a obtenção de resultados acerca da atividade cerebral dos participantes durante o raciocínio químico, propiciando evidências sobre as bases neurais desse raciocínio. Apesar de não concretizado, o exame de fMRI planejado para o presente estudo é composto por um protocolo contendo avaliações estruturais (atividade cerebral durante estímulos externos) e de repouso (atividade cerebral sem estímulos), usando como tarefa a reaplicação do questionário QE, já que os participantes não tiveram acesso às perguntas e às respostas corretas do instrumento após as entrevistas.

¹¹ Em virtude do tempo demandado para a obtenção do recurso financeiro necessário e da sequente indisponibilidade da máquina de fMRI devido a um componente danificado, os resultados de neuroimagem não foram obtidos até a conclusão dessa pesquisa. Decidiu-se em manter essa etapa como parte do delineamento metodológico da pesquisa, pois em trabalhos futuros ela pode ser executada.

Optou-se pela reaplicação do QE para proporcionar maior familiaridade dos participantes com a tarefa, uma vez que um novo questionário poderia gerar sensações de preocupação ou tensão, afetando as ativações cerebrais de interesse. Ao se preocupar com o ambiente do exame e com a leitura de novas questões, os padrões de ativação relacionados ao raciocínio químico poderiam ser mascarados ou distorcidos.

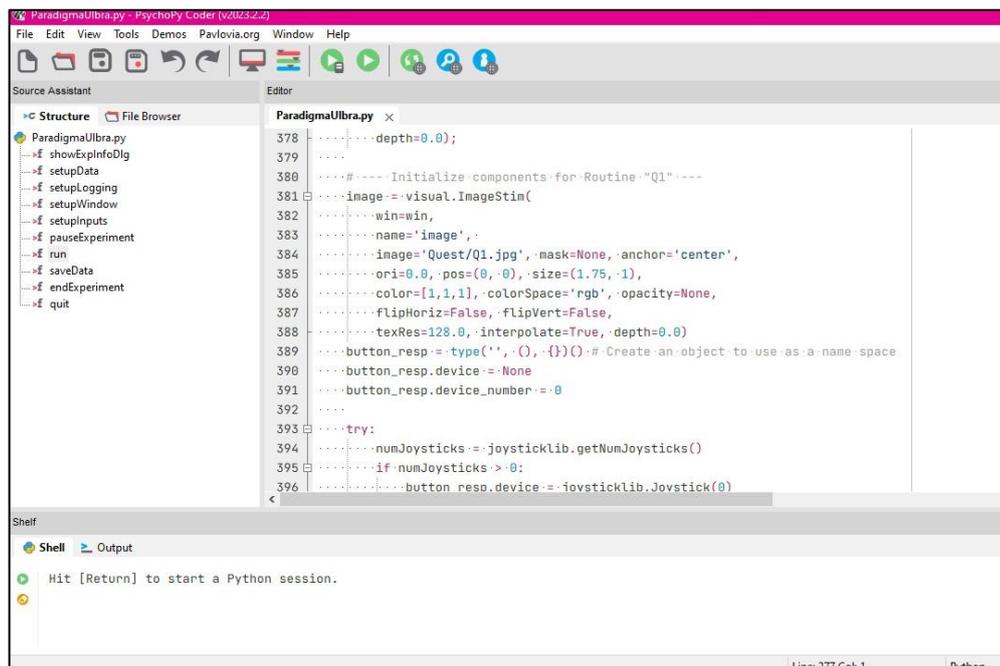
Para a inserção do QE junto ao exame, foi necessário desenvolver um paradigma experimental para realizar a comunicação do computador com a fMRI. Escolheu-se o *software PsychoPy* (versão 2023.2.3, *Open Science Tools* Ltda., Nottingham, NG, Inglaterra), um programa gratuito destinado à elaboração de experimentos utilizando a linguagem de programação *Python*. A Figura 17 e a Figura 18 mostram duas janelas de visualização do programa:

Figura 17 - Janela de construção do paradigma experimental no *software PsychoPy*



Fonte: *software PsychoPy* (versão 2023.2.3, *Open Science Tools* Ltda., Nottingham, NG, Inglaterra)

Figura 18 - Janela de programação *Python* no software *PsychoPy*

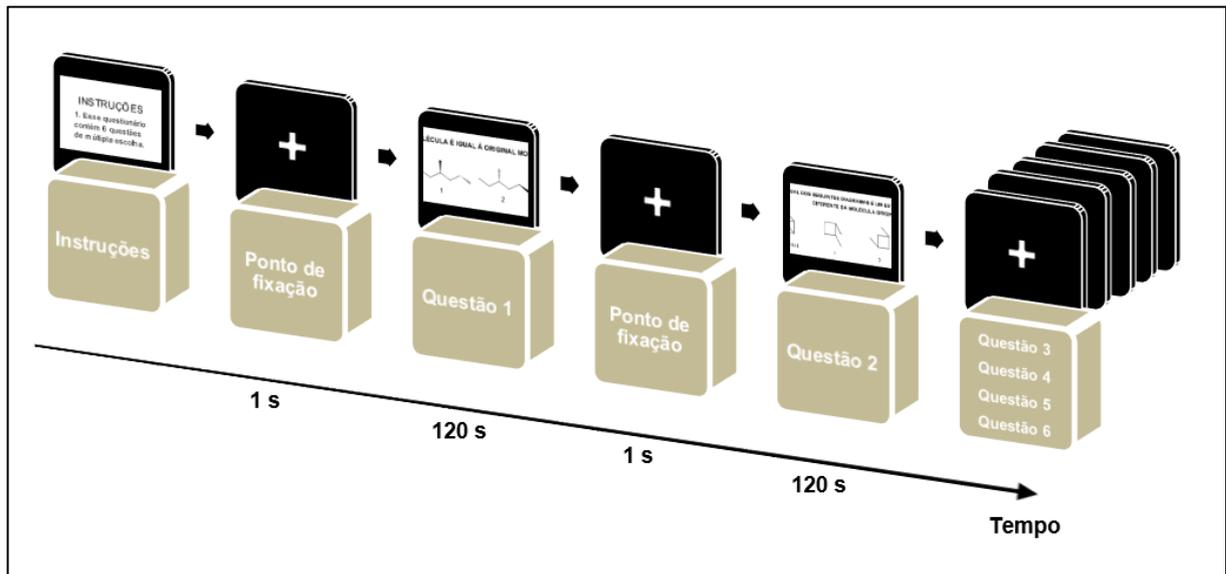


Fonte: software *PsychoPy* (versão 2023.2.3, *Open Science Tools* Ltda., Nottingham, NG, Inglaterra)

Esse software é amplamente utilizado em estudos de psicofísica, neurociência cognitiva e psicologia experimental, permitindo criar estímulos e controlar experimentos de forma simples e acessível, sem a necessidade de um conhecimento profundo em programação (Peirce; Hirst; Macaskill, 2022). Além de realizar a comunicação com a fMRI, o programa realiza a gravação do tempo de resposta e da eficácia de resposta do participante.

O paradigma planejado para a presente pesquisa emprega como estímulos as 6 questões do instrumento QE, já previamente resolvido pelos participantes. Ao rever essas questões dentro do equipamento, o participante iria lembrar mentalmente como as resolveu. Cada questão seria exibida pelo tempo de 120 segundos, intercaladas por um intervalo curto de 2 segundos chamado 'ponto de fixação', como ilustra a Figura 19:

Figura 19 - Etapas do experimento no paradigma da fMRI



Fonte: a pesquisa

Durante a sessão de fMRI, os participantes iriam visualizar as questões em uma tela projetada em frente ao *scanner* do equipamento. As respostas para as questões seriam capturadas por um sistema de botões tipo *joystick* (contendo um botão para cada alternativa), disponibilizado dentro do equipamento.

A máquina de fMRI¹² do InsCer - PUCRS é uma máquina GE *Healthcare* de 3 Tesla, gradiente de 33 mT/m (millesla por metro), com *software* de operação LX versão 9.1 e bobina de crânio de quadratura. Seria realizada uma série de imagens estruturais, que incluiriam três tipos de sequências: a primeira são as imagens *Fluid Attenuated Inversion Recovery* (FLAIR), usadas para assegurar que as áreas do cérebro estudadas estão livres de anormalidades que poderiam confundir os resultados da pesquisa; a segunda são as imagens Ecoplanares T2, que fornecem detalhes precisos dos tecidos moles do cérebro em cortes horizontais; e a terceira são as imagens Volumétricas T1, que são imagens de cortes finos do cérebro empilhadas para formar uma imagem tridimensional.

As imagens funcionais que mostrariam as atividades cerebrais durante os estímulos (devido à técnica BOLD - *Blood Oxygenation Level Dependent*, descrita no capítulo 3) seriam semi-axiais, uma variação do corte horizontal padrão, - com uma

¹² As informações acerca do equipamento de fMRI do InsCer - PUCRS e dos parâmetros a serem empregados foram fornecidas pelo laboratório de imagem do instituto. Tentou-se aqui descrevê-las de forma mais clara possível, sem um maior aprofundamento técnico do equipamento, considerando que a presente pesquisa é desenvolvida na área de Ensino.

espessura de 3,5 mm. Essas imagens cobririam todo o cérebro e seriam capturadas com um ângulo de 90 graus, maximizando a qualidade da imagem. O tempo entre cada sequência de imagens seria de 2.000 milissegundos, o que influenciaria o contraste e a clareza das imagens.

Dado seu alto custo financeiro (o Anexo D apresenta o orçamento emitido pelo instituto), seriam selecionados para a sessão de fMRI apenas 6 participantes (3 novatos e 3 especialistas). Essa seleção usou como critério os resultados obtidos nos instrumentos TCR e QE, sendo 3 novatos que obtiveram a maior taxa de acerto no TCR e que resolveram o QE predominantemente com a estratégia algorítmica-diagramática (1 novato), com a estratégia espacial-imagística (1 novato) e com a estratégia complexa-mista (1 novato). E 3 especialistas que obtiveram a maior taxa de acerto no TCR e que resolveram o QE predominantemente com a estratégia algorítmica-diagramática (1 especialista), com a estratégia espacial-imagística (1 especialista) e com a estratégia complexa-mista (1 especialista).

Ao selecionar-se os participantes com as maiores taxas de acerto no TCR, assegura-se que estes possuem os conhecimentos químicos pertinentes à pesquisa, principalmente tratando-se dos participantes novatos. Pois ao apresentarem alta competência na transição entre diferentes representações químicas, pressupõe-se que a maioria das dificuldades acerca da visualização espacial de moléculas já tenha sido superada (Davishahl *et al.*, 2021; Lin; Wu, 2021; Rahmawati; Dianhar; Arifin, 2021), evitando-se assim resoluções baseadas em escolhas ao acaso (palpites ou adivinhações).

4.5 ANÁLISE DE DADOS

A análise de dados foi determinada em função da natureza dos dados, uma vez que a pesquisa contou com dados quantitativos e qualitativos. A seguir são apresentadas as análises pertinentes a cada uma das abordagens quantitativa e qualitativa do estudo.

4.5.1 Análise de dados quantitativos

Para tratamento dos dados quantitativos provenientes dos instrumentos TCR (Sim, 2010) e QE (Stieff *et al.*, 2012; Stieff; Raje, 2010), optou-se em aplicar como

método estatístico uma análise exploratória de dados. Esta é uma abordagem estatística que enfatiza a exploração dos dados por meio da construção de tabelas, gráficos, diagramas e cálculos de medidas estatísticas (média e desvio padrão) que resumem as informações obtidas na pesquisa. Assim, pode-se detectar padrões, tendências ou relações entre as variáveis de um conjunto de dados, mesmo se tratando de amostras pequenas e que não seguem uma distribuição normal (Hastie; Tibshirani; Friedman, 2009; Tukey, 1977).

Já o tratamento dos dados oriundos das sessões de fMRI, não concretizada, seria realizado por meio do *software Analysis of Functional NeuroImages (AFNI)* (versão 23.3.09, *National Institute of Mental Health*, Bethesda, MD, EUA), um *software* de análise de neuroimagens comumente usado em pesquisas dessa natureza. O processamento e interpretação dos dados nesse programa seria realizado junto ao laboratório de imagens do InsCer - PUCRS.

4.5.2 Análise de dados qualitativos

Os dados qualitativos obtidos na entrevista individual por meio do protocolo *Report Aloud* (Trevisan *et al.*, 2019) foram analisados segundo as especificações dos estudos de Stieff e Raje (2010) e Stieff *et al.* (2012), proponentes do questionário QE. Segundo os autores, ao explicarem suas resoluções, os participantes podem ser analisados quanto às suas expressões verbais e seus gestos descritivos. Estes podem evidenciar os mecanismos mentais dos participantes durante a resolução de problemas químicos, por meio da identificação da tendência de utilizar mais a cognição espacial (estratégia espacial-imagística), ou o raciocínio diagramático (estratégia algorítmica-diagramática) ou ambos (estratégia complexa-mista).

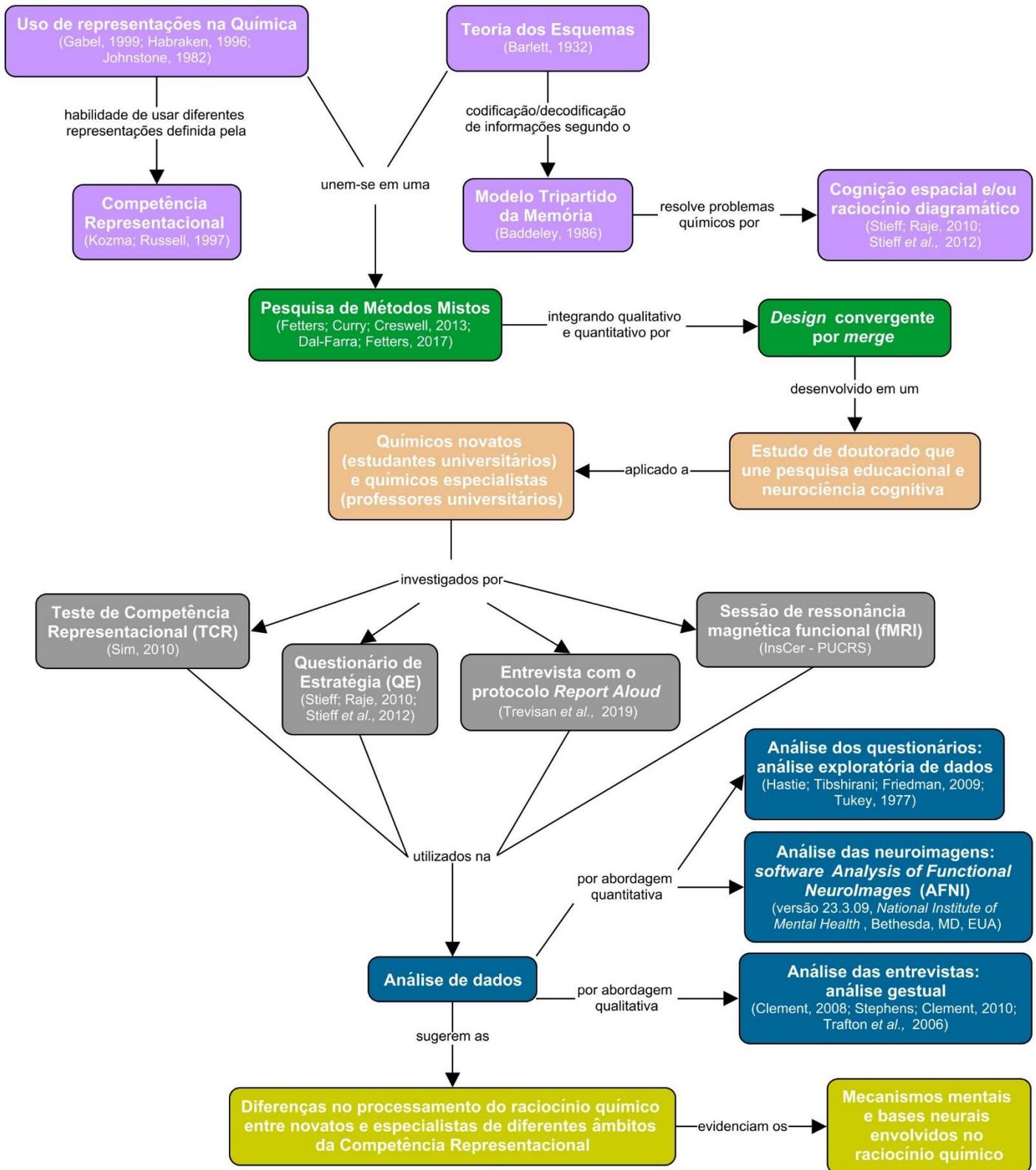
Para a interpretação dos gestos descritivos observados nas entrevistas, utilizou-se os trabalhos de Clement (2008), Stephens e Clement (2010) e Trafton *et al.* (2006), que abordam a análise de gestos e a cognição espacial. Assim, os gestos produzidos durante o protocolo *Report Aloud* foram classificados como gestos dêiticos (gestos indicativos, como apontar para áreas específicas da folha do questionário), gestos icônicos (incluem movimentos corporais que indicam o movimento ou rotação de moléculas) e gestos não icônicos (gestos pessoais ou comunicativos, como tocar o rosto ou sinalizar com a cabeça “sim” ou “não”).

As gravações das entrevistas individuais foram analisadas por meio do registro dos gestos descritivos e das expressões verbais observadas em cada uma das 6 questões do instrumento QE. Como orientam Clement (2008) e Stephens e Clement (2010), os gestos podem amparar a transmissão de informação sempre que houver dificuldade de expressão verbal, podendo-se identificar padrões de gestos e relacioná-los com os conhecimentos implícitos existentes na estrutura cognitiva dos participantes.

4.6 SÍNTESE DA METODOLOGIA DE PESQUISA

A fim de amparar a metodologia delineada para a pesquisa, elaborou-se o Diagrama 2 para propiciar uma visão geral dos procedimentos aplicados à investigação:

Diagrama 2 - Síntese do delineamento metodológico da pesquisa



Fonte: a pesquisa

Assim, esquematizada a metodologia adotada na pesquisa, o capítulo a seguir apresenta os resultados obtidos e discute a análises realizadas.

5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Apresenta-se a seguir a análise e a discussão dos resultados obtidos por meio da aplicação do Teste de Competência Representacional (TCR) (Sim, 2010), do Questionário de Estratégia (QE) (Stieff *et al.*, 2012; Stieff; Raje, 2010) e da entrevista individual por meio do protocolo *Report Aloud* (Trevisan *et al.*, 2019). Em virtude do tempo demandado para a obtenção do recurso financeiro necessário e da sequente indisponibilidade da máquina de ressonância magnética funcional devido a um componente danificado, os resultados de neuroimagem não foram obtidos até a conclusão dessa pesquisa. O planejamento envolvido na aquisição de neuroimagens foi mantido no delineamento metodológico da pesquisa, pois em trabalhos futuros ele pode ser executado.

Pretende-se discutir de que forma os resultados de fato obtidos podem responder à pergunta de pesquisa que norteou a presente investigação. Primeiramente então, apresentam-se os participantes que compuseram a amostra de pesquisa, constituída por treze participantes. Foram oito participantes designados como 'químicos novatos', identificados como N1 a N8, e cinco participantes designados como 'químicos especialistas', identificados como E1 a E5, descritos na Tabela 1 por meio de idade, gênero, tempo de curso ou docência e disciplinas de Química Orgânica cursadas ou ministradas na graduação.

A composição de participantes novatos (feminino = 7; não-binário = 1) apresenta uma variação de idade de 19 a 28 anos (média = 21,13; desvio padrão = 2,57), de 2 a 5 semestres cursados na graduação (média = 3,125; desvio padrão = 0,93) e a conclusão da disciplina de Química Orgânica I comum a todos.

Já os participantes especialistas (feminino = 2; masculino = 3), apresentam uma variação de idade de 31 a 60 anos (média = 44,0; desvio padrão = 11,79), de 5 a 40 de experiência docente (média = 16,7; desvio padrão = 12,49) e a ministração das disciplinas de Química Orgânica comum a todos.

Tabela 1 - Composição da amostra de pesquisa

Novatos	Idade (anos)	Gênero	Nº de semestres cursados na graduação	Disciplinas de Química Orgânica cursadas
N1	21	Feminino	3	Química Orgânica I
N2	20	Feminino	3	Química Orgânica I
N3	21	Feminino	4	Química Orgânica I e II
N4	19	Feminino	2	Química Orgânica I
N5	20	Feminino	2	Química Orgânica I
N6	20	Feminino	3	Química Orgânica I e II
N7	28	Feminino	3	Química Orgânica I
N8	20	Não-binário	5	Química Orgânica I e II, Espectroscopia Molecular Orgânica, Química Orgânica de Biomoléculas

Especialistas	Idade (anos)	Gênero	Tempo de docência (anos)	Disciplinas ministradas na graduação
E1	43	Masculino	7,5	Química Orgânica Experimental I, Química de Polímeros
E2	31	Feminino	13	Química Orgânica II, Química Orgânica Experimental I
E3	60	Masculino	40	Química Orgânica I
E4	51	Feminino	18	Química Orgânica Fundamental
E5	35	Masculino	5	Química Orgânica II, Química Orgânica Experimental I, Química Orgânica de Biomoléculas, Química do Metabolismo

Fonte: a pesquisa

Dada a composição da amostra da pesquisa, apresentam-se a seguir a análise e a discussão dos resultados acerca dos âmbitos da Competência Representacional (CR) e dos mecanismos mentais empregados por novatos e especialistas para a resolução de problemas químicos. A partir do instrumento TCR, pode-se verificar como os investigados usam representações para criar significados, onde participantes com pouca competência representacional dependem principalmente das características superficiais das representações para originar significados e aqueles com mais habilidade usam uma variedade de representações para explicar fenômenos ou resolver problemas (Kozma *et al.*, 2000; Kozma; Russell, 1997). Analisou-se os âmbitos da CR que novatos e especialistas apresentam maiores dificuldades, comparando-se também participantes do mesmo grupo.

Com a aplicação do instrumento QE, averiguou-se a tendência dos participantes de empregar habilidades que envolvem mais cognição espacial (estratégia espacial-imagística), raciocínio diagramático (estratégia algorítmica-diagramática) ou ambos (estratégia complexa-mista), relacionando-a com os resultados de eficácia das respostas.

As análises dos dados obtidos junto aos dados provenientes do exame de ressonância magnética funcional seriam trianguladas a fim de se obter evidências acerca dos mecanismos mentais e das bases neurais envolvidos no raciocínio químico de novatos e especialistas. Por isso, relembra-se aqui a falta dos resultados a respeito das bases neurais, não obtidos até a conclusão dessa pesquisa.

5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS PERFIS REPRESENTACIONAIS DE QUÍMICOS NOVATOS E ESPECIALISTAS

A Competência Representacional (CR), detalhada no capítulo 3, envolve habilidades e práticas que permitem o uso reflexivo de diferentes representações para pensar, comunicar e agir sobre fenômenos químicos e físicos. Essa competência pode ser classificada em cinco âmbitos distintos, variando desde a representação básica de fenômenos até a comunicação de ideias complexas (Kozma; Russell, 1997, 2005).

Compreender as diferenças entre as competências representacionais de químicos novatos e químicos especialistas é fundamental para se preencher as lacunas existentes na base de conhecimentos e habilidades de estudantes de Química, uma vez que químicos novatos não interpretam representações da mesma forma que químicos especialistas. Essa compreensão pode melhorar o modo como conceitos complexos são ensinados, onde os novatos possam se mover entre diferentes representações com a mesma facilidade de um especialista (Kozma, 2020).

A aplicação do instrumento TCR, objetivando identificar os âmbitos da CR dos participantes, resultou nos dados apresentados na Tabela 2. Nesta organizou-se as questões do TCR pelo âmbito da CR pertinente (seguindo as especificações descritas no capítulo 4), indicando-se a taxa de acertos da cada questão e a média de acertos e desvio padrão de cada âmbito.

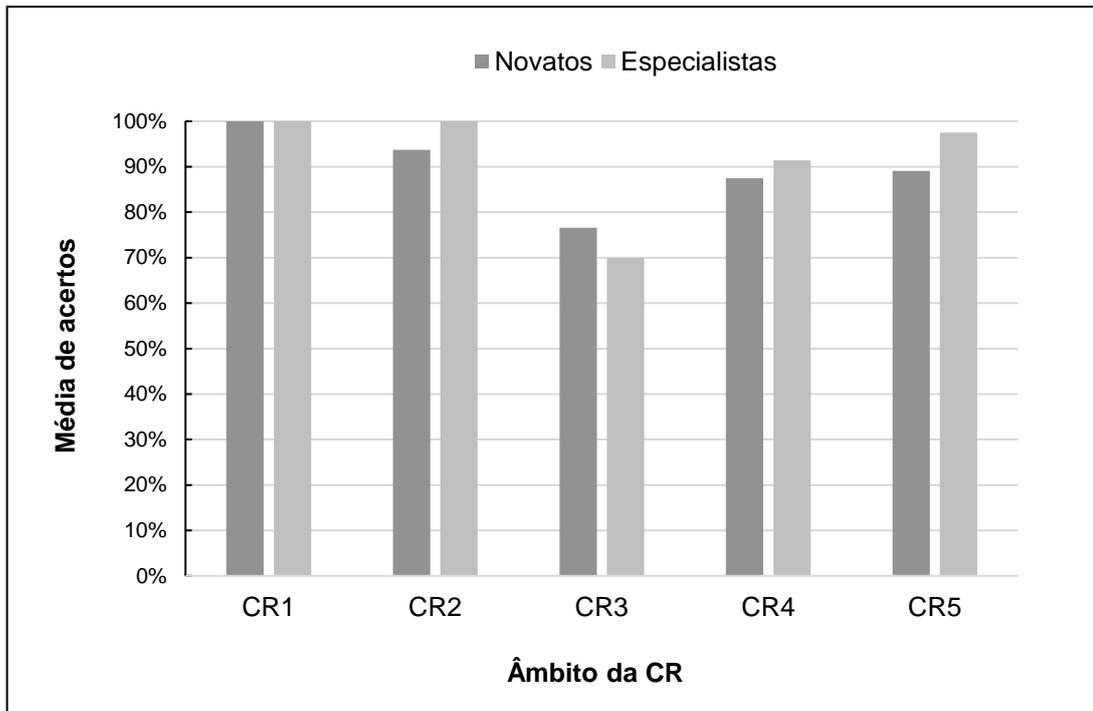
Tabela 2 - Resultados do Teste de Competência Representacional (TCR)

Âmbito da Competência Representacional (CR)	Questão	Novatos				Especialistas			
		Taxa de acertos (%)	Média de acertos (%)	Média de acertos	Desvio padrão	Taxa de acertos (%)	Média de acertos (%)	Média de acertos	Desvio padrão
CR1: a capacidade de interpretar os significados de representações químicas.	A1	100				100			
	A3	100				100			
	A8	100				100			
	A18	100				100			
	B5(a)	100	100	9	0	100	100	9	0
	B5(b)	100				100			
	B5(c)	100				100			
	B6(b)	100				100			
CR2: a capacidade de alternar entre diferentes representações em um mesmo contexto conceitual.	A2	100				100			
	A4	100				100			
	A5	100				100			
	A15	75,0	93,8	7,5	1	100	100	8	0
	A16	100				100			
	A17	87,5				100			
	A20	87,5				100			
CR3: a capacidade de alternar entre diferentes representações em diferentes contextos conceituais.	B1(a)	100				100			
	A12	37,5				80,0			
	A14	75,0				80,0			
	A19	50,0				20,0			
	A21	87,5	76,6	6,1	1,45	60,0	70,0	5,6	1,96
	A22	87,5				60,0			
	A23	87,5				80,0			
	A25	100				80,0			
CR4: a capacidade de usar representações para gerar explicações.	B7(a)	87,5				100,0			
	B2(a)	100				100			
	B2(b)	100				100			
	B3(a)	87,5				80,0			
	B3(b)	87,5	87,5	6,1	1,27	80,0	91,4	6,4	1,2
	B3(c)	87,5				80,0			
	B4	62,5				100			
CR5: a capacidade de fazer conexões entre representações e conceitos.	B7(b)	87,5				100			
	A6	75,0				80,0			
	A7	75,0				100			
	A9	100				100			
	A10	100	89,1	7,1	1,05	100	97,5	7,8	0,4
	A11	100				100			
	A13	75,0				100			
CR5: a capacidade de fazer conexões entre representações e conceitos.	A24	87,5				100			
	B1(b)	100				100			

Fonte: a pesquisa

Para comparar-se os resultados gerais de novatos e especialistas, o Gráfico 1 apresenta as médias de acertos dos participantes em cada um dos cinco âmbitos da CR:

Gráfico 1 - Média de acertos de novatos e especialistas por âmbito da Competência Representacional (CR)



Fonte: a pesquisa

Verifica-se que ambos apresentaram habilidades representacionais semelhantes para interpretar significados de representações químicas com base apenas em características físicas, com 100% de acertos nas questões do âmbito CR1. No âmbito CR2, os novatos apresentaram uma média de acertos de 93,8%, enquanto especialistas obtiveram 100% de acertos, indicando que os especialistas têm maior facilidade em incorporar elementos simbólicos nas representações, reconhecendo a necessidade de abstração para capturar conceitos que não podem ser diretamente observados. O âmbito CR3, que trata do uso de representações formais e da aplicação de regras sintáticas que regem o uso de símbolos e diagramas, se destacou pelo desempenho superior dos novatos, média de 76,6%, enquanto os especialistas obtiveram 70,0% de acertos. Esse resultado indica que ambos os grupos apresentaram uma maior dificuldade nesse âmbito, mas com os novatos desempenhando melhor o uso de regras formais para salientar mais a estrutura da representação do que o seu significado. No âmbito CR4, os novatos apresentaram

uma média de acertos de 87,5%, enquanto os especialistas acertaram em média 91,4%, indicando que os especialistas são mais efetivos ao usarem representações para dar significado a conceitos abstratos. E, envolvendo o uso avançado de representações para explicar fenômenos, o âmbito CR5 foi alcançado pelos novatos com uma média de acertos de 89,1% e pelos os especialistas com 97,5%, indicando uma maior habilidade dos especialistas em fazer conexões conceituais complexas entre diferentes representações de forma crítica e criativa.

Pode-se observar que os novatos apresentaram maiores dificuldades nos âmbitos CR3 e CR4, especialmente nas questões A12 (CR3), A19 (CR3) e B4 (CR4) destacadas a seguir na Figura 20. A questão A12 exigia a habilidade de aplicar o conceito de proporções estequiométricas em nível molecular, onde os novatos podem não ter compreendido a relação quantitativa entre os reagentes e os produtos na reação química. Na questão A19, era necessário interpretar um diagrama representativo de uma reação química, onde a dificuldade dos novatos pode ter sido em relação à identificação no diagrama da proporção correta dos reagentes na formação do produto. Já no âmbito CR4, destacou-se a dificuldade apresentada na questão B4, onde era avaliada a compreensão sobre ligações químicas, onde a dificuldade dos novatos pode ter sido em relação ao entendimento da disposição dos elétrons da camada de valência na estrutura de Lewis.

Figura 20 - Questões do Teste de Competência Representacional (TCR) de maior dificuldade para os novatos

A12. Cloro gasoso (Cl_2) reage com flúor gasoso (F_2) para formar trifluoreto de cloro, de acordo com a reação de equilíbrio:

$$\text{Cl}_2(\text{g}) + 3 \text{F}_2(\text{g}) \leftrightarrow 2 \text{ClF}_3(\text{g})$$

Dez (10) moléculas de gás Cl_2 e trinta (30) moléculas de gás F_2 foram colocadas em um recipiente fechado para reação. Após algum tempo, a mistura no recipiente foi analisada, encontrando-se seis (6) moléculas de gás Cl_2 e algumas de F_2 e ClF_3 . Quantas moléculas de F_2 e ClF_3 estavam presentes?

A. 18 moléculas de F_2 e 6 moléculas de ClF_3
 B. 24 moléculas de F_2 e 6 moléculas de ClF_3
 C. 18 moléculas de F_2 e 8 moléculas de ClF_3
 D. 24 moléculas de F_2 e 8 moléculas de ClF_3

A19. Os elementos X e Y reagem para se obter um produto XY_2 . A reação é mostrada esquematicamente abaixo:

A equação química mais simples e correta para descrever a reação que ocorre é:

A. $4 \text{X} + 8 \text{Y} \rightarrow 4 \text{XY}_2$
 B. $\text{X} + 2 \text{Y} \rightarrow \text{XY}_2$
 C. $6 \text{X} + 9 \text{Y} \rightarrow 4 \text{XY}_2 + 2 \text{X} + \text{Y}$
 D. $\text{X}_4 + \text{Y}_8 \rightarrow 4 \text{XY}_2$

B4. Desenhe a estrutura de Lewis para uma molécula de oxigênio.

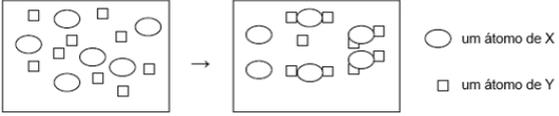
Fonte: a pesquisa

Quanto aos especialistas, o âmbito CR3 se destacou pelas dificuldades apresentadas nas questões A19, A21 e A22. Como mostra a Figura 21, estas são questões que requerem a interpretação de diagramas representativos para transcrever reações químicas em equações químicas (A19 e A22) e cálculos estequiométricos da formação de produto (A21). Considerando-se que no âmbito CR3 usa-se representações formais e aplica-se regras sintáticas que regem o uso de símbolos e diagramas, estando o foco mais na forma do que no conteúdo implícito, o maior conhecimento químico apresentado por especialistas pode predispor estes a buscarem complexidade em uma resolução que poderia ser simples e direta. Também, químicos especialistas podem desenvolver uma preferência ou maior familiaridade com certos níveis de representação devido à sua formação e área de pesquisa. Como, por exemplo, um químico teórico preferir o nível simbólico, enquanto um químico experimental pode preferir mais o nível macroscópico. Essas preferências

podem levá-los a dificuldades quando necessitam lidar com conceitos em níveis nos quais têm menos familiaridade ou experiência.

Figura 21 - Questões do Teste de Competência Representacional (TCR) de maior dificuldade para os especialistas

A19. Os elementos X e Y reagem para se obter um produto XY₂. A reação é mostrada esquematicamente abaixo:



A equação química mais simples e correta para descrever a reação que ocorre é:

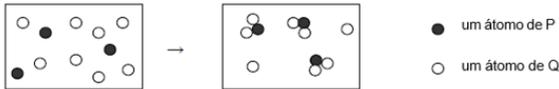
A. $4 X + 8 Y \rightarrow 4 XY_2$
 B. $X + 2 Y \rightarrow XY_2$
 C. $6 X + 9 Y \rightarrow 4 XY_2 + 2 X + Y$
 D. $X_4 + Y_8 \rightarrow 4 XY_2$

A21. A equação mostra a reação entre o carbono e o gás oxigênio. Qual é a massa de gás dióxido de carbono liberado quando 12 g de carbono reagem completamente na reação? (Massa atômica relativa: C = 12; O = 16)

$$C_{(s)} + O_{2(g)} \rightarrow CO_{2(g)}$$

A. 12 g
 B. 28 g
 C. 32 g
 D. 44 g

A22. A reação do elemento P com o elemento Q é representada no diagrama a seguir:



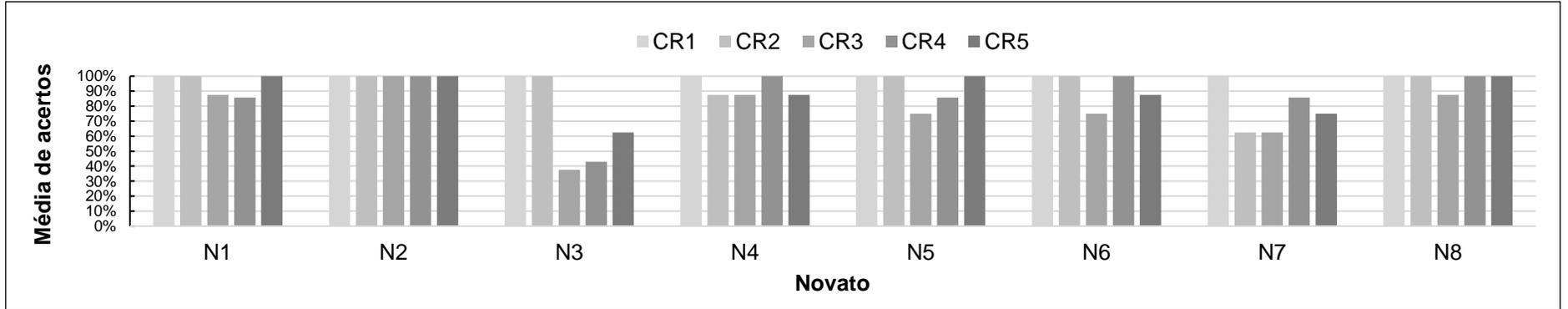
Qual equação descreve melhor essa reação?

A. $3 P + 8 Q \rightarrow 3 PQ_2 + 2 Q$
 B. $P_3 + Q_8 \rightarrow 3 PQ_2 + Q_2$
 C. $P + Q \rightarrow 3 PQ_2 + 2 Q$
 D. $P + 2 Q \rightarrow PQ_2$

Fonte: a pesquisa

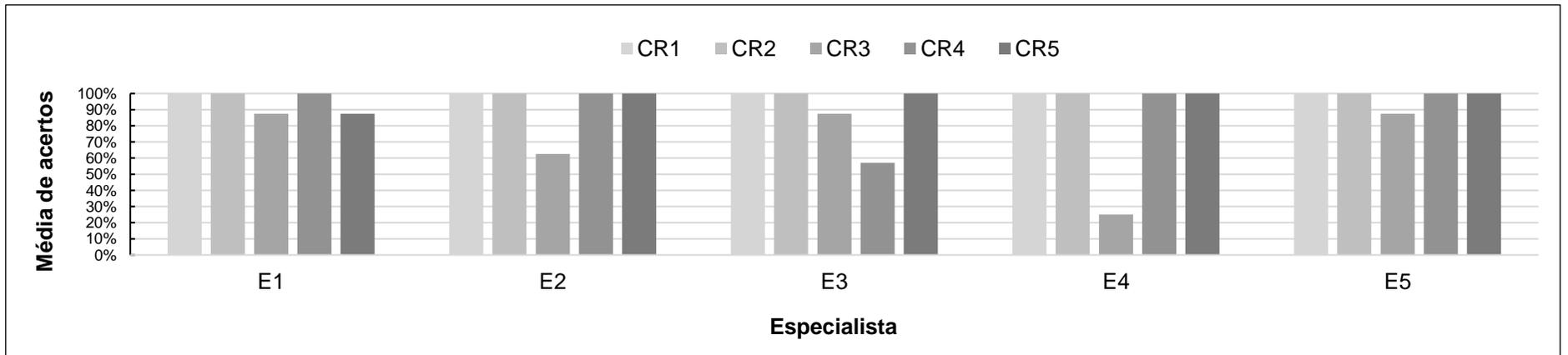
A fim de pontuar-se os resultados individuais dos participantes, o Gráfico 2 e o Gráfico 3 apresentam a distribuição de acertos de cada um dos oito novatos e de cada um dos cinco especialistas por âmbito da CR. No geral, os participantes com mais acertos nos âmbitos da CR são o novato N2 e o especialista E5 e os com menos acertos o novato N3 e o especialista E4.

Gráfico 2 - Distribuição de acertos de cada novato por âmbito da Competência Representacional (CR)



Fonte: a pesquisa

Gráfico 3 - Distribuição de acertos de cada especialista por âmbito da Competência Representacional (CR)



Fonte: a pesquisa

Considerando-se a composição da amostra de pesquisa, apresentada anteriormente na Tabela 1, as possíveis comparações entre os participantes do mesmo grupo são o tempo de curso para os novatos e o tempo de docência para os especialistas. Dada a limitação da amostra, comparações entre os gêneros dos participantes não se aplicam nesse estudo. Ao se comparar o participante novato com menor tempo de curso (nesse caso são dois, N4 e N5 - 2 semestres) com aquele com maior tempo de curso (N8 - 5 semestres), os âmbitos com média de acertos abaixo de 100% foram os âmbitos CR2 (88%), CR3 (88%) e CR5 (88%) para o novato N4, os âmbitos CR3 (75%) e CR4 (86%) para o novato N5 e o âmbito CR3 (88%) para o novato N8. Os novatos N4 e N5 são participantes que cursaram apenas a disciplina de Química Orgânica I, enquanto o novato N8 cursou as disciplinas de Química Orgânica I e II, Espectroscopia Molecular Orgânica e Química Orgânica de Biomoléculas. Esse resultado aponta que a maior exposição do novato N8 a diferentes conceitos e representações ajudou a consolidar a compreensão e a aplicação das representações químicas, uma vez que, com o avanço nas disciplinas, foi necessário revisar e aplicar conceitos de Química Orgânica em contextos novos e mais complexos.

Realizando-se a mesma observação aos especialistas com menor tempo de docência (E5 - 5 anos) e com maior tempo de docência (E3 - 40 anos), ambos mostraram alto desempenho (100% de acertos) em CR1, CR2 e CR5, por facilmente interpretarem representações químicas e conectar essas representações a conceitos teóricos. No âmbito CR3 os dois especialistas apresentaram uma média de acertos de 87,5% e no âmbito CR4 o especialista E3 acertou em média 57,0% das questões, enquanto o especialista E5 acertou 100% das questões. Essa diferença acerca do âmbito CR4 pode indicar que um maior tempo de docência pode não necessariamente significar uma melhor habilidade de usar representações formais e regras sintáticas com o objetivo de dar significado. O especialista E5, por estar iniciando sua trajetória profissional, pode ter sido exposto à uma formação com abordagens educacionais que exploraram a diversidade de representações e o pensamento crítico, com acesso a diferentes recursos tecnológicos que podem ter influenciado o seu desempenho.

Em suma, os resultados acerca dos âmbitos da CR de novatos e especialistas mostraram como estes usam representações para criar significado, onde participantes com pouca competência representacional dependem principalmente das características superficiais das representações para originar significado e aqueles

com mais habilidade usam uma variedade de representações para explicar fenômenos ou resolver problemas. A caracterização dos perfis representacionais dos participantes permitiu identificar como ambos os grupos compreendem e utilizam representações para interpretar e comunicar conceitos químicos. Compreender as diferenças das habilidades representacionais entre novatos e especialistas pode orientar um percurso de desenvolvimento progressivo da CR, já que a capacidade de transitar fluentemente entre os níveis macroscópico, microscópico e simbólico da matéria é fundamental para a compreensão completa dos fenômenos químicos (Fernandes; Locatelli, 2021; Johnstone, 1993; Tsaparlis; Pappa; Byers, 2018). Como seguimento da investigação sobre o processamento do raciocínio químico de novatos e especialistas, apresentam-se a seguir os resultados acerca da tendência dos participantes em empregar habilidades que envolvem mais cognição espacial ou raciocínio diagramático, identificando-se os mecanismos mentais envolvidos para relacioná-los com os âmbitos da CR.

5.2 IDENTIFICAÇÃO DOS MECANISMOS MENTAIS PARA A RESOLUÇÃO DE PROBLEMAS QUÍMICOS

Na Química, diversas representações moleculares possuem características tanto espaciais quanto não espaciais que envolvem os sistemas de memória visual e verbal. Alguns pesquisadores da área de Educação Química sugerem que o sistema de memória visual descrito por psicólogos é nitidamente o principal sistema cognitivo necessário para o raciocínio químico (Carter; Larussa; Bodner, 1987; Coleman; Gotch, 1998; Dwiningsih *et al.*, 2022). De fato, para a resolução de problemas químicos, as habilidades de cognição espacial desempenham um papel importante na capacidade de se visualizar moléculas e estruturas atômicas em três dimensões. Essas habilidades permitem que os estudantes compreendam a geometria molecular, as ligações químicas e a estereoquímica das moléculas (Kiernan; Manches; Seery, 2021; Wu; Shah, 2004).

A literatura ainda não apresenta quais são as diferenças entre os químicos novatos e químicos especialistas ao decodificarem diferentes representações moleculares em cada sistema de memória de trabalho (visual e verbal). Por um lado, a maioria da decodificação pode ocorrer na memória de trabalho visual se uma representação conter muitas informações espaciais. Por outro lado, pode ser que a

complexidade de tais informações espaciais estimule os indivíduos a naturalmente decodificarem representações moleculares apenas na memória de trabalho verbal (Harle; Towns, 2010; Vlacholia *et al.*, 2017). Foi buscando testar essa hipótese que os estudos de Stieff e Raje (2010) e Stieff *et al.* (2012) elaboraram e validaram o instrumento QE. Este aplicado na presente pesquisa, resultou em média 43,9% de acertos por parte dos participantes novatos e em média 70,0% de acertos por parte dos participantes especialistas. O registro das repostas individuais dos participantes para as seis questões do questionário é apresentado na Tabela 3:

Tabela 3 - Acertos (OK) e erros (X) dos novatos e especialistas no Questionário de Estratégia (QE)

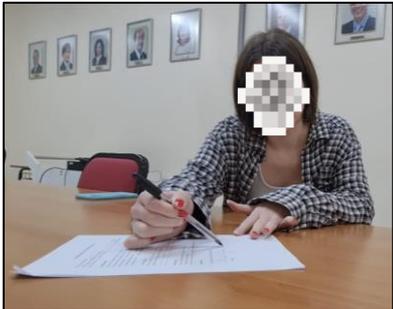
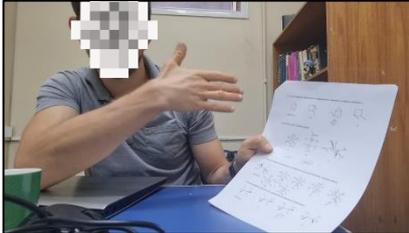
Participante	Questões						Taxa de acertos (%)	Média de acertos (%)
	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6		
N1	OK	OK	X	X	OK	X	50,0	43,9
N2	X	OK	X	X	OK	OK	50,0	
N3	X	OK	X	X	X	OK	33,3	
N4	OK	X	X	X	X	OK	33,3	
N5	OK	OK	OK	X	OK	X	66,7	
N6	X	X	X	OK	OK	X	33,3	
N7	X	X	OK	X	X	X	16,7	
N8	OK	OK	OK	X	OK	X	66,7	
E1	OK	OK	X	OK	OK	OK	83,3	70,0
E2	OK	X	OK	X	OK	OK	66,7	
E3	OK	OK	OK	X	OK	X	66,7	
E4	OK	OK	X	X	OK	OK	66,7	
E5	OK	OK	X	X	OK	OK	66,7	

Fonte: a pesquisa

A eficácia das respostas dos participantes foi analisada junto aos dados obtidos nas entrevistas individuais. Ao se avaliar as expressões verbais e os gestos descritivos dos investigados (Clement, 2008; Stephens; Clement, 2010; Trafton *et al.*, 2006), pode-se elucidar os mecanismos mentais empregados durante a resolução do instrumento QE, por meio da identificação da tendência de utilizar mais a cognição espacial (estratégia espacial-imagística), ou o raciocínio diagramático (estratégia

algorítmica-diagramática) ou ambos (estratégia complexa-mista) (Stieff; Raje, 2010; Stieff *et al.*, 2012). O Quadro 5 apresenta alguns fragmentos das entrevistas individuais, onde pode-se identificar as estratégias utilizadas por novatos e especialistas:

Quadro 5 - Fragmentos das entrevistas individuais de novatos e especialistas acerca do Questionário de Estratégia (QE)

		Tipo de estratégia		
		Algorítmica-diagramática	Espacial-imagística	Complexa-mista
Expressões verbais		"Eu simplesmente sei que, em moléculas estáveis, certos grupos devem estar em uma posição específica."	"Costumo visualizar a molécula em 3D e girá-la na minha cabeça, como se estivesse vendo uma imagem."	
		"Eu acabei atribuindo as notações R e S."	"Tendo a me imaginar entrando no papel ou circulando ao redor da molécula."	
		"Costumo usar esse cálculo para encontrar o número de estereoisômeros."	"Consigo observar essa ligação de cima para baixo."	
		"Essa resolução já estava gravada na minha mente."	"Me imagino observando esse plano de cima."	
Gestos descritivos	<p>Apona com o dedo para um diagrama.</p> 	<p>Faz um gesto de agarrar e girar acima da folha.</p> 	<p>Quando é observada a coocorrência das estratégias algorítmica diagramática e espacial-imagística para resolução de uma mesma questão.</p>	
	<p>Sinaliza o uso de uma fórmula química.</p> 	<p>Vira para si mesmo a folha do questionário em 90 graus.</p>  <p>Faz um gesto de corte com a mão paralelo à folha do questionário.</p> 		

Observações	Desenha um modelo de uma molécula genérica.	Desenha uma seta curva indicando a rotação de uma ligação simples	
	Converte um nome em uma estrutura molecular específica de forma padronizada.	Desenha uma figura de bastão apontando na direção da ligação.	
	Marca informações espaciais em um diagrama.	Desenha uma seta ou um “olho” indicando a perspectiva de observação.	

Fonte: baseado em Stieff e Raje (2010) e Stieff *et al.* (2012)

Os resultados mostraram que as expressões verbais alusivas à estratégia espacial-imagística eram frequentemente acompanhadas de gestos icônicos (movimentos corporais que indicam o movimento ou rotação de moléculas), indicando a imaginação de transformações espaciais dinâmicas e/ou de estruturas que não estavam presentes no questionário. Nessa estratégia, considerou-se como símbolos indicativos de imaginação o uso de setas curvas, para indicar rotação e movimento de ligações químicas, e de setas retas ou de desenhos de “olhos”, para indicar que se assumiu uma posição alternativa às estruturas moleculares.

Já as expressões verbais alusivas à estratégia algorítmica-diagramática faziam referência a regras, fórmulas ou à produção de diagramas para indicar relações espaciais, acompanhadas de gestos dêiticos (gestos indicativos, como apontar para áreas específicas da folha do questionário). Os símbolos utilizados nas resoluções que adotaram essa estratégia foram usados para acompanhar características espaciais, como as notações R e S e *cis* e *trans* para isômeros.

Quando em uma mesma questão o participante demonstrava em sua resolução expressões verbais e gestos descritivos de ambas estratégias, caracterizou-se como a estratégia complexa-mista.

As questões do instrumento QE abordavam diferentes aspectos do conteúdo de Estereoquímica, desde a identificação básica de estruturas moleculares até a compreensão de conceitos mais complexos como projeções e isomeria. No Quadro 6 apresentam-se as estratégias identificadas durante a resolução de cada questão:

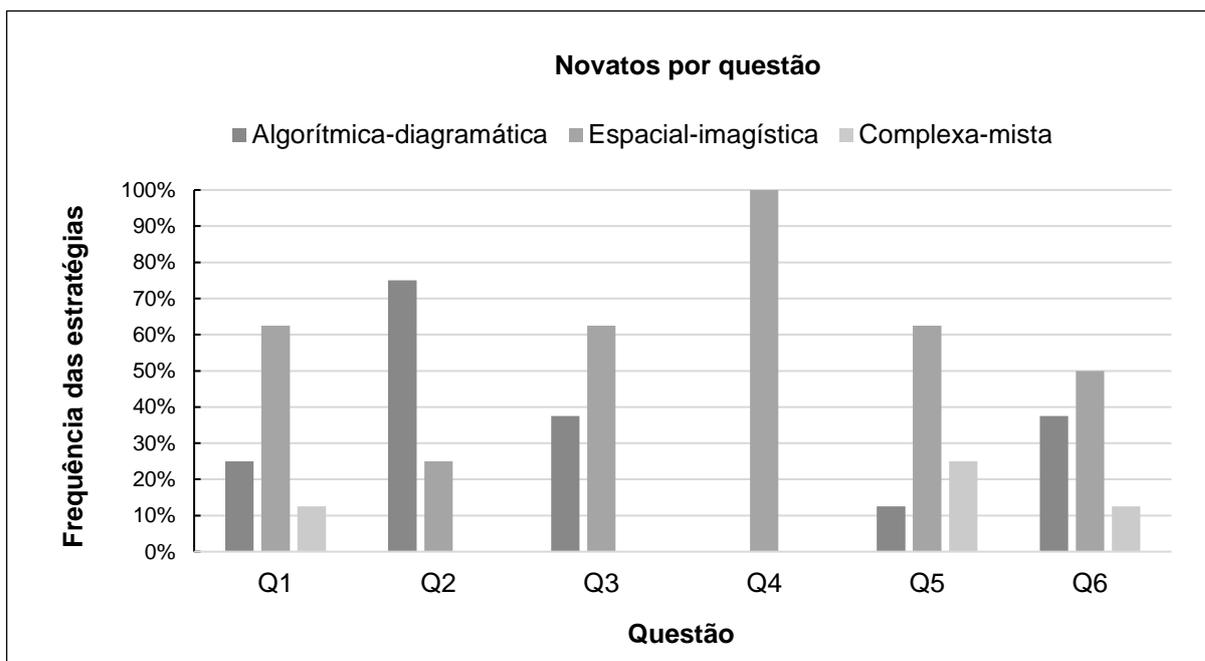
Quadro 6 - Estratégias dos novatos e especialistas identificadas no Questionário de Estratégia (QE): algorítmica-diagramática (A-D), espacial-imagística (E-I) e complexa-mista (C-M)

Questão	Novatos								Especialistas				
	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	E1	E2	E3	E4	E5
Q1	A-D	E-I	E-I	A-D	E-I	C-M	E-I	E-I	A-D	A-D	A-D	C-M	A-D
Q2	A-D	A-D	A-D	A-D	A-D	E-I	E-I	A-D	A-D	A-D	A-D	A-D	A-D
Q3	E-I	E-I	A-D	A-D	A-D	E-I	E-I	E-I	C-M	E-I	C-M	C-M	A-D
Q4	E-I	E-I	E-I	E-I	E-I	E-I	E-I	E-I	C-M	E-I	A-D	C-M	C-M
Q5	E-I	E-I	A-D	C-M	E-I	C-M	E-I	E-I	C-M	E-I	A-D	E-I	A-D
Q6	E-I	E-I	A-D	C-M	A-D	E-I	A-D	E-I	A-D	E-I	A-D	E-I	A-D

Fonte: a pesquisa

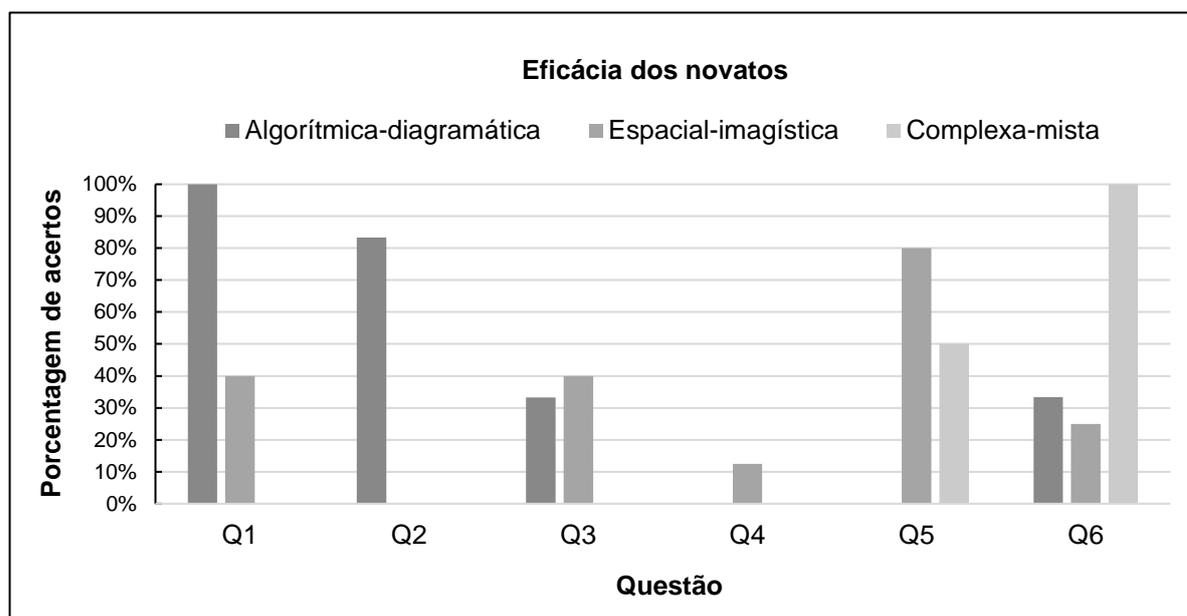
Para uma melhor análise, as estratégias identificadas na resolução dos participantes novatos são apresentadas em termos de frequência e de eficácia nos Gráficos 4 e 5 a seguir. Enquanto o Gráfico 4 indica com que frequência as estratégias foram empregadas em cada uma das seis questões (sem considerar a exatidão da resposta), o Gráfico 5 relaciona as estratégias escolhidas com a eficácia das respostas.

Gráfico 4 - Frequência das estratégias escolhidas pelos novatos em cada questão no Questionário de Estratégia (QE)



Fonte: a pesquisa

Gráfico 5 - Eficácia dos novatos relacionada às estratégias escolhidas no Questionário de Estratégia (QE)

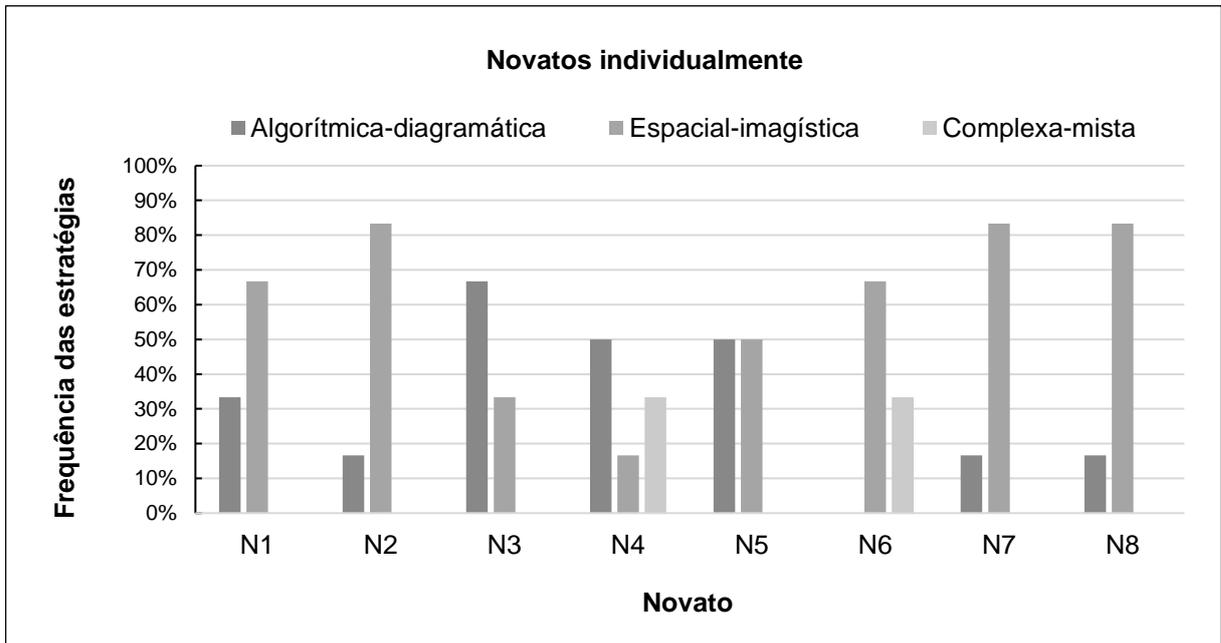


Fonte: a pesquisa

Observa-se que os participantes novatos escolheram ao longo da resolução do questionário mais a estratégia espacial-imagística, sendo a estratégia menos empregada a complexa-mista. Contudo, ao se comparar a frequência de uso da estratégia com a eficácia de resposta, verificou-se que apenas a questão 2 (algorítmica-diagramática) e a questão 5 (espacial-imagística) apresentaram a mesma sincronia entre frequência e eficácia. Ou seja, nas demais questões, as estratégias mais escolhidas pelos novatos não foram as que os levaram a uma correta resolução.

No Gráfico 6, pode-se analisar os novatos individualmente, notando-se que os participantes N1, N2, N6, N7 e N8 escolheram mais a estratégia espacial-imagística, enquanto N3 e N4 mostraram maior utilização da estratégia algorítmica-diagramática. Já o participante N5 apresentou a mesma frequência de uso das estratégias algorítmica-diagramática e espacial-imagística. Nenhum dos participantes adotou a estratégia complexa-mista como a mais frequente.

Gráfico 6 - Frequência das estratégias escolhidas por cada novato no Questionário de Estratégia (QE)



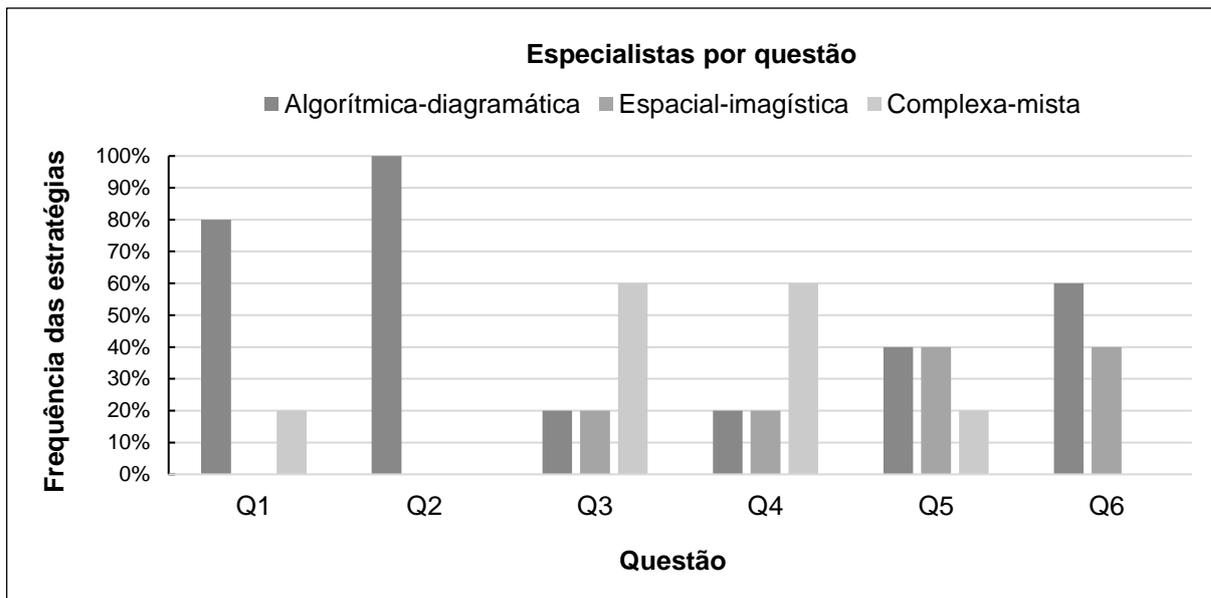
Fonte: a pesquisa

Os novatos podem ter usado menos a estratégia algorítmica-diagramática pela falta de familiaridade com regras e fórmulas específicas, optando por abordagens mais visuais e espaciais. A preferência por estratégias espaciais para problemas que requerem visualização 3D sugere uma maior necessidade de apoio visual na compreensão de conceitos.

Ao comparar-se individualmente a frequência de uso com a eficácia de resposta, objetivando-se selecionar um participante de cada estratégia (apesar do objetivo não concretizado de se obter neuroimagens), destacam-se os participantes N3 pelo emprego eficaz da estratégia algorítmica-diagramática, N8 pelo emprego eficaz da estratégia espacial-imagística e N6 pelo emprego eficaz da estratégia complexa-mista. Por apresentarem diferentes mecanismos mentais durante as resoluções, esses representantes de cada uma das três estratégias iriam participar do exame de ressonância magnética funcional, onde seriam elucidadas as bases neurais associadas a esses mecanismos.

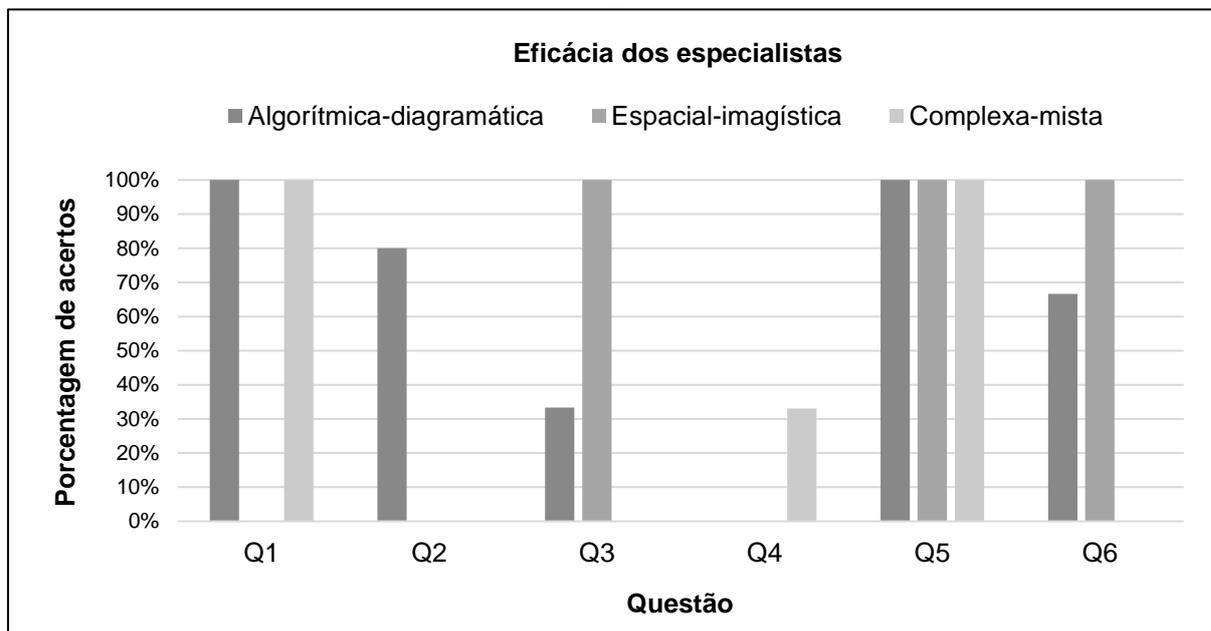
Para os participantes especialistas, as estratégias identificadas em suas resoluções são apresentadas em termos de frequência e de eficácia nos Gráficos 7 e 8, onde o Gráfico 7 indica com que frequência as estratégias foram utilizadas em cada uma das seis questões (sem considerar a exatidão da resposta) e o Gráfico 8 relaciona as estratégias escolhidas com a eficácia das respostas.

Gráfico 7 - Frequência das estratégias escolhidas em cada questão pelos especialistas no Questionário de Estratégia (QE)



Fonte: a pesquisa

Gráfico 8 - Eficácia dos especialistas relacionada às estratégias escolhidas no Questionário de Estratégia (QE)



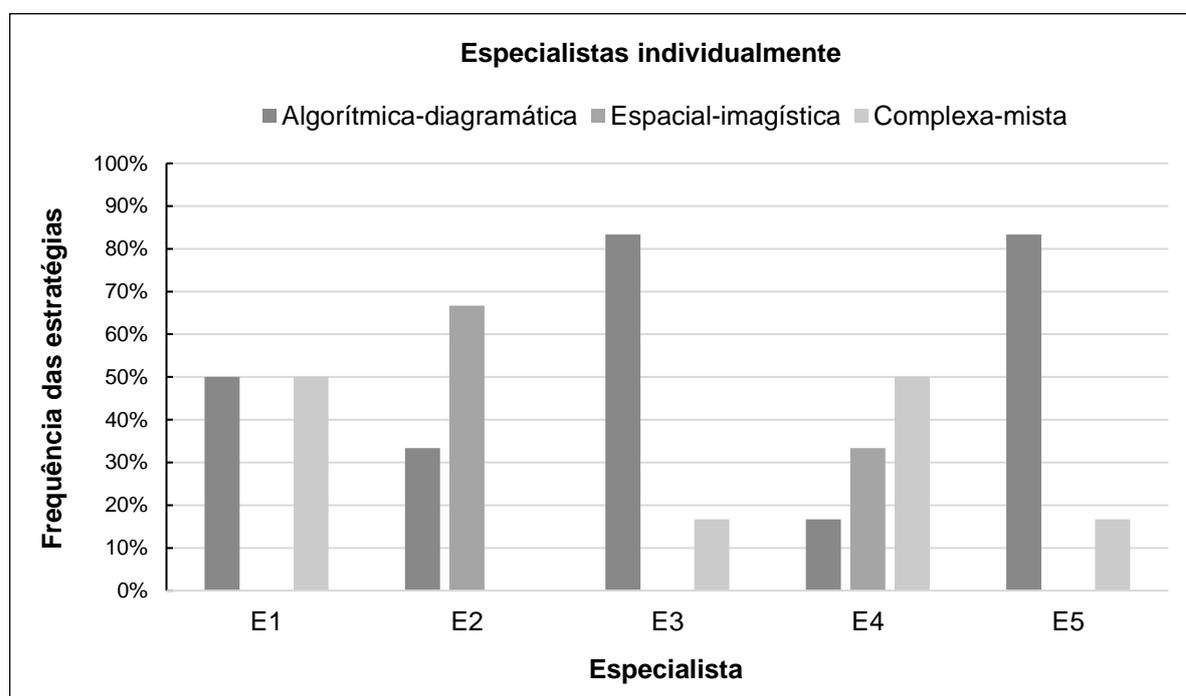
Fonte: a pesquisa

Os participantes especialistas mostraram maior uso da estratégia algorítmica-diagramática para resolver as questões, empregando com menor frequência a estratégia espacial-imagística. Diferentemente dos participantes novatos, percebeu-se que os especialistas mesmo ao preferirem diferentes estratégias para

uma mesma questão, a eficácia de resposta é alcançada satisfatoriamente, como observado nas questões 1, 5 e 6.

No Gráfico 9, pode-se analisar os especialistas individualmente, notando-se que os participantes E3 e E5 escolheram mais a estratégia algorítmica-diagramática, E4 adotou mais a estratégia complexa-mista e E2 mostrou maior utilização da estratégia espacial-imagística. Já o participante E1 apresentou a mesma frequência no uso das estratégias algorítmica-diagramática e complexa-mista.

Gráfico 9 - Frequência das estratégias escolhidas por cada especialista no Questionário de Estratégia (QE)



Fonte: a pesquisa

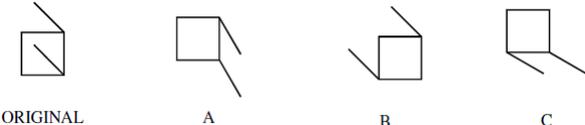
A predominância da utilização da estratégia algorítmica-diagramática pelos especialistas pode ter ocorrido pelo uso frequente de diagramas e representações moleculares em suas rotinas como professores da área de Química Orgânica, sendo uma estratégia mais pragmática em comparação com abordagens que exigem uma maior imaginação espacial.

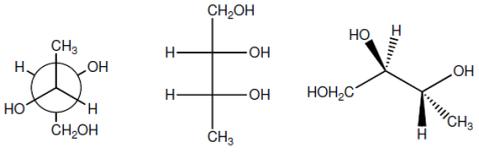
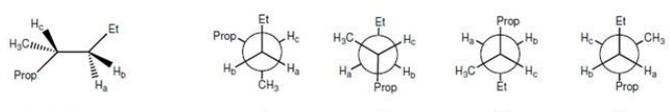
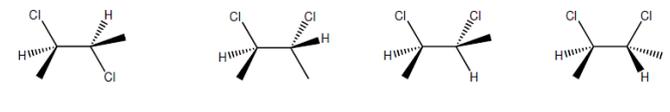
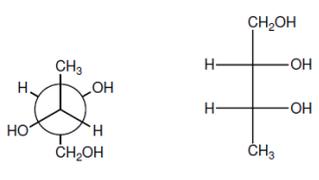
Ao comparar-se individualmente a frequência de uso com a eficácia de resposta, objetivando-se selecionar um participante de cada estratégia (apesar do objetivo não concretizado de se obter neuroimagens), destacam-se os participantes E3 pelo emprego eficaz da estratégia algorítmica-diagramática, E2 pelo emprego eficaz da estratégia espacial-imagística e E4 pelo emprego eficaz da estratégia

complexa-mista. Por mostrarem mecanismos mentais distintos durante as resoluções, esses representantes de cada uma das três estratégias iriam participar do exame de ressonância magnética funcional, onde seriam conhecidas as bases neurais associadas a esses mecanismos.

A fim de propiciar um panorama geral do uso e da eficácia das estratégias identificadas, relacionando-as com cada questão do instrumento QE, o Quadro 7 apresenta um resumo dos resultados de novatos e especialistas:

Quadro 7 - Detalhamento das questões, frequência e eficácia das estratégias empregadas por novatos e especialistas no Questionário de Estratégia (QE): algorítmica-diagramática (A-D), espacial-imagística (E-I) e complexa-mista (C-M)

Questão	Estratégias dos novatos		Estratégias dos especialistas	
	Frequência	Eficácia	Frequência	Eficácia
<p>1. Qual molécula é igual à original mostrada?</p>  <p>ORIGINAL A B C</p> <p><i>A questão avaliou o entendimento sobre a identificação de moléculas idênticas a partir de diferentes representações estruturais, o que requer habilidades para visualizar ou interpretar a orientação espacial dos átomos na molécula.</i></p>	<p>A-D 25%</p> <p>E-I 62,5%</p> <p>C-M 12,5%</p>	<p>A-D 100%</p> <p>E-I 40%</p> <p>C-M 0%</p>	<p>A-D 80%</p> <p>E-I 0%</p> <p>C-M 20%</p>	<p>A-D 100%</p> <p>E-I Não aplicada</p> <p>C-M 100%</p>
<p>2. Qual dos seguintes diagramas é um estereoisômero diferente da molécula original?</p>  <p>ORIGINAL A B C</p> <p><i>A questão avaliou a capacidade de distinguir entre moléculas que têm a mesma fórmula molecular e sequência de ligação (isômeros constitucionais), mas diferem na orientação espacial dos átomos (estereoisômeros).</i></p>	<p>A-D 75%</p> <p>E-I 25%</p> <p>C-M 0%</p>	<p>A-D 83%</p> <p>E-I 0%</p> <p>C-M Não aplicada</p>	<p>A-D 100%</p> <p>E-I 0%</p> <p>C-M 0%</p>	<p>A-D 80%</p> <p>E-I Não aplicada</p> <p>C-M Não aplicada</p>

<p>3. Quais são as duas moléculas iguais?</p>  <p>A B C</p> <p>1. A e B 2. A e C 3. B e C</p> <p><i>A questão avaliou a compreensão de conceitos de isomeria, solicitando a identificação de quais moléculas são iguais. Isso implica no entendimento sobre como moléculas podem ser representadas e como interpretar essas representações para reconhecer moléculas idênticas.</i></p>	<p>A-D 37,5%</p> <p>E-I 62,5%</p> <p>C-M 0%</p>	<p>A-D 33,3%</p> <p>E-I 40%</p> <p>C-M Não aplicada</p>	<p>A-D 20%</p> <p>E-I 20%</p> <p>C-M 60%</p>	<p>A-D 33,3%</p> <p>E-I 100%</p> <p>C-M 0%</p>
<p>4. Escolha a projeção de Newman que corresponda à estrutura original mostrada abaixo:</p>  <p>ORIGINAL A B C D</p> <p><i>A questão avaliou a habilidade de correlacionar diferentes tipos de representações moleculares, especificamente a projeção de Newman.</i></p>	<p>A-D 0%</p> <p>E-I 100%</p> <p>C-M 0%</p>	<p>A-D Não aplicada</p> <p>E-I 12,5%</p> <p>C-M Não aplicada</p>	<p>A-D 20%</p> <p>E-I 20%</p> <p>C-M 60%</p>	<p>A-D 0%</p> <p>E-I 0%</p> <p>C-M 33%</p>
<p>5. Qual das seguintes estruturas é um estereoisômero diferente do original?</p>  <p>ORIGINAL A B C</p> <p><i>A questão avaliou a habilidade de identificar estereoisômeros que são diferentes uns dos outros, mesmo tendo a mesma fórmula molecular.</i></p>	<p>A-D 12,5%</p> <p>E-I 62,5%</p> <p>C-M 25%</p>	<p>A-D 0%</p> <p>E-I 80%</p> <p>C-M 50%</p>	<p>A-D 40%</p> <p>E-I 40%</p> <p>C-M 20%</p>	<p>A-D 100%</p> <p>E-I 100%</p> <p>C-M 100%</p>
<p>6. Verdadeiro ou falso? Essas duas moléculas são isômeros conformacionais.</p>  <p>A B</p> <p>1. Verdadeiro 2. Falso</p> <p><i>A questão avaliou sobre a natureza dos isômeros conformacionais, que são diferentes conformações que uma molécula pode apresentar devido à rotação ao redor das ligações simples.</i></p>	<p>A-D 37,5%</p> <p>E-I 50%</p> <p>C-M 12,5%</p>	<p>A-D 33,3%</p> <p>E-I 25%</p> <p>C-M 100%</p>	<p>A-D 60%</p> <p>E-I 40%</p> <p>C-M 0%</p>	<p>A-D 66,6%</p> <p>E-I 100%</p> <p>C-M Não aplicada</p>

A questão 1 abordava a identificação de moléculas idênticas a partir de diferentes representações estruturais, onde os novatos aplicaram mais a estratégia espacial-imagística (62,5%) para a resolução. Mas dentre aqueles que aplicaram a estratégia algorítmica-diagramática (25%), 100% resolveram a questão corretamente, indicando que estes compararam as orientações espaciais dos átomos nas moléculas apresentadas sem a necessidade de gerar ou manipular uma imagem mental. Já os especialistas empregaram mais a estratégia algorítmica-diagramática (80%), sendo mais eficazes ao empregarem essa mesma estratégia (100% de acertos) e também a estratégia complexa-mista (100% de acertos). A eficácia de ambas estratégias indica que os especialistas dispõem tanto da análise sintática de representações quanto da combinação dessas representações com habilidades visuoespaciais.

Solicitando a identificação de estereoisômeros, a questão 2 mostrou que ambos os participantes novatos e especialistas utilizaram mais a estratégia algorítmica-diagramática (75% e 100%, respectivamente), sendo mais eficazes também ao utilizar essa mesma estratégia (83% e 80% de acertos, respectivamente). Nos dois grupos, os participantes que acertaram a questão analisaram as orientações espaciais dos átomos no próprio diagrama para identificar o estereoisômero diferente da molécula original.

Ao compararem diferentes tipos de representações moleculares na questão 3, os novatos usaram mais a estratégia espacial-imagística (62,5%), sendo mais eficazes também ao usar essa mesma estratégia. Porém, essa eficácia ocorreu apenas para 40% dos novatos que usaram a estratégia espacial-imagística, indicando que a tentativa de visualizar as moléculas e suas orientações espaciais mentalmente não foi suficiente para todos nessa resolução. Já os especialistas usaram mais a estratégia complexa-mista (60%), sendo mais eficazes aqueles que usaram a estratégia espacial-imagística (20%), com 100% de acertos, indicando a eficiência da relação entre habilidades visuoespaciais para manipular mentalmente as moléculas e um maior conhecimento químico característico de especialistas.

Na questão 4, onde foi solicitada a correlação de diferentes representações moleculares, principalmente a projeção de Newman, os novatos adotaram mais a estratégia espacial-imagística (100%), sendo mais eficazes também ao adotar essa mesma estratégia. No entanto, essa eficácia incidiu em apenas 12,5% dos novatos que adotaram a estratégia espacial-imagística, apontando que estes possuem dificuldades ao gerar ou manipular imagens mentais de estruturas moleculares

consideradas complexas. Em uma situação semelhante, os especialistas apresentaram a estratégia complexa-mista como a mais frequente (60%), sendo mais eficazes também ao usar essa mesma estratégia. Contudo, essa eficácia ocorreu apenas para 33% dos especialistas que usaram a estratégia complexa-mista, indicando que a alternância entre gerar as imagens mentais e analisar os diagramas para correlacionar a estrutura original com a projeção de Newman não foi a estratégia ideal.

Questionando sobre o reconhecimento de estereoisômeros, a questão 5 identificou o uso (62,5%) e a eficácia (80% de acertos) da mesma estratégia pelos novatos, a espacial-imagística. Para identificar o estereoisômero diferente da estrutura original, os novatos empregaram a visualização espacial para comparar mentalmente as estruturas, verificando como a orientação espacial dos átomos difere entre as estruturas propostas. E os especialistas empregaram mais as estratégias algorítmica-diagramática (40%) e espacial-imagística (40%), mas obtiveram eficácia de 100% de acertos no uso de todas as três estratégias. Essa eficácia no uso de qualquer uma das três estratégias destaca a habilidade dos especialistas de se adequar, uma vez que todos chegaram a mesma resolução correta usando a análise sintática das estruturas ou habilidades visuoespaciais ou ambos.

E na questão 6, que tratou da identificação de isômeros conformacionais, os novatos adotaram mais a estratégia espacial-imagística (50%), sendo mais eficazes aqueles que adotaram a estratégia complexa-mista (12,5%), com 100% de acertos. Esses novatos que resolveram a questão corretamente combinaram a análise sintática das estruturas com as habilidades de visualização espacial e rotação mental, facilitando a compreensão das diferenças conformacionais mediante a rotação ao redor das ligações simples. Já os especialistas adotaram mais a estratégia algorítmica-diagramática (60%), sendo mais eficazes ao usarem a estratégia espacial-imagística (40%), com 100% de acertos, indicando que ao analisarem diferenças conformacionais entre diferentes representações moleculares, o uso de habilidades visuoespaciais foi mais significativo.

Pode-se observar que a análise individual das questões evidenciou a importância de estratégias específicas dependendo da dificuldade do problema proposto. Ao longo do questionário, os especialistas adequaram suas estratégias de forma mais eficaz que os novatos, mostrando que um maior conhecimento químico característico de especialistas não se restringe apenas ao conteúdo, nesse caso a

Química Orgânica, mas também na habilidade de aplicar diferentes estratégias conforme a necessidade.

Verificou-se que pode haver uma sobreposição entre as estratégias que envolvem a cognição espacial e o raciocínio diagramático durante a resolução dos problemas, mas de uma forma mais complexa e específica do que os pressupostos tradicionais sobre a cognição espacial argumentam. As habilidades visuoespaciais da cognição espacial são demandas em resoluções específicas, desempenhando um papel chave em problemas que exigiam uma “tradução” ou alteração significativa das representações moleculares. O raciocínio diagramático, por sua vez, foi um importante mediador na cognição espacial, permitindo que os participantes resolvessem os problemas químicos sem necessariamente recorrer à visualização espacial, rotação mental ou orientação espacial. Portanto, os mecanismos mentais envolvidos na resolução de problemas químicos envolvem uma sobreposição funcional dessas habilidades, de forma complementar, em vez de um processamento isolado de apenas uma delas.

Uma vez identificados os mecanismos mentais dos participantes envolvidos na resolução de problemas de Química Orgânica, encaminha-se para a discussão do processamento do raciocínio químico de novatos e especialistas de diferentes âmbitos da CR. A partir da caracterização dos perfis representacionais e da identificação dos mecanismos mentais, pretende-se tecer relações entre o referencial teórico adotado na presente pesquisa e sobre como novatos e especialistas elaboram o raciocínio químico.

5.3 PROCESSAMENTO DO RACIOCÍNIO QUÍMICO DE NOVATOS E ESPECIALISTAS DE DIFERENTES ÂMBITOS DA COMPETÊNCIA REPRESENTACIONAL

No presente estudo, adotou-se como principais aportes teóricos a Teoria dos Esquemas proposta por Barlett (1932), o modelo tripartido da memória de trabalho de Baddeley (1986) e a Competência Representacional (CR) descrita por Kozma e Russell (1997, 2005) para discorrer sobre como os químicos processam, armazenam e aplicam conhecimentos em uma área comumente conhecida por sua complexidade e abstração (Gabel, 1999; Johnstone, 1991; O' Dwyer; Childs, 2017; Talanquer, 2022).

Com a Teoria dos Esquemas (Barlett, 1932), reconhece-se como base do

processo de aprendizagem a construção e a utilização de estruturas de conhecimento organizadas, que são importantes para a compreensão e aplicação de conceitos químicos. Os esquemas são o mecanismo pelo qual os indivíduos conectam novos conhecimentos aos já existentes como, por exemplo, ao aprender sobre reações químicas, não se memoriza cada reação de forma isolada, mas sim se integra novas reações a esquemas existentes de conhecimento sobre leis de conservação, tipos de reações e energia de ativação. Nessa construção dos esquemas, o modelo tripartido de memória de Baddeley (1986) interage especificamente ao providenciar o suporte operacional necessário para o processamento ativo das informações onde os esquemas são acessados, manipulados e expandidos. O esboço visuoespacial, por exemplo, é fundamental para a visualização e manipulação das estruturas moleculares tridimensionais, enquanto a alça fonológica facilita o processamento de informações verbais e simbólicas, como nomenclaturas e equações químicas. O executivo central combina essas atividades, gerenciando a interação entre esquemas pré-existentes e informações novas, garantindo que a aprendizagem seja tanto estruturada quanto adaptável.

Assim, a Competência Representacional (CR) (Kozma; Russell, 1997, 2005) associa a Teoria dos Esquemas e o modelo tripartido da memória de trabalho de Baddeley ao processo de aprendizagem química. A competência representacional refere-se à habilidade de compreender, utilizar e alternar entre diferentes representações de conceitos químicos, como modelos moleculares, diagramas e equações. Essa competência é desenvolvida pelos esquemas de conhecimento que os químicos construíram e seguem ampliando, operacionalizada por meio da memória de trabalho, demandando a manipulação ativa de representações para resolver problemas e compreender conceitos químicos. Na transformação de uma equação química em um modelo molecular, por exemplo, faz-se necessário um acesso rápido aos esquemas relevantes sobre reações químicas, assim como o uso da habilidade de visualizar espacialmente as moléculas envolvidas e da aplicação do conhecimento verbal e simbólico na interpretação dos conceitos.

A análise dos resultados obtidos nesse estudo à luz de tais aportes teóricos evidencia a importância de uma base de conhecimento estruturada e adaptável (esquemas), um sistema de processamento ativo de informação (memória de trabalho) e habilidades de interpretação e comunicação de informações complexas (competência representacional). Em conjunto, esses componentes oportunizam a

aprendizagem química e as habilidades e práticas necessárias para pensar, comunicar e agir dentro do contexto químico.

Os resultados provenientes do Teste de Competência Representacional (TCR) e do Questionário de Estratégia (QE) indicaram perspectivas diferentes do raciocínio químico de novatos e especialistas. No que se refere à CR, os novatos apresentaram resultados próximos aos dos especialistas em todos os cinco âmbitos avaliados pelo TCR. Em termos de habilidades para interpretar, alternar entre representações e fazer conexões entre representações e conceitos, os novatos e os especialistas que compuseram a amostra de pesquisa não mostraram diferenças significativas. Mesmo que não significativas, destacam-se as diferenças observadas em certos âmbitos, como a maior facilidade dos especialistas em incorporar elementos simbólicos nas representações (CR2) e maior habilidade em fazer conexões conceituais complexas (CR5). E também o âmbito CR3, que trata do uso de representações formais e da aplicação de regras sintáticas, onde os novatos apresentaram desempenho superior ao dos especialistas.

Apesar disso, a análise dos resultados do QE, que avaliou as estratégias empregadas durante a resolução de problemas de Química Orgânica, demonstrou uma diferença significativa entre os participantes novatos e especialistas. Os especialistas apresentaram um desempenho significativamente melhor, indicando que, embora novatos e especialistas possam ter competências representacionais semelhantes, a aplicação dessas competências em estratégias de resolução de problemas difere entre os dois grupos. Os especialistas mostraram-se mais eficazes ao utilizarem mais a estratégia algorítmica-diagramática, o que evidencia uma maior habilidade na utilização de regras, fórmulas e diagramas para mostrar relações espaciais. As diferenças observadas nos resultados do QE podem ser interpretadas em uma perspectiva de desenvolvimento progressivo da competência representacional em Química. Os especialistas, com maior experiência e conhecimento, foram mais eficazes ao integrar e aplicar suas competências representacionais para resolver os problemas, escolhendo e alternando entre estratégias com base nas necessidades específicas de cada problema. Já os novatos, apesar de possuírem habilidades representacionais próximas (como demonstrado pelo TCR), podem não ter desenvolvido ainda a mesma profundidade de conhecimento conceitual ou a mesma capacidade de adaptação estratégica para aplicar essas competências como os especialistas.

A fim de tecer-se relações entre o referencial teórico adotado na presente pesquisa e o processamento do raciocínio químico de novatos e especialistas de diferentes âmbitos da Competência Representacional, dividiu-se as discussões a seguir em quatro frentes: (I) comparando-se os novatos com a menor e a maior competência representacional; (II) comparando-se os especialistas com a menor e a maior competência representacional; (III) comparando-se o novato e o especialista com as menores competências representacionais; e (IV) comparando-se o novato e o especialista com as maiores competências representacionais. Na sequência, articulou-se os aportes teóricos que embasaram a pesquisa aos resultados do novato e do especialista com as maiores competências representacionais.

5.3.1 Análise comparativa entre os perfis representacionais e os mecanismos mentais

Objetivando-se analisar comparativamente os resultados dos perfis representacionais e dos mecanismos mentais, considerou-se pertinente a escolha de dois participantes com as menores competências representacionais e de dois participantes com as maiores competências representacionais, averiguando-se as habilidades cognitivas predominantemente eficazes durante a resolução de problemas (cognição espacial, raciocínio diagramático ou ambos). Em cada escolha, selecionou-se um novato e um especialista, resultando na seguinte amostragem:

- menores habilidades representacionais: novato N3 (raciocínio diagramático) e especialista E4 (cognição espacial);
- maiores habilidades representacionais: novato N2 (cognição espacial) e especialista E5 (raciocínio diagramático).

Primeiramente, comparando-se os novatos com a menor e a maior competência representacional, N3 e N2, respectivamente, verificou-se que N3 empregou mais a estratégia algorítmicas-diagramática para a resolução de problemas químicos. Essa tendência pode ter influenciado seu menor desempenho em âmbitos da CR que exigiam uma maior capacidade de visualização e manipulação de representações (CR3, CR4), indicando possíveis dificuldades em ir além da superfície das representações para analisar suas implicações conceituais. Já o novato com a maior competência representacional, N2, utilizou mais a estratégia espacial-imagística, que pode estar relacionada ao seu melhor desempenho em âmbitos da

CR que requeriam a alternância entre diferentes representações e a conexão entre representações e conceitos abstratos de forma crítica (CR4 e CR5).

Quanto aos especialistas com a menor e a maior competência representacional, E4 e E5, respectivamente, observou-se que E4 utilizou mais a estratégia espacial-imagística para a resolução de problemas químicos. Essa propensão pode ter impactado negativamente seu desempenho no âmbito CR3, indicado pela baixa taxa de acertos em comparação com os demais especialistas, demonstrando dificuldades na capacidade de adaptação dos conceitos às diferentes situações por meio de representações formais e na interpretação de diagramas mais complexos. Já o especialista E5 adotou predominantemente a estratégia algorítmica-diagramática, demonstrando uma compreensão significativa nos âmbitos CR4 e CR5, que envolvem o uso de representações para gerar explicações e a conexão entre representações e conceitos abstratos.

Ao comparar-se o novato N3 e o especialista E4 com as menores competências representacionais, percebeu-se que ambos tiveram dificuldades consideráveis no âmbito CR3, que envolve a capacidade de alternar e integrar diferentes tipos de representações químicas (como fórmulas químicas, modelos moleculares e representações simbólicas) para compreender conceitos e resolver problemas dentro do mesmo contexto conceitual. Isso sugere que, apesar de suas diferenças em termos de experiência e nas estratégias de resolução aplicadas, ambos demonstraram dificuldades quando se trata de aplicar e interpretar regras sintáticas que orientam o uso de símbolos e diagramas em diferentes contextos. O novato N3 empregou mais a estratégia algorítmica-diagramática para a resolução dos problemas químicos, evidenciando sua dificuldade em gerar ou manipular imagens mentais, que poderiam auxiliá-lo na interpretação de representações em âmbitos mais complexos (CR4 e CR5). Já o especialista E4, apesar de ter adotado mais a estratégia espacial-imagística, pode ter ficado limitado pela dificuldade em abstrair e aplicar regras sintáticas na análise e na interpretação das representações do âmbito CR3.

E na comparação entre o novato N2 e o especialista E5 com as maiores competências representacionais, constatou-se em ambos a transição eficiente da capacidade de lidar com representações de forma mais concreta e visual para uma abordagem mais abstrata e conceitual. Enquanto o novato N2 se concentrou mais em aspectos visuais e espaciais, como a estrutura de moléculas ou a configuração de reações químicas, empregando mais a estratégia espacial-imagística para

compreender os fenômenos químicos, o especialista E5 demonstrou uma compreensão mais abrangente e integrada da Química, onde as representações não são apenas visualizadas, mas também analisadas e abreviadas para mostrar relações conceituais mais complexas. Esse especialista utilizou mais a estratégia algorítmica-diagramática, configurando uma maior habilidade para navegar entre diferentes níveis de abstração e para aplicar regras e princípios químicos apropriadamente.

Dada as correlações entre os perfis representacionais e os mecanismos mentais dos participantes de interesse, discute-se a seguir os aportes teóricos que embasaram a pesquisa com os resultados do novato e do especialista com as maiores competências representacionais, uma vez que ao selecionar-se os participantes com as maiores habilidades representacionais, assegura-se que estes possuem os conhecimentos químicos pertinentes à investigação.

5.3.2 Análise teórica do processamento do raciocínio químico: comparativo entre o novato e o especialista com as maiores competências representacionais

Para discorrer sobre como os químicos processam, armazenam e aplicam seus conhecimentos na perspectiva da Teoria dos Esquemas (Barlett, 1932), do modelo tripartido da memória de trabalho de Baddeley (1986) e da Competência Representacional (CR) (Kozma; Russell, 1997, 2005), selecionou-se o novato e o especialista com as maiores competências representacionais, N2 e E5, respectivamente. Dessa forma assegura-se que os participantes possuem os conhecimentos químicos pertinentes à pesquisa, principalmente tratando-se dos participantes novatos. Pois ao apresentarem alta competência na transição entre diferentes representações químicas, pressupõe-se que a maioria das dificuldades acerca da visualização espacial de moléculas já tenha sido superada (Davishahl *et al.*, 2021; Lin; Wu, 2021; Rahmawati; Dianhar; Arifin, 2021), evitando-se assim resoluções baseadas em escolhas ao acaso (palpites ou adivinhações).

A análise dos resultados do novato N2 demonstrou uma competência representacional avançada, evidenciada por sua alta taxa de acertos no instrumento TCR, e o uso de habilidades da cognição espacial, evidenciada pela preferência da estratégia espacial-imagística no instrumento QE. Esses resultados apontaram que o novato N2 possui esquemas bem desenvolvidos para a manipulação de

representações químicas, facilitando a interpretação, alternância e conexão entre diferentes representações. A utilização predominante da estratégia espacial-imagística indicou uma maior habilidade em visualizar estruturas tridimensionais e manipulá-las mentalmente. De acordo com a Teoria dos Esquemas, a capacidade do novato N2 de manipular representações químicas pode ser atribuída ao desenvolvimento de esquemas cognitivos robustos, que facilitaram a compreensão e a aplicação de conceitos químicos e permitiram a integração de novas informações com o conhecimento pré-existente. Ainda, a preferência pela estratégia espacial-imagística alinha-se com o modelo tripartido da memória de trabalho de Baddeley, especificamente o uso do esboço visuoespacial, onde se mantém e se manipula informações visuais e espaciais na memória de trabalho, um elemento importante para a resolução dos problemas de Química Orgânica que exigiam a visualização de estruturas moleculares em três dimensões.

Sobre os resultados apresentados pelo especialista E5, averiguou-se que este apresentou uma competência representacional elevada, demonstrada por sua alta taxa de acertos no instrumento TCR. A competência em vincular conceitualmente diferentes representações permitiu ao especialista E5 uma abordagem mais abstrata e conceitual na resolução dos problemas. No instrumento QE, identificou-se o predomínio do uso da estratégia algorítmica-diagramática, evidenciando um domínio significativo em manipular conceitualmente representações químicas. Esse domínio é indicativo de esquemas altamente desenvolvidos, que Bartlett (1932) propôs como estruturas mentais dinâmicas que organizam e interpretam informações. Os esquemas do especialista E5 facilitaram sua manipulação de representações simbólicas e diagramáticas e potencializaram sua capacidade de abstração e generalização. A preferência pela estratégia algorítmica-diagramática indicou uma ativação acentuada do componente executivo central do modelo de memória de trabalho de Baddeley, onde esse componente atua coordenando tarefas cognitivas e manipulando ativamente as informações na alça fonológica e no esboço visuoespacial. O uso da alça fonológica, que processa e mantém informações verbais e sequenciais, pode ser deduzido a partir da habilidade do especialista E5 em sequenciar e aplicar regras diagramáticas verbalmente decodificadas nos problemas de Química Orgânica. Além disso, a capacidade de integrar e manipular informações verbais e diagramáticas indicou a utilização apurada do executivo central, facilitando a resolução de problemas por meio da combinação de recursos cognitivos.

Percebe-se que há uma constante interação entre as competências representacionais e os mecanismos mentais, mas de formas distintas entre químicos novatos e químicos especialistas. O especialista E5, tendo anos de experiência teórica e prática com uma exposição a uma ampla variedade de problemas químicos, desenvolveu esquemas cognitivos robustos que facilitaram o uso de representações simbólicas e diagramáticas. Isso pode ser atribuído à sua habilidade de abstrair conceitos de representações complexas, utilizando o raciocínio diagramático para navegar pelas particularidades da Estereoquímica. Por outro lado, o novato N2 ainda pode estar no processo de construção desses esquemas cognitivos, dependendo mais da cognição espacial, intuitiva e visual, para compreender a disposição tridimensional das moléculas, um aspecto fundamental da Estereoquímica. Essa preferência reflete a fase inicial de seu desenvolvimento cognitivo, onde a manipulação visual e espacial das representações fornece um caminho mais acessível para entender conceitos complexos. Por isso, destaca-se a relevância de se propor um desenvolvimento progressivo da competência representacional, onde se empregue estratégias cognitivas variadas para superar as dificuldades da aprendizagem química, principalmente no que tange a Química Orgânica.

5.3.3 Proposta de progressão da competência representacional em Química Orgânica: o uso integrado da cognição espacial e do raciocínio diagramático

A partir dos resultados obtidos no presente estudo, delineou-se uma proposta de progressão da competência representacional para fins de planejamento do processo de ensino e aprendizagem de Química Orgânica. Apresenta-se então um desenvolvimento pedagógico sequencial que se move da compreensão básica à aplicação avançada de conceitos químicos por meio de diferentes representações.

Essa progressão foi baseada nas diferenças identificadas entre os químicos novatos e químicos especialistas investigados, considerando-se as suas habilidades representacionais e cognitivas utilizadas na resolução de problemas de Química Orgânica. Nesse contexto pode-se corroborar em parte os pressupostos tradicionais sobre a cognição espacial que supõem que a habilidade de gerar e manipular imagens mentais de estruturas moleculares tridimensionais é uma componente chave para a resolução de problemas químicos (Pappa; Byers, 2018; Stieff *et al.*, 2020; Wu; Krajcik;

Soloway, 2001). A análise dos dados obtidos evidenciou que tanto a cognição espacial quanto o raciocínio diagramático desempenham papéis importantes nos diferentes âmbitos da CR, onde os especialistas adequaram suas habilidades cognitivas de forma mais eficaz que os novatos, mostrando que um maior conhecimento químico característico de especialistas não se restringe apenas ao conteúdo, mas também na habilidade de aplicar diferentes estratégias conforme a necessidade. Esse resultado indica que a capacidade de aplicar as habilidades cognitivas referentes à cognição espacial e ao raciocínio diagramático de forma seletiva caracteriza uma maior proficiência na área.

Para o desenvolvimento progressivo da competência representacional no contexto da Química Orgânica, essa proposta ressalta que, diferentemente dos pressupostos tradicionais sobre a cognição espacial, a resolução de problemas de Química Orgânica demanda a aplicação seletiva de ambos os mecanismos - cognição espacial e raciocínio diagramático. Por isso, o delineamento apresentado no Quadro 8 conta com uma estrutura contendo os cinco âmbitos da CR e a integração das habilidades cognitivas que compõe os mecanismos mentais utilizados na resolução de problemas químicos, exemplificando o uso dessas habilidades.

Quadro 8 - Estrutura para uma progressão da competência representacional em Química Orgânica

Âmbito da CR	Descrição da progressão	Exemplo
CR1: a capacidade de interpretar os significados de representações químicas.	Os estudantes podem ser introduzidos à representação de fenômenos químicos por meio de suas características físicas, empregando um enfoque inicial nas habilidades da cognição espacial para facilitar a visualização de estruturas moleculares. Paralelamente, pode-se introduzir as habilidades do raciocínio diagramático ao ensinar os estudantes a interpretar símbolos e diagramas, estabelecendo-se uma base para o entendimento de representações mais complexas.	<i>Introdução à Estereoquímica e à representação de moléculas em modelos de "bola e bastão":</i> os estudantes constroem modelos físicos de moléculas simples, como o butano, utilizando kits manipuláveis de modelagem molecular. Essa atividade destaca a visualização das estruturas moleculares, familiarizando os estudantes com conceitos básicos de Estereoquímica, como a geometria tetraédrica do carbono.
CR2: a capacidade de alternar entre diferentes representações em um mesmo contexto conceitual.	Os estudantes podem iniciar a incorporação de elementos simbólicos em suas representações, combinando as habilidades da cognição espacial para compreender as implicações espaciais desses símbolos e as habilidades do raciocínio diagramático para aplicar e interpretar esses elementos dentro	<i>Representações de projeções de Fischer e projeções de Newman:</i> os estudantes convertem representações tridimensionais de moléculas em projeções de Fischer e Newman. Essa tarefa combina as habilidades da cognição espacial, para entender a orientação espacial das moléculas, e as habilidades do raciocínio diagramático, para

	de um contexto químico específico. Pode-se usar atividades práticas que envolvam a transformação de representações espaciais em simbólicas e vice-versa.	aplicar os símbolos e regras específicas dessas projeções.
CR3: a capacidade de alternar entre diferentes representações em diferentes contextos conceituais.	Pode-se ressaltar a habilidade de gerar representações que incorporam entidades ou processos essenciais não observáveis. As habilidades da cognição espacial podem ser utilizadas para visualizar conceitos abstratos, enquanto as habilidades do raciocínio diagramático podem ser aplicadas para explorar a sintaxe dessas representações formais. Assim, os estudantes aprendem a conectar diferentes representações, baseando-se na sua estrutura formal, e compreendem mais profundamente as regras que regem as representações químicas.	<i>Análise de mecanismos de reações estereoespecíficas:</i> por meio do uso de diagramas de reações, os estudantes identificam os intermediários reacionais e os produtos de reações estereoespecíficas. Essa atividade demanda a aplicação da sintaxe das representações formais de mecanismos de reação e a compreensão de como a configuração espacial influencia os produtos da reação.
CR4: a capacidade de usar representações para gerar explicações.	Os estudantes podem avançar para uma aplicação significativa de sistemas formais de representação, integrando plenamente as habilidades da cognição espacial e do raciocínio diagramático. Eles podem ser capazes de transformar uma representação em outra, fundamentando-se no significado compartilhado dessas representações, o que pode facilitar a explicação de fenômenos químicos complexos e a resolução de problemas mais complexos.	<i>Estudo de isomeria óptica e atividade óptica:</i> os estudantes utilizam representações de moléculas para explorar conceitos de isomeria óptica, incluindo enantiômeros e diastereômeros, e como eles afetam a polarização da luz. Essa atividade integra as habilidades da cognição espacial para visualizar as diferenças entre isômeros e as habilidades do raciocínio diagramático para relacionar essas diferenças com a atividade óptica.
CR5: a capacidade de fazer conexões entre representações e conceitos.	Neste estágio avançado, os estudantes podem empregar representações para explicar relações complexas entre entidades e processos químicos, selecionando a representação mais apropriada para cada situação. As habilidades da cognição espacial podem permitir a visualização detalhada das implicações espaciais das reações químicas, enquanto as habilidades do raciocínio diagramático habilitam a escolha e a manipulação de representações para apoiar argumentos dentro de um contexto científico.	<i>Síntese estereosseletiva e a influência da estereoquímica na reatividade e propriedades físicas:</i> os estudantes exploram e selecionam representações adequadas para descrever o processo de síntese estereosseletiva de compostos orgânicos, apontando como a configuração do centro estereogênico influencia tanto a reatividade quanto as propriedades físicas. Essa tarefa solicita que os estudantes empreguem tanto as habilidades da cognição espacial para entender as implicações tridimensionais das estruturas quanto as habilidades do raciocínio diagramático para escolher e aplicar as representações mais claras para explicar o impacto da estereoquímica nessas propriedades. Eles devem justificar suas escolhas de representação, argumentando com base em princípios químicos fundamentais.

Fonte: a pesquisa

A implementação dessa proposta de progressão da competência representacional envolve atividades didáticas que estimulam a reflexão crítica sobre o uso de representações em Química Orgânica, ressaltando a transição natural entre a cognição espacial e raciocínio diagramático. O uso de recursos visuais manipuláveis, de programas de modelagem molecular, de simulações e animações (Habig, 2020; Ippoliti *et al.*, 2022; Mohsen; Alangari, 2024) podem potencializar o desenvolvimento das diferentes habilidades cognitivas em estudantes com uma maior tendência de empregar apenas uma delas, preparando-os para tornarem-se químicos especialistas.

Uma vez que os estudantes de Química ao avançarem em seus estudos se deparam com conceitos cada vez mais abstratos e complexos, um processo de ensino e aprendizagem apoiado por uma progressão da competência representacional pode auxiliá-los ao iniciar com representações simples e concretas e, gradualmente, introduzindo representações mais abstratas e complexas. Assim, esse processo pode oportunizar desde a compreensão conceitual até o desenvolvimento do pensamento crítico, junto ao uso seletivo (característico de especialistas) de habilidades cognitivas que compõe os mecanismos mentais utilizados na resolução de problemas químicos.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente pesquisa de doutorado buscou unir a pesquisa educacional com a neurociência cognitiva por meio de um delineamento metodológico incorporando técnicas comportamentais e de neuroimagem. Estas visavam explorar o processamento do raciocínio de químicos novatos (estudantes universitários) e químicos especialistas (professores universitários) durante a resolução de problemas de Química Orgânica. Ao se elucidar as habilidades do uso de representações, as habilidades cognitivas e as regiões cerebrais associadas ao raciocínio químico, pode-se relacionar as diferenças entre novatos e especialistas com os fundamentos das dificuldades da aprendizagem química, a fim de superá-las.

Para caracterizar os perfis representacionais dos participantes da pesquisa, adotou-se o aporte teórico Competência Representacional (CR) Kozma e Russell (1997, 2005), que trata de um conjunto de habilidades e práticas (distribuídas em cinco âmbitos) que possibilita usar reflexivamente uma variedade de representações ou visualizações para pensar, comunicar e agir sobre fenômenos químicos e físicos. A essência da CR está na ideia de que a Ciência, particularmente a Química, utiliza uma linguagem de representações que inclui símbolos, equações, gráficos, modelos moleculares e animações. Essas representações são fundamentais para a visualização de conceitos abstratos, a comunicação de descobertas e a elaboração de teorias sobre o comportamento dos materiais no nível microscópico (Bernal-Ballen; Ladino-Ospina, 2019; Fernandes; Locatelli, 2021; Tsaparlis; Pappa; Byers, 2018). A elucidação das habilidades do uso de representações químicas permitiu identificar como ambos os grupos compreendem e utilizam representações para interpretar e comunicar conceitos químicos. Compreender as diferenças das habilidades representacionais entre novatos e especialistas pode orientar um percurso de desenvolvimento progressivo da CR, já que a capacidade de transitar fluentemente entre os níveis macroscópico, microscópico e simbólico da matéria é fundamental para a compreensão completa dos fenômenos químicos.

Para explorar os mecanismos mentais envolvidos na resolução de problemas de Química Orgânica, identificaram-se as estratégias adotadas por novatos e especialistas durante a resolução. Essas estratégias foram categorizadas *a priori* como algorítmica-diagramática, espacial-imagística e complexa-mista, contemplando resoluções que envolvessem cognição espacial, raciocínio diagramático ou ambos.

Os pressupostos tradicionais sobre a cognição espacial na Química supõem que a habilidade de gerar e manipular imagens mentais de estruturas moleculares tridimensionais é uma componente chave para a resolução de problemas químicos (Pappa; Byers, 2018; Stieff *et al.*, 2020; Wu; Krajcik; Soloway, 2001). Esse pressuposto sugere que, devido à natureza tridimensional das moléculas e às interações moleculares que fundamentam os conceitos e processos químicos, os indivíduos devem possuir habilidades de visualização espacial bem desenvolvidas para aprender Química. Ao não empregar habilidades de cognição espacial, mas sim utilizar diagramas, modelos tridimensionais e regras para representar essas estruturas de forma clara e precisa, tem-se o chamado raciocínio diagramático (Kiernan; Manches; Seery, 2021; Wu; Shah, 2004). Trata-se de uma habilidade cognitiva que envolve a capacidade de criar, interpretar e manipular diagramas, gráficos e representações visuais para resolver problemas (Sowa, 2020).

Já a elucidação acerca das regiões cerebrais mais ativadas durante a resolução de problemas químicos, associando o raciocínio químico a suas respectivas bases neurais, não foi concretizada até a conclusão dessa pesquisa. Com isso, para responder quais são as diferenças do processamento do raciocínio químico entre novatos e especialistas de diferentes âmbitos da CR, estabeleceram-se relações entre os perfis representacionais, os mecanismos mentais e o referencial teórico adotado na presente pesquisa.

Pode-se averiguar que embora ambos novatos e especialistas tenham apresentado níveis semelhantes de competência em diversos âmbitos da CR, ocorreram diferenças significativas na capacidade de empregar essas competências na resolução de problemas de Química Orgânica. Observou-se que os especialistas demonstraram uma compreensão mais aprofundada e uma maior habilidade de integrar elementos simbólicos nas representações, além de formular conexões conceituais de maior complexidade. Já os novatos mostraram uma tendência maior para aplicar habilidades da cognição espacial, evidenciando que eles tendem mais para o uso de estratégias que envolvem a visualização e manipulação mental de estruturas e formas tridimensionais, característica da cognição espacial, do que depender de representações simbólicas e diagramáticas complexas, que são fundamentais no raciocínio diagramático. Essa preferência aponta que os novatos preferem resolver problemas de Química Orgânica por meio de uma abordagem visual

e espacial, refletindo uma fase inicial de desenvolvimento onde o domínio sobre representações mais abstratas e simbólicas ainda está sendo construído.

A diferenciação entre novatos e especialistas torna-se mais evidente ao examinar as estratégias de resolução de problemas adotadas por cada grupo. Os especialistas se destacaram pela preferência da estratégia algorítmica-diagramática, o que demonstra uma competência superior na utilização de regras, fórmulas e diagramas para explicar relações espaciais. Essa tendência pode ser justificada pela experiência acumulada e do conhecimento profundo no uso estratégico das competências representacionais, marcando uma diferenciação acerca da eficácia com que especialistas aplicam seu conhecimento na prática.

Os resultados obtidos nesse estudo reforçam a complexidade característica da aprendizagem química (Bongers *et al.*, 2020; Stieff, 2007; Stieff; Raje, 2010), destacando a importância de se desenvolver a CR. A proposta de um desenvolvimento progressivo de competências representacionais, baseada na análise dos dados coletados, sugere uma alternativa para o planejamento pedagógico que objetiva aprimorar a capacidade dos estudantes de manipular diferentes representações e de aplicá-las na resolução de problemas químicos.

Portanto, esse estudo pode corroborar em parte os pressupostos tradicionais sobre a cognição espacial que supõem que a habilidade de gerar e manipular imagens mentais de estruturas moleculares tridimensionais é uma componente chave para a resolução de problemas químicos (Pappa; Byers, 2018; Stieff *et al.*, 2020; Wu; Krajcik; Soloway, 2001). Demonstrou-se que tanto a cognição espacial quanto o raciocínio diagramático desempenham papéis importantes nos diferentes âmbitos da CR, onde os especialistas adequaram suas habilidades cognitivas de forma mais eficaz que os novatos, mostrando que um maior conhecimento químico característico de especialistas não se restringe apenas ao conteúdo, mas também na habilidade de aplicar diferentes estratégias conforme a necessidade. Logo, esse resultado aponta que a capacidade de aplicar as habilidades cognitivas referentes à cognição espacial e ao raciocínio diagramático de forma seletiva caracteriza uma maior proficiência em Química.

REFERÊNCIAS

- ARSALIDOU, Marie; TAYLOR, Margot J. Is $2+2=4$? Meta-analyses of brain areas needed for numbers and calculations. **Neuroimage**, v. 54, n. 3, p. 2382-2393, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2010.10.009>.
- AUSUBEL, David P. **The Psychology of meaningful verbal learning**. New York: Grune and Stratton, 1963.
- AUSUBEL, David P. **Educational psychology: a cognitive view**. New York: Holt, Rinehart and Winston, 1968.
- BECKER, Nicole *et al.* Translating across macroscopic, submicroscopic, and symbolic levels: the role of instructor facilitation in an inquiry-oriented physical chemistry class. **Chemistry education research and practice**, v. 16, n. 4, p. 769-785, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1039/C5RP00064E>.
- BADDELEY, Alan D. **Working memory**. Oxford: Oxford University Press, 1986.
- BADDELEY, Alan D. Working memory. **Science**, v. 255, p. 556-559, 1992. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1736359>.
- BADDELEY, Alan D. The psychology of memory. *In*: BADDELEY, Alan D.; WILSON, Barbara A.; WATTS, Fiona N. (Orgs.). **Handbook of memory disorders**. Chichester: J. Wiley and Sons, 1995.
- BADDELEY, Alan D. **Human memory: theory and practice**. East Sussex: Psychology Press, 1997.
- BADDELEY, Alan D. The episodic buffer: a new component of working memory? **Trends in cognitive sciences**, v. 4, n. 11, p. 417-423, 2000. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1364-6613\(00\)01538-2](https://doi.org/10.1016/S1364-6613(00)01538-2).
- BADDELEY, Alan D.; HITCH, Graham. Working Memory. *In*: BOWER, Gordon A. (Org.). **Recent advances in learning and motivation**. v. 8, p. 47-90. New York: Academic Press, 1974.
- BADDELEY, Alan D.; GATHERCOLE, Susan E.; PAPAGNO, Costanza. The phonological loop as a language learning device. **Psychological review**, v. 105, p. 158-173, 1998. DOI: <https://doi.org/10.1037/0033-295X.105.1.158>.
- BARTLEY, Jessica E. *et al.* Brain activity links performance in science reasoning with conceptual approach. **npj Science of learning**, v. 4, n. 1, p. 1-8, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41539-019-0059-8>.
- BASSETT, Danielle S. *et al.* Learning-induced autonomy of sensorimotor systems. **Nature neuroscience**, v. 18, n. 5, p. 744-751, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1038/nn.3993>.

BERNAL-BALLEN, Andres; LADINO-OSPINA, Yolanda. Assessment: A suggested strategy for learning chemical equilibrium. **Education Sciences**, v. 9, n. 3, p. 174, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/educsci9030174>.

BERNARDES, Thaygra S. *et al.* O uso combinado das metodologias just-in-time teaching e peer instruction no ensino médio: uma proposta para o ensino de Soluções. **Redin-Revista educacional interdisciplinar**, v. 8, n. 1, 2019. Disponível em: <https://seer.faccat.br/index.php/redin/article/view/1542>.

BODNER, George M.; DOMIN, Daniel S. The role of representations in problem solving in chemistry. *In*: LAVOIE, Derrick R. (Ed.). **Toward a Cognitive-science perspective for scientific problem solving**. National Association for Research in Science Teaching, 1995, p. 245-263. Disponível em: <https://files.eric.ed.gov/fulltext/ed454060.pdf#page=271>.

BODNER, George M.; GUAY, Roland B. The Purdue visualization of rotations test. **The chemical educator**, v. 2, n. 4, p. 1-17, 1997. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00897970138a>.

BONGERS, Amanda *et al.* Building mental models of a reaction mechanism: the influence of static and animated representations, prior knowledge, and spatial ability. **Chemistry education research and practice**, v. 21, n. 2, p. 496-512, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1039/C9RP00198K>.

BONGERS, Amanda; FLYNN, Alison B; NORTHOFF, Georg. Is learning scale-free? Chemistry learning increases EEG fractal power and changes the power law exponent. **Neuroscience research**, v. 156, p. 165-177, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.neures.2019.10.011>.

BONGERS, Amanda; NORTHOFF, Georg; FLYNN, Alison B. Working with mental models to learn and visualize a new reaction mechanism. **Chemistry education research and practice**, v. 20, n. 3, p. 554-569, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1039/C9RP00060G>.

BRASIL. **Diretrizes curriculares nacionais gerais da educação básica**. Brasília: MEC/Secretaria de Educação Básica, 2013. Disponível em: <http://portal.mec.gov.br/docman/julho-2013-pdf/13677-diretrizes-educacao-basica-2013-pdf/file>.

BRAUN, Derek C. *et al.* Welcoming deaf students into STEM: Recommendations for university science education. **CBE - Life sciences education**, v. 17, n. 3, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1187/cbe.17-05-0081>.

BREWE, Eric *et al.* Toward a neurobiological basis for understanding learning in university modeling instruction physics courses. **Frontiers in ICT**, v. 5, p. 10, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3389/fict.2018.00010>.

BRUER, John T. Points of view: on the implications of neuroscience research for science teaching and learning: are there any? A skeptical theme and variations: The

primacy of psychology in the science of learning. **CBE-Life sciences education**, v. 5, n. 2, p. 104-110, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1187/cbe.06-03-0153>.

BUTTERWORTH, Brian; VARMA, Sashank; LAURILLARD, Diana. Dyscalculia: from brain to education. **Science**, v. 332, n. 6033, p. 1049-1053, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1201536>.

CARLISLE, Deborah; TYSON, Julian; NIESWANDT, Martina. Fostering spatial skill acquisition by general chemistry students. **Chemistry education research and practice**, v. 16, n. 3, p. 478-517, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1039/c4rp00228h>.

CARTER, Carolyn S.; LARUSSA, Mary A.; BODNER, George M. A study of two measures of spatial ability as predictors of success in different levels of general chemistry. **Journal of research in science teaching**, v. 24, n. 7, p. 645-657, 1987. DOI: <https://doi.org/10.1002/tea.3660240705>.

CHI, Michelene T. H.; FELTOVICH, Paul J.; GLASER, Robert. Categorization and representation of physics problems by experts and novices. **Cognitive science**, v. 5, n. 2, p. 121-152, 1981. DOI: https://doi.org/10.1207/s15516709cog0502_2.

CLEMENT, John J. **Creative model construction in scientists and students: the role of analogy, imagery, and mental simulation**. Amherst, MA: Springer, 2008. 602 p.

COCH, Donna; ANSARI, Daniel. Thinking about mechanisms is crucial to connecting neuroscience and education. **Cortex**, v. 45, n. 4, p. 546-547, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1207/10.1016/j.cortex.2008.06.001>.

COLE, Michael W.; LAURENT, Patryk; STOCCO, Andrea. Rapid instructed task learning: A new window into the human brain's unique capacity for flexible cognitive control. **Cognitive, affective, & behavioral neuroscience**, v. 13, p. 1-22, 2013. DOI: <https://doi.org/10.3758/s13415-012-0125-7>.

COLEMAN, Sharon L.; GOTCH, Albert J. Spatial perception skills of chemistry students. **Journal of chemical education**, v. 75, n. 2, p. 206, 1998. DOI: <https://doi.org/10.1021/ed075p206>.

COLIVA, Annalisa. Human diagrammatic reasoning and seeing-as. **Synthese**, v. 186, n. 1, p. 121-148, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11229-011-9982-9>.

COSTA, Raquel Lima Silva. Neurociência e aprendizagem. **Revista Brasileira de Educação**, v. 28, p. e280010, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-24782023280010>.

COX, Robert W. AFNI: Software for analysis and visualization of functional magnetic resonance neuroimages. **Computers and biomedical research**, v. 29, n. 3, p. 162-173, 1996. DOI: <https://doi.org/10.1006/cbmr.1996.0014>.

CRESWELL, John W.; CLARK, Vicki L. Plano. **Designing and conducting mixed methods research**. 3 ed. Los Angeles: Sage Publishing, 2017. 520 p.

DAL-FARRA, Rossano A.; FETTERS, Michael D. Recentes avanços nas pesquisas com métodos mistos: aplicações nas áreas de educação e ensino. **Acta scientiae**, v. 19, n. 3, 2017. Disponível em: <http://www.periodicos.ulbra.br/index.php/acta/article/view/3116>.

DAVISHAHL, Eric *et al.* Do they need to see it to learn it? Spatial abilities, representational competence, and conceptual knowledge in statics. *In: ASEE Annual Conference Proceedings*. 2021. Disponível em: <https://par.nsf.gov/biblio/10297086>.

DENYER, David; TRANFIELD, David. Producing a systematic review. *In: BUCHANAN, David A.; BRYMAN, Alan (Eds.). The sage handbook of organizational research methods*. London: Sage Publications Ltd., 2009. p. 671-689.

DESUTTER, Dane; STIEFF, Mike. Designing for spatial thinking in STEM: embodying perspective shifts does not lead to improvements in the imagined operations. *In: The interdisciplinarity of the learning sciences*, 14th International Conference of the Learning Sciences (ICLS) 2020, Nashville, Tennessee, 2020. v. 2, p. 975-982. Disponível em: <https://repository.isls.org/handle/1/6842>.

DUNBAR, Kevin. How scientists really reason: scientific reasoning in real-world laboratories. *In: STERNBERG, Robert J.; DAVIDSON, Janet E. (Eds.). The nature of insight*. Cambridge, MA: MIT Press, 1995. p. 365-395.

DWININGSIH, Kusumawati *et al.* 3D molecular interactive multimedia for building chemistry students' spatial ability. **International journal of emerging technologies in learning (IJET)**, v. 17, n. 14, p. 253-262, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3991/ijet.v17i14.30339>.

EALY, Julie B. Students' understanding is enhanced through molecular modeling. **Journal of science education and technology**, v. 13, n. 4, p. 461-471, 2004. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/40186737>.

EDIYANTO; Ediyanto; KAWAI, Norimune. Science learning for students with visually impaired: a literature review. **Journal of physics: conference series**, v. 1227, n. 1, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1227/1/012035>.

ELFORD, Daniel; LANCASTER, Simon J.; JONES, Garth A. Exploring the effect of augmented reality on cognitive load, attitude, spatial ability, and stereochemical perception. **Journal of science education and technology**, v. 31, n. 3, p. 322-339, 2022.

FERNANDES, Bruno G.; LOCATELLI, Solange W. Acesso e transição nos níveis representacionais durante a construção de modelos explicativos acerca de interações intermoleculares. **Revista brasileira de pesquisa em educação em ciências**, v. 21, p. 1-29, 2021. DOI: <https://doi.org/10.28976/1984-2686rbpec2021u225253>

FERRER, Emilio; O'HARE, Elizabeth D.; BUNGE, Silvia A. Fluid reasoning and the developing brain. **Frontiers in neuroscience**, v. 3, p. 3, 2009. DOI: <https://doi.org/10.3389/neuro.01.003.2009>.

FETTERS, Michael D.; CURRY, Leslie A.; CRESWELL, John W. Achieving integration in mixed methods designs - principles and practices. **Health services research**, v. 48, n. 6, p. 2134-2156, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1111/1475-6773.12117>.

FIORELLA, Logan; MAYER, Richard E. Spontaneous spatial strategy use in learning from scientific text. **Contemporary educational psychology**, v. 49, p. 66-79, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cedpsych.2017.01.002>.

GABEL, Dorothy. Improving teaching and learning through chemistry education research: A look to the future. **Journal of chemical education**, v. 76, n. 4, p. 548, 1999. DOI: <https://doi.org/10.1021/ed076p548>.

GABEL, Dorothy. Theory-based teaching strategies for conceptual understanding of chemistry. **Educación química**, v. 11, n. 2, p. 236-243, 2000. DOI: <https://doi.org/10.22201/fq.18708404e.2000.2.66459>.

GATHERCOLE, Susan E. The development of memory. **Journal of child psychology and psychiatry**, v. 39, n. 1, p. 3-27, 1998. DOI: [10.1017/S0021963097001753](https://doi.org/10.1017/S0021963097001753).

GAZZANIGA, Michael; HEATHERTON, Todd; HALPERN, Diane. **Ciência psicológica**. Porto Alegre: Artmed, 2018.

GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. São Paulo: Atlas, 2018.

GILBERT, John K. **Multiple representations in chemical education**. Dordrecht: Springer, 2009.

GLASER, Robert; CHI, Michelene T. H. Overview. *In*: CHI, M. T. H.; GLASER, R.; FARR, M. (Eds.). **The nature of expertise**. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates, 1988. p. xv-xxviii. DOI: <https://doi.org/10.4324/9781315799681>.

GOLDWATER, Micah B.; HILTON, Courtney; DAVIS, Tyler H. Developing an educational neuroscience of category learning. **Mind, brain, and education**, v. 16, n. 2, p. 167-182, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1111/mbe.12306>.

GOODWIN, Charles. Seeing in depth. **Social studies of science**, v. 25, n. 2, p. 237-274, 1995. DOI: <https://doi.org/10.1177/030631295025002002>.

GOSWAMI, Usha. Neuroscience and education: from research to practice? **Nature reviews neuroscience**, v. 7, n. 5, p. 406-413, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1038/nrn1907>.

GREENE, Ernest; NARANJO, Jennings N. Thalamic role in spatial memory. **Behavioural brain research**, v. 19, n. 2, p. 123-131, 1986. DOI: [https://doi.org/10.1016/0166-4328\(86\)90010-0](https://doi.org/10.1016/0166-4328(86)90010-0).

GREENOUGH, William T.; BLACK, James E.; WALLACE, Christopher S. Experience and brain development. **Child development**, v. 58, n. 3, p. 539-559, 1987. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/1130197>.

HABIG, Sebastian. Who can benefit from augmented reality in chemistry? Sex differences in solving stereochemistry problems using augmented reality. **British journal of educational technology**, v. 51, p. 629-644, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1111/bjet.12891>.

HABRAKEN, Clarisse L. Perceptions of chemistry: Why is the common perception of chemistry, the most visual of sciences, so distorted? **Journal of science education and technology**, v. 5, n. 3, p. 193-201, 1996. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01575303>.

HASTIE, Trevor; TIBSHIRANI, Robert; FRIEDMAN, Jerome. **The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction**. New York, NY: Springer, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-0-387-84858-7>.

HEITZMAN, Mary; KRAJCIK, Joseph. Urban seventh-graders' translations of chemical equations: which parts of the translation process do students' have trouble? *In: Annual Meeting of the National Association for Research in Science Teaching (NARST)*, Dallas, Texas, 2005. Disponível em: http://www.project2061.org/research/ccms/site.archive/documents/Translations_of_Chemical_Equations.pdf.

HUANG, Chin-Fei; LIU, Chia-Ju. An event-related potentials study of mental rotation in identifying chemical structural formulas. **European journal of educational research**, v. 1, n. 1, p. 37-54, 2012. DOI: <https://doi.org/10.12973/eu-jer.1.1.37>.

HUBER, Elizabeth *et al.* Rapid and widespread white matter plasticity during an intensive reading intervention. **Nature communications**, v. 9, n. 1, p. 2260, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-018-04627-5>.

HUETTEL, Scott A.; SONG, Allen W.; MCCARTHY, Gregory. **Functional magnetic resonance imaging**. Massachusetts: Sinauer, 2004.

IPPOLITI, Francesca M.; NGUYEN, Melinda M.; REILLY, Amber J.; GARG, Neil K. Gaming stereochemistry. **Nature Reviews Chemistry**, v. 6, p. 373-374, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41570-022-00395-5>.

JENKINS, Judith L.; HOWARD, Elizabeth M. Implementation of modeling instruction in a high school chemistry unit on energy and states of matter. **Science education international**, v. 30, n. 2, p. 97-104, 2019. 30(2), 97-104. DOI: <https://doi.org/10.33828/sei.v30.i2.3>.

JOHNSTONE, Alex H. Chemical education research in glasgow in perspective. **Chemistry education research and practice**, v. 7, n. 2, p. 49-63, 2006. DOI: 10.1039/B5RP90021B.

JOHNSTONE, Alex H. Chemistry teaching - science or alchemy? **Journal of chemical education**, v. 74, n. 3, p. 262-268, 1997. DOI: <https://doi.org/10.1021/ed074p262>.

JOHNSTONE, Alex H. Teaching of chemistry: logical or psicological? **Chemistry education research and practice**, v. 1, n. 1, p. 9-15, 2000. DOI: <https://doi.org/10.1039/A9RP90001B>.

JOHNSTONE, Alex H. The development of chemistry teaching: a changing response to changing demand. **Journal of chemical education**, v. 70, n. 9, p. 701-705, 1993. DOI: <https://doi.org/10.1021/ED070P701>.

JOHNSTONE, Alex H. Why is science difficult to learn? Things are seldom what they seem. **Journal of computer assisted learning**, v. 7, n. 2, p. 75-83, 1991. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2729.1991.tb00230.x>.

JUST, Marcel Adam; KELLER, Timothy A. Converging measures of neural change at the microstructural, informational, and cortical network levels in the hippocampus during the learning of the structure of organic compounds. **Brain structure and function**, v. 224, n. 3, p. 1345-1357, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s00429-019-01838-4>.

KANDEL, Eric R. *et al.* (Eds.). Nerve cells, neural circuitry, and behavior. *In*: **Principles of neural science**. New York, NY: McGraw-Hill Medical, 2013. p. 21-38. Disponível em: <https://neurology.mhmedical.com/content.aspx?bookid=1049§ionid=59138622>.

KELLER, Katherine; MENON, Vinod. Gender differences in the functional and structural neuroanatomy of mathematical cognition. **Neuroimage**, v. 47, n. 1, p. 342-52, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2009.04.042>.

KIERNAN, Nicola A.; MANCHES, Andrew; SEERY, Michael K. The role of visuospatial thinking in students' predictions of molecular geometry. **Chemistry education research and practice**, v. 22, n. 3, p. 626-639, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1039/d0rp00354a>.

KIERNAN, Nicola A.; MANCHES, Andrew; SEERY, Michael K. Resources for reasoning of chemistry concepts: multimodal molecular geometry. **Chemistry education research and practice**, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1039/d3rp00186e>.

KOLB, Bryan; MYCHASIUK, Richelle; GIBB, Robbin. Brain development, experience, and behavior. **Pediatric blood & cancer**, v. 61, n. 10, p. 1720-1723, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1002/pbc.24908>.

KOSSLYN, Stephen M.; JOLICOEUR, Pierre. A theory-based approach to the study of individual differences in mental imagery. *In*: SNOW, R. E.; FEDERICO, P. A.;

MONTAGUE, W. E. (Eds.). **Aptitude, learning, and instruction**. Routledge, 2021. p. 139-176. DOI: <https://doi.org/10.4324/9781003163145>.

KOZMA, Robert B. Use of multiple representations by experts and novices. *In*: VAN METER, Peggy *et al.* (Eds.). **Handbook of learning from multiple representations and perspectives**. Routledge, 2020. p. 33-47. DOI: <https://doi.org/10.4324/9780429443961>.

KOZMA, Robert B. *et al.* The roles of representations and tools in the chemistry laboratory and their implications for chemistry learning. **The journal of the learning sciences**, v. 9, n. 2, p. 105-143, 2000. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/1466853>.

KOZMA, Robert B.; RUSSELL, Joel. Multimedia and understanding: expert and novice responses to different representations of chemical phenomena. **Journal of research in science teaching**, v. 34, n. 9, p. 949-968, 1997. DOI: [https://doi.org/10.1002/\(sici\)1098-2736\(199711\)34:9<949::aid-tea7>3.0.co;2-u](https://doi.org/10.1002/(sici)1098-2736(199711)34:9<949::aid-tea7>3.0.co;2-u).

KOZMA, Robert B.; RUSSELL, Joel. Students becoming chemists: developing representational competence. *In*: GILBERT, John (Org.). **Visualization in science education**. Springer, Dordrecht, 2005. p. 121-145. DOI: https://doi.org/10.1007/1-4020-3613-2_8.

LEGOCKI, Laurie J. *et al.* Clinical trialist perspectives on the ethics of adaptive clinical trials: a mixed-methods analysis. **BMC Med ethics**, v. 16, n. 27, p. 1-12, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12910-015-0022-z>.

LIN, Chia-Yin; WU, Hsin-Kai. Effects of different ways of using visualizations on high school students' electrochemistry conceptual understanding and motivation towards chemistry learning. **Chemistry education research and practice**, v. 22, n. 3, p. 786-801, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1039/d0rp00308e>.

LIU, Chia Ju; HUANG, Chin Fei. Neuroscience engagement: the influences of chemistry education on affective dimensions. **Affective dimensions in chemistry education**. Springer Berlin Heidelberg, 2015. p. 235-258. Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-662-45085-7_12.

LOGIE, Robert H. **Visuo-spatial working memory**. 1^a ed. New York: Psychology Press, 1995.

LORENAT, Jemma. Drawing on the imagination: The limits of illustrated figures in nineteenth-century geometry. **Studies in history and philosophy of science**, v. 82, p. 75-87, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.shpsa.2020.01.002>.

LYNN, Matthew A. *et al.* Successes and challenges in teaching chemistry to deaf and hard-of-hearing students in the time of COVID-19. **Journal of chemical education**, v. 97, n. 9, p. 3322-3326, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.0c00602>.

MACKEY, Allyson P.; SINGLEY, Alison T. Miller; BUNGE, Silvia A. Intensive reasoning training alters patterns of brain connectivity at rest. **Journal of**

neuroscience, v. 33, n. 11, p. 4796-4803, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.4141-12.2013>.

MAIATO, Alexandra M. **Neurociências e aprendizagem: o papel da experimentação no ensino de ciências**. 2013. 81 f. Dissertação (Mestrado em Educação em Ciências: Química da Vida e Saúde) - Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2013. Disponível em: <https://repositorio.furg.br/handle/1/4793>.

MÅRTENSSON, Johan *et al.* Growth of language-related brain areas after foreign language learning. **Neuroimage**, v. 63, n. 1, p. 240-244, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2012.06.043>.

MASHOUR, George A. *et al.* Conscious processing and the global neuronal workspace hypothesis. **Neuron**, v. 105, n. 5, p. 776-798, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2020.01.026>.

MASON, Lucia. Bridging neuroscience and education: A two-way path is possible. **Cortex**, v. 45, n. 4, p. 548-549, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2008.06.003>.

MASON, Robert A.; JUST, Marcel Adam. Neural representations of physics concepts. **Psychological science**, v. 27, n. 6, p. 904-913, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1177/0956797616641941>.

MATLIN, Margaret W. **Psicologia Cognitiva**. 5ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2004.

MEYLANI, Rusen. Innovations with schema theory: modern implications for learning, memory, and academic achievement. **International journal for multidisciplinary research**, v. 6, n. 1, 2024. DOI: <https://doi.org/10.36948/ijfmr.2024.v06i01.13785>.

MOEN, Katherine C. *et al.* Strengthening spatial reasoning: elucidating the attentional and neural mechanisms associated with mental rotation skill development. **Cognitive research: principles and implications**, v. 5, n. 1, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1186/s41235-020-00211-y>.

MOHSEN, Mohammed A.; ALANGARI, Tahani S. Analyzing two decades of immersive technology research in education: Trends, clusters, and future directions. **Education and information technologies**, v. 29, p. 3571-3587, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10639-023-11968-2>.

NEWMAN, Sharlene D.; WILLOUGHBY, Gregory; PRUCE, Benjamin. The effect of problem structure on problem-solving: an fMRI study of word versus number problems. **Brain research**, v. 1410, p. 77-88, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2011.06.053>.

NÚÑEZ-PEÑA, Isabel; AZNAR-CASANOVA, Antonio. Mental rotation of mirrored letters: evidence from event-related brain potentials. **Brain and cognition**, v. 69, n. 1, p. 180-187, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2008.07.003>.

O' DWYER, Anne; CHILDS, Peter E. Who says organic chemistry is difficult? Exploring perspectives and perceptions. **Eurasia journal of mathematics, science, and technology education**, v. 13, n. 7, p. 3599-3620, 2017. DOI: <https://doi.org/10.12973/eurasia.2017.00748a>.

OWENS, Melinda T.; TANNER, Kimberly D. Teaching as brain changing: Exploring connections between neuroscience and innovative teaching. **CBE - Life sciences education**, v. 16, n. 2, p. 1-9, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1187/cbe.17-01-0005>.

PATTEN, Kathryn E.; CAMPBELL, Stephen R. (Ed.). **Educational neuroscience: initiatives and emerging issues**. John Wiley & Sons, 2011.

PERA, Aurel *et al.* Neural mechanisms underlying school-based learning. **Contemporary readings in law and social justice**, v. 6, n. 1, p. 7-12, 2014. Disponível em: <https://www.ceeol.com/search/article-detail?id=132665>.

PIAGET, Jean. **O nascimento da inteligência na criança**. Rio de Janeiro: Zahar Editores, 1971.

PIAGET, Jean. **A epistemologia genética**. Rio de Janeiro: Zahar Editores, 1973.

PIAGET, Jean. **Psicologia da inteligência**. Rio de Janeiro: Zahar Editores, 1977.

POPOVA, Maia; JONES, Tamera. Chemistry instructors' intentions toward developing, teaching, and assessing student representational competence skills. **Chemistry education research and practice**, v. 22, n. 3, p. 733-748, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1039/D0RP00329H>.

POTVIN, Patrice *et al.* Coexistence of misconceptions and scientific conceptions in chemistry professors: a mental chronometry and fMRI study. **Frontiers in education**, v. 5, p. 180, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3389/feduc.2020.542458>.

PRADO, Jérôme; CHADHA, Angad; BOOTH, James R. The brain network for deductive reasoning: a quantitative meta-analysis of 28 neuroimaging studies. **Journal of cognitive neuroscience**, v. 23, n. 11, p. 3483-3497, 2011. DOI: https://doi.org/10.1162/jocn_a_00063.

PUDHIYIDATH, Athula *et al.* Developmental differences in temporal schema acquisition impact reasoning decisions. **Cognitive neuropsychology**, v. 37, n. 1-2, p. 25-45, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1080/02643294.2019.1667316>.

PYLYSHYN, Zenon W. The imagery debate: Analogue media versus tacit knowledge. **Psychological review**, v. 88, n. 1, p. 16, 1981. DOI: <https://doi.org/10.1037/0033-295x.88.1.16>

PYLYSHYN, Zenon W. Mental imagery: In search of a theory. **Behavioral and brain sciences**, v. 25, n. 2, p. 157-182, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1017/s0140525x02000043>.

RAHMAWATI, Yuli; DIANHAR, Hanhan; ARIFIN, Fadhillah. Analysing Students' spatial abilities in chemistry learning using 3D virtual representation. **Education sciences**, v. 11, n. 4, p. 185, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/educsci11040185>.

RAUPP, Daniele T. *et al.* La capacidad de comprensión del campo conceptual de la estereoquímica: los desafíos que preceden a los problemas de visualización espacial. **ACTIO: docência em ciências**, v. 5, n. 1, p. 1-21, 2020. DOI: <https://doi.org/0.3895/actio.v5n1.10703>.

RAUPP, Daniele T. **Alfabetização tridimensional, contextualizada e histórica no campo conceitual da estereoquímica**. 2015. Tese (Doutorado em Educação em Ciências: Química da Vida e Saúde) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/122337>.

RODRIGUES, Filipa M. *et al.* E-learning is a burden for the deaf and hard of hearing. **Scientific reports**, v. 12, n. 1, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-13542-1>.

SAMPAIO, Rosana F.; MANCINI, Marisa C. Estudos de revisão sistemática: um guia para síntese criteriosa da evidência científica. **Brazilian journal of physical therapy**, v. 11, p. 83-89, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-35552007000100013>.

SCHANK, Patricia; KOZMA, Robert B. Learning chemistry through the use of a representation-based knowledge building environment. **Journal of computers in mathematics and science teaching**, v. 21, n. 3, p. 253-279, 2002. Disponível em: <https://www.learntechlib.org/p/9262/>.

SCHEID, Jochen *et al.* Representational competence in science education: from theory to assessment. *In*: DANIEL, Kristy L. (Org.). **Towards a framework for representational competence in science education**. [S.l.]: Springer, 2018. p. 263-277. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-89945-9_13.

SHEPARD, Roger N.; CHIPMAN, Susan. Second-order isomorphism of internal representations: Shapes of states. **Cognitive psychology**, v. 1, n. 1, p. 1-17, 1970. DOI: [https://doi.org/10.1016/0010-0285\(70\)90002-2](https://doi.org/10.1016/0010-0285(70)90002-2).

SIM, Joong H. **Representational competence of form four science students on basic chemical concepts**. 2010. 532 p. Tese (Doutorado em Educação) - Faculdade de Educação, Universidade da Malásia, Kuala Lumpur, 2010. Disponível em: <https://studentsrepo.um.edu.my/id/eprint/3522>.

SIM, Joong H.; DANIEL, Esther G. S. Representational competence in chemistry: a comparison between students with different levels of understanding of basic chemical concepts and chemical representations. **Cogent education**, v. 1, n. 1, p. 991180, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/2331186x.2014.991180>.

SIRHAN, Ghassan. Learning difficulties in chemistry: an overview. **Journal of Turkish science education**, v. 4, n. 2, p. 2-20, 2007. Disponível em: <https://dspace.alquds.edu/handle/20.500.12213/742>.

SMALL, Melinda Y.; MORTON, Mary E. Research in college science teaching: spatial visualization training improves performance in organic chemistry. **Journal of college science teaching**, v. 13, n. 1, p. 41-43, 1983. Disponível em: <https://eric.ed.gov/?id=ej285832>.

SOUTHAM, Daniel C.; LEWIS, Jennifer E. Supporting alternative strategies for learning chemical applications of group theory. **Journal of chemical education**, v. 90, n. 11, p. 1425-1432, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1021/ed400063t>.

SOUZA, Alessandra S.; OBERAUER, Klaus. In search of the focus of attention in working memory: 13 years of the retro-cue effect. **Attention, perception, & psychophysics**, v. 78, p. 1839-1860, 2016. DOI: <https://doi.org/10.3758/s13414-016-1108-5>.

SPITHA, Natalia *et al.* Supporting submicroscopic reasoning in students' explanations of absorption phenomena using a simulation-based activity. **Chemistry education research and practice**, v. 25, n. 1, p. 133-150, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1039/D3RP00153A>.

STAUDT, Michelli. **Neurociência e educação: revisão bibliográfica em teses e dissertações brasileiras**. 2020. 118 f. Dissertação (Mestrado em Educação) - Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2020. Disponível em: <http://tede.upf.br/jspui/handle/tede/2167>.

STEPHENS, A. Lynn; CLEMENT, John J. Documenting the use of expert scientific reasoning processes by high school physics students. **Physical review special topics-physics education research**, v. 6, n. 2, p. 020122, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1103/physrevstper.6.020122>.

STIEFF, Mike *et al.* Improving representational competence with concrete models. **Science education**, v. 100, n. 2, p. 344-363, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1002/sce.21203>.

STIEFF, Mike *et al.* The role of spatial ability and strategy preference for spatial problem solving in organic chemistry. **Journal of chemical education**, v. 89, n. 7, p. 854-859, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1021/ed200071d>.

STIEFF, Mike *et al.* Visual chunking as a strategy for spatial thinking in STEM. **Cognitive research: principles and implications**, v. 5, n. 1, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1186/s41235-020-00217-6>.

STIEFF, Mike. Mental rotation and diagrammatic reasoning in science. **Learning and instruction**, v. 17, n. 2, p. 219-234, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2007.01.012>.

STIEFF, Mike. When is a molecule three dimensional? A task-specific role for imagistic reasoning in advanced chemistry. **Science education**, v. 95, n. 2, p. 310-336, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1002/sce.20427>.

STIEFF, Mike; RAJE, Sonali. Expert algorithmic and imagistic problem solving strategies in advanced chemistry. **Spatial cognition and computation**, v. 10, n. 1, p. 53-81, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1080/13875860903453332>.

STULL, Andrew T.; HEGARTY, Mary. Model manipulation and learning: fostering representational competence with virtual and concrete models. **Journal of educational psychology**, v. 108, n. 4, p. 509, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1037/edu0000077>.

TALANQUER, Vicente. The complexity of reasoning about and with chemical representations. **JACS Au**, v. 2, n. 12, p. 2658-2669, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1021/jacsau.2c00498>.

THOMAS, Michael S. C.; ANSARI, Daniel; KNOWLAND, Victoria C. P. Annual research review: educational neuroscience: progress and prospects. **Journal of child psychology and psychiatry and allied disciplines**, v. 60, n. 4, p. 477-492, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1111/jcpp.12973>.

THOMSON, Eric; PICCININI, Gualtiero. Neural representations observed. **Minds and machines**, v. 28, p. 191-235, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11023-018-9459-4>.

TOTH, Jozsef A.; LEWIS, C. Michael. The role of representation and working memory in diagrammatic reasoning and decision making. *In*: ANDERSON, M.; MEYER, B.; OLIVIER, P. (Eds.). **Diagrammatic representation and reasoning**. London: Springer London, 2002. p. 207-221. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4471-0109-3_12.

TRAFTON, J. Gregory *et al.* The relationship between spatial transformations and iconic gestures. **Spatial cognition and computation**, v. 6, n. 1, p. 1-29, 2006. DOI: https://doi.org/10.1207/s15427633scc0601_1.

TREVISAN, Robson *et al.* Peeking into students' mental imagery: the report aloud technique in science education research. **Ciência & educação (Bauru)**, v. 25, p. 647-664, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/1516-731320190030004>.

TSAPARLIS, Georgios; PAPPA, Eleni T.; BYERS, Bill. Teaching and learning chemical bonding: research-based evidence for misconceptions and conceptual difficulties experienced by students in upper secondary schools and the effect of na enriched text. **Chemistry education research and practice**, v. 19, p. 1253-1269, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1039/c8rp00035b>.

TUKEY, John W. The Future of Data Analysis. *In*: KOTZ, Samuel; JOHNSON, Norman L. (eds). **Breakthroughs in Statistics. Springer Series in Statistics**. New York, NY: Springer, 1992. p. 408-452. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4612-4380-9_31.

TVERSKY, Barbara. Visuospatial reasoning. *In*: **The Cambridge handbook of thinking and reasoning**. Cambridge University Press, 2005. p. 209-249. Disponível em: https://pure.mpg.de/rest/items/item_2403326/component/file_2564262/content.

VALENTI, Livia; GALERA, Cesar. Dynamic visual noise has the same effect on visual memory and visual imagery tasks. **Psychology & neuroscience**, v. 13, n. 1, p. 114, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1037/pne0000183>.

VAN KESTEREN, Marlieke T. R. *et al.* Building on prior knowledge: schema-dependent encoding processes relate to academic performance. **Journal of Cognitive Neuroscience**, v. 26, n. 10, p. 2250-2261, 2014. DOI: https://doi.org/10.1162/jocn_a_00630.

VAN SOMEREN, Maarten; BARNARD, Yvonne; SANDBERG, Jacobijn. **The Think Aloud Method: a practical guide to modeling cognitive processes**. Academic Press, London, 1994.

WANG, Li *et al.* Mathematics meets science in the brain. **Cerebral cortex**, v. 32, n. 1, p. 123-136, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1093/cercor/bhab198>.

WU, Ching Lin *et al.* A systematic review of MRI neuroimaging for education research. **Frontiers in psychology**, v. 12, p. 1763, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2021.617599>.

WU, Hsin-Kai. Linking the microscopic view of chemistry to real-life experiences: intertextuality in a high-school science classroom. **Science education**, v. 87, n. 6, p. 868-891, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1002/sce.10090>.

WU, Hsin-Kai; KRAJCIK, Joseph S.; SOLOWAY, Elliot. Promoting understanding of chemical representations: Students' use of a visualization tool in the classroom. **Journal of research in science teaching**, v. 38, n. 7, p. 821-842, 2001. DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/tea.1033>.

WU, Hsin-Kai; SHAH, Priti. Exploring visuospatial thinking in chemistry learning. **Science education**, v. 88, n. 3, p. 465-492, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1002/sce.10126>.

YANG, Fang-Ying; WANG, Hui-Yun. Tracking visual attention during learning of complex science concepts with augmented 3D visualizations. **Computers & Education**, v. 193, p. 104659, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2022.104659>.

ZATORRE, Robert J.; FIELDS, R. Douglas; JOHANSEN-BERG, Heidi. Plasticity in gray and white: neuroimaging changes in brain structure during learning. **Nature neuroscience**, v. 15, n. 4, p. 528-536, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1038/nn.3045>.

APÊNDICES

APÊNDICE A - Teste de Competência Representacional (TCR)

TESTE DE COMPETÊNCIA REPRESENTACIONAL (TCR)

Código de Identificação: _____

Nome: _____ Idade: _____

Gênero: () Feminino () Masculino () Outro: _____ Data: _____

() ESTUDANTE

Semestre na Graduação: cursando o ____º semestre

Disciplinas de Química Orgânica já cursadas:

() Química Orgânica I () Química Orgânica II () Química Orgânica III

() Química Orgânica Experimental I () Espectroscopia Molecular Orgânica

() Introdução a Polímeros () Química Orgânica de Biomoléculas

() PROFESSOR(A)

Tempo de atuação como professor(a): _____ anos

Disciplina(s) ministrada(s) atualmente na Graduação:

INSTRUÇÕES:

1. Esse teste consiste em DUAS partes: Parte A e Parte B.
2. Responda TODAS as questões em ambas as partes.
3. Para a Parte A, escolha a melhor resposta para cada questão e circule apenas UMA das opções (A, B, C ou D).
4. Para a Parte B, escreva suas respostas nos espaços fornecidos para cada questão.

PARTE A

Questões de múltipla escolha. Para as questões de 1 a 25, escolha a melhor resposta para cada questão e circule apenas UMA das opções (A, B, C ou D).

1. Qual dos grupos a seguir representa apenas compostos?

A. Co, Nb, HF, H₂S

B. CO, BN, HI, NO₂

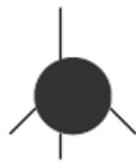
C. VS, Os, Y₂O₃, CuO

D. CO₂, P₄S₅, Mn, Mg

2. Carbonatos são compostos que contêm um elemento metálico, carbono e oxigênio. Em um carbonato, sempre há três átomos de oxigênio para cada átomo de carbono. Qual das seguintes fórmulas representa um carbonato?

- A. CaCO_3
- B. FeC_2O_4
- C. $\text{CuH}_2\text{C}_2\text{O}_4$
- D. $\text{AgC}_2\text{H}_3\text{O}_2$

3. Os diagramas abaixo representam átomos de carbono, oxigênio e hidrogênio, e também uma molécula de água, H_2O .



Átomo de carbono



Átomo de oxigênio

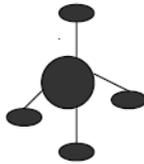


Átomo de hidrogênio



Molécula de água

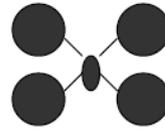
Qual dos diagramas abaixo representa corretamente uma molécula de metano, CH_4 ?



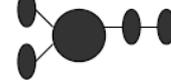
A



B

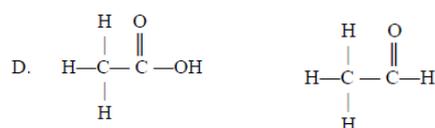
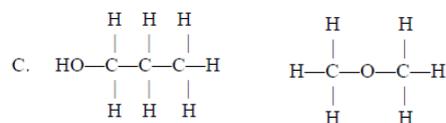
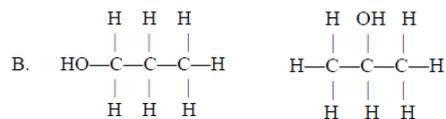
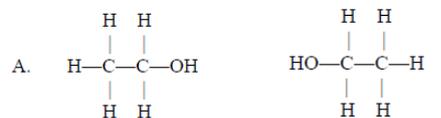


C

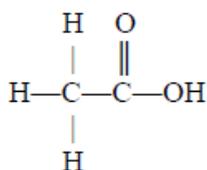


D

4. Os compostos de carbono podem conter exatamente os mesmos tipos e números de diferentes átomos, mas com os átomos em arranjos diferentes. Os diagramas abaixo mostram como os átomos são arranjados em alguns compostos de carbono. Qual diagrama representa duas moléculas que são iguais?



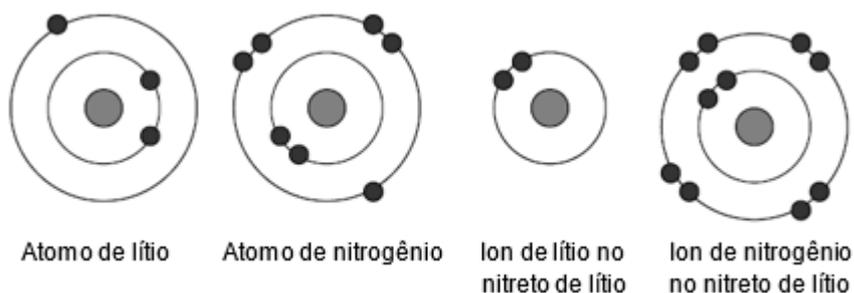
5. O ingrediente principal do vinagre é uma substância chamada ácido acético. O arranjo dos átomos no ácido acético pode ser representado como:



O ácido acético também pode ser representado pela fórmula:

- A. HCO
- B. $\text{H}_3\text{C}_2\text{O}_2$
- C. $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$
- D. $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}$

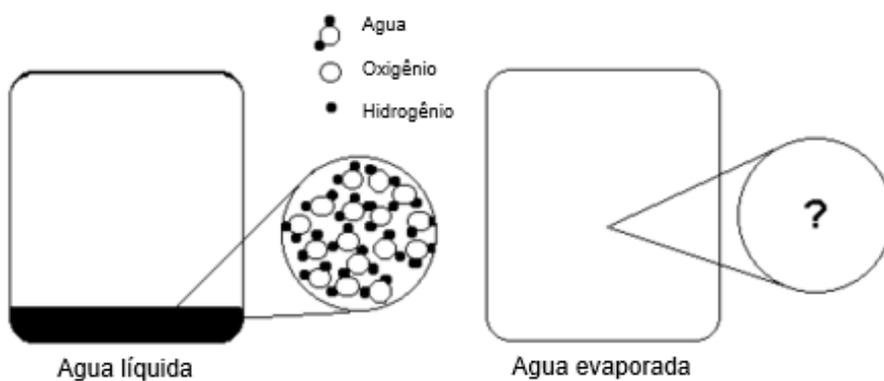
6. Os diagramas abaixo mostram átomos de lítio e nitrogênio separados, e os íons no composto de nitreto de lítio.



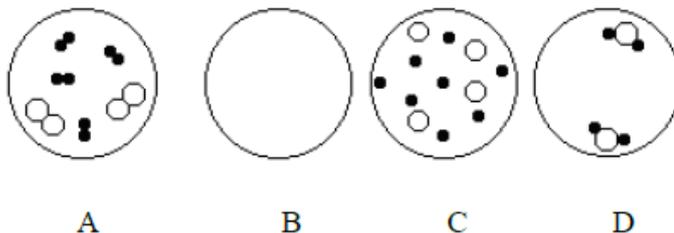
Qual é a fórmula correta para o nitreto de lítio?

- A. LiN
- B. LiN_3
- C. Li_2N_3
- D. Li_3N

7. O círculo em destaque (à esquerda) mostra uma visão ampliada de uma porção muito pequena de água líquida em um recipiente fechado.



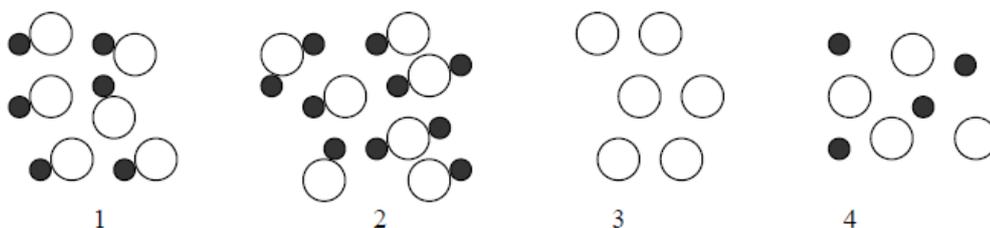
O que a imagem ampliada (à direita) mostraria depois que a água evaporasse?



8. Qual é a massa relativa da fórmula do fosfato de magnésio, $Mg_3(PO_4)_2$? (Massa atômica relativa: Mg = 24; O = 16; P = 31)

- A. 190
- B. 199
- C. 231
- D. 262

9. Qual dos seguintes diagramas abaixo representa, em ordem: um elemento, um composto puro, uma mistura de elementos e uma mistura de compostos?

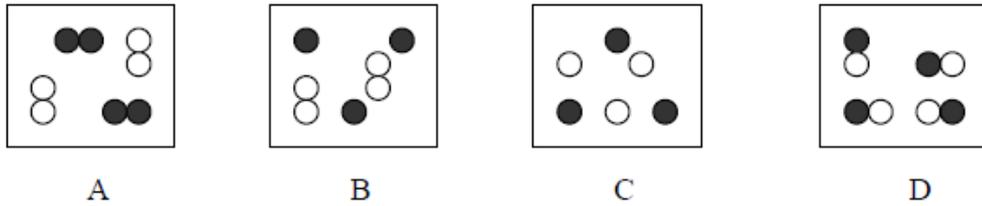


- A. 4, 3, 2, 1
- B. 3, 4, 1, 2
- C. 3, 1, 4, 2
- D. 1, 2, 3, 4

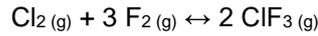
10. Uma partícula carregada com 28 prótons, 29 elétrons e 31 nêutrons pode ser representada como:



11. Uma mistura de gases contém apenas átomos de hélio e moléculas de hidrogênio. Quais dos diagramas a seguir é a melhor representação dessa mistura?



12. Cloro gasoso (Cl_2) reage com flúor gasoso (F_2) para formar trifluoreto de cloro, de acordo com a reação de equilíbrio:



Dez (10) moléculas de gás Cl_2 e trinta (30) moléculas de gás F_2 foram colocadas em um recipiente fechado para reação. Após algum tempo, a mistura no recipiente foi analisada, encontrando-se seis (6) moléculas de gás Cl_2 e algumas de F_2 e ClF_3 . Quantas moléculas de F_2 e ClF_3 estavam presentes?

- A. 18 moléculas de F_2 e 6 moléculas de ClF_3
- B. 24 moléculas de F_2 e 6 moléculas de ClF_3
- C. 18 moléculas de F_2 e 8 moléculas de ClF_3
- D. 24 moléculas de F_2 e 8 moléculas de ClF_3

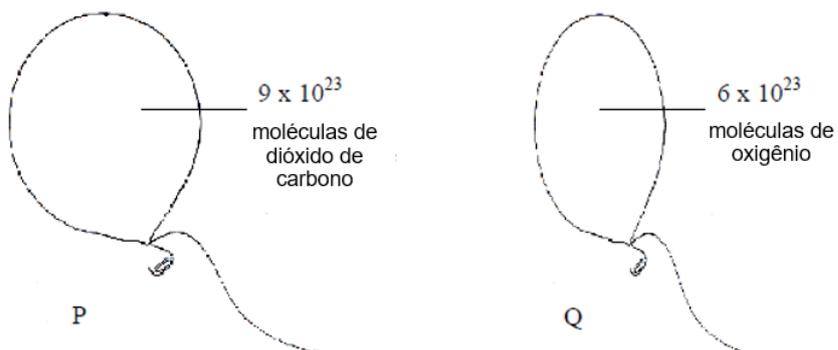
13. A tabela abaixo mostra o número de prótons de quatro átomos: W, X, Y e Z:

Átomo	Número de prótons
W	3
X	16
Y	17
Z	19

Qual dos átomos tem o mesmo número de elétrons de valência?

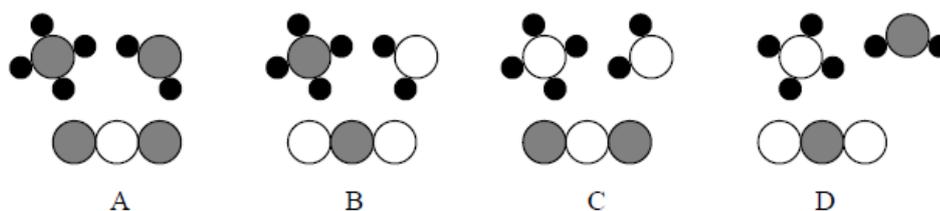
- A. W e Z
- B. X e Z
- C. X e Y
- D. Y e Z

14. O diagrama mostra dois balões, P e Q. O balão P é preenchido com 9×10^{23} moléculas de gás dióxido de carbono, enquanto o balão Q é preenchido com 6×10^{23} moléculas de gás oxigênio. Qual é a massa de dióxido de carbono e oxigênio? (Massa atômica relativa: C = 12; O = 16; considere para o cálculo a Constante de Avogadro = $6 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$)

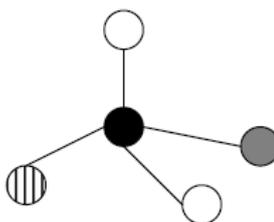


- A. 22 g dióxido de carbono e 16 g oxigênio
 B. 44 g dióxido de carbono e 32 g oxigênio
 C. 66 g dióxido de carbono e 32 g oxigênio
 D. Nenhuma das alternativas acima

15. Qual dos seguintes diagramas representa uma molécula de metano, CH_4 ; água, H_2O ; e dióxido de carbono, CO_2 ?



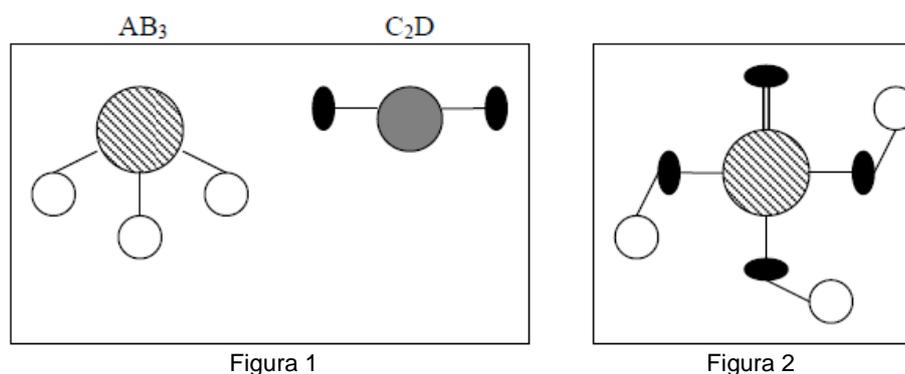
16. Um modelo de um composto foi construído usando bolinhas padronizadas. Cada padrão diferente representa um elemento diferente.



Qual dos seguintes compostos é o mais provável de ser representado pelo modelo acima?

- A. Diclorometano, CH_2Cl_2
 B. Bromodiclorometano, CHBrCl_2
 C. Triclorometano, CHCl_3
 D. Tetraclorometano, CCl_4

17. Use os diagramas moleculares e fórmulas da Figura 1 para determinar a fórmula química da molécula representada na Figura 2.



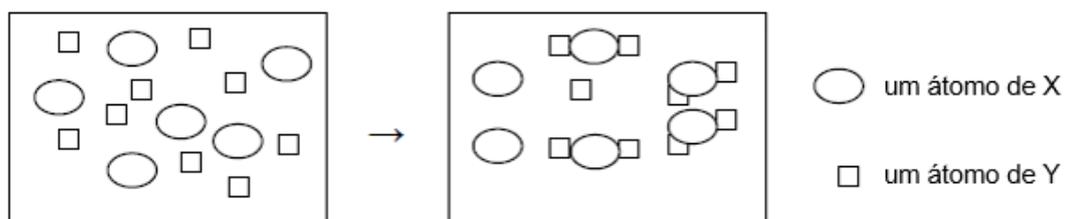
A fórmula correta para a molécula representada na Figura 2 é:

- A. BA_4C_3
- B. CB_4A_3
- C. AC_3B_4
- D. C_4AB_3

18. Xantatos são produtos químicos solúveis em água usados na indústria de mineração para separar valiosos minerais de minério de resíduos, chamados ganga. Amil xantato de potássio (PAX) tem a fórmula $CH_3CH_2CH_2CH_2CH_2OCSSK$. Uma fórmula simplificada e o número de elementos presentes no PAX são:

- A. $C_6H_{11}OS_2K$ com 5 elementos
- B. $C_6H_{11}OS_2K$ com 21 elementos
- C. $C_5H_{11}OCSSK$ com 7 elementos
- D. $C_5H_{11}OCSSK$ com 20 elementos

19. Os elementos X e Y reagem para se obter um produto XY_2 . A reação é mostrada esquematicamente abaixo:



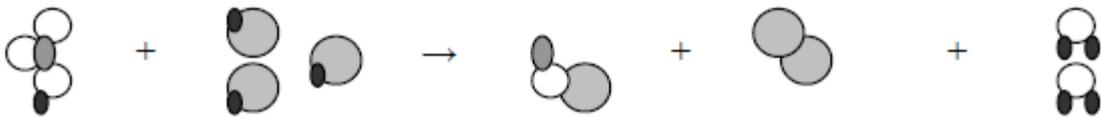
A equação química mais simples e correta para descrever a reação que ocorre é:

- A. $4 X + 8 Y \rightarrow 4 XY_2$
- B. $X + 2 Y \rightarrow XY_2$
- C. $6 X + 9 Y \rightarrow 4 XY_2 + 2 X + Y$
- D. $X_4 + Y_8 \rightarrow 4 XY_2$

20. Uma mistura de ácido nítrico concentrado e ácido clorídrico concentrado é uma das poucas soluções que podem dissolver os metais ouro e platina. Quando misturados, esses ácidos reagem conforme a seguinte equação:



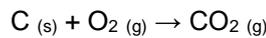
A mesma reação pode ser mostrada como um desenho de partículas da seguinte forma:



Qual elemento é representado por cada símbolo no diagrama acima?

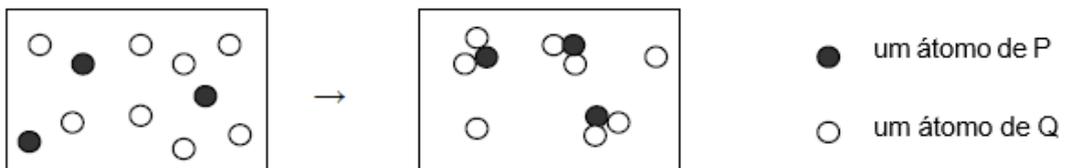
- | | | | | |
|----|----------|------------|------------|----------|
| | | | | |
| A. | Cloro | Hidrogênio | Oxigênio | Azoto |
| B. | Oxigênio | Cloro | Hidrogênio | Azoto |
| C. | Cloro | Hidrogênio | Azoto | Oxigênio |
| D. | Oxigênio | Hidrogênio | Cloro | Azoto |

21. A equação mostra a reação entre o carbono e o gás oxigênio. Qual é a massa de gás dióxido de carbono liberado quando 12 g de carbono reagem completamente na reação? (Massa atômica relativa: C = 12: O = 16)



- A. 12 g
- B. 28 g
- C. 32 g
- D. 44 g

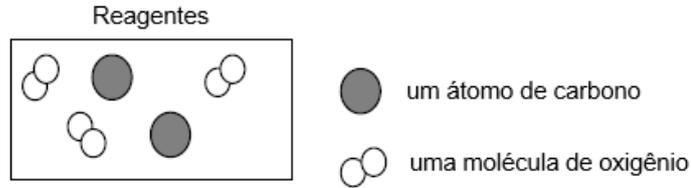
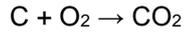
22. A reação do elemento P com o elemento Q é representada no diagrama a seguir:



Qual equação descreve melhor essa reação?

- A. $3 P + 8 Q \rightarrow 3 PQ_2 + 2 Q$
- B. $P_3 + Q_8 \rightarrow 3 PQ_2 + Q_2$
- C. $P + Q \rightarrow 3 PQ_2 + 2 Q$
- D. $P + 2 Q \rightarrow PQ_2$

23. Carbono e oxigênio reagem de acordo com a seguinte equação:

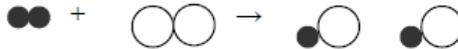


Qual diagrama representa corretamente as moléculas no recipiente após a reação?



- C. Ambos os diagramas A e B estão corretos
- D. Ambos os diagramas A e B estão incorretos

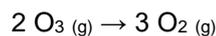
24. O esquema abaixo mostra uma transformação química. O símbolo "O" representa um átomo de um certo tipo e o símbolo "●" representa um átomo de outro tipo. Se os átomos desses símbolos reagem, formam uma única molécula:



A reação representada por esses símbolos pode ser:

- A. $2 H_2 + O_2 \rightarrow 2 H_2O$
- B. $2 Mg + O_2 \rightarrow 2 MgO$
- C. $C + O_2 \rightarrow CO_2$
- D. $H_2 + Cl_2 \rightarrow 2 HCl$

25. O ozônio (O₃) é um gás encontrado na estratosfera. Ele absorve os raios ultravioleta (UV) do sol. O gás clorofluorcarbono (CFC) quando usado em latas de aerossol pode causar a decomposição da camada de ozônio de acordo com a seguinte equação:



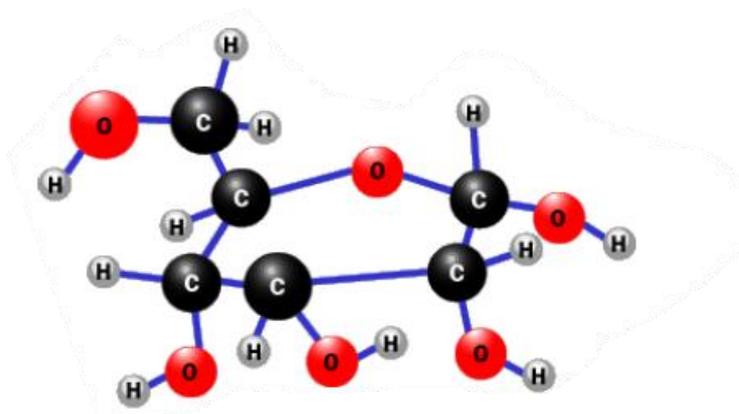
Qual das seguintes afirmações é verdadeira? (Massa atômica relativa: O = 16; 1 mol de gás ocupa 24 dm³ à temperatura ambiente e pressão de 1 atmosfera)

- A. 3 mols de ozônio produzem 2 mols de oxigênio
- B. 1 mol de ozônio produz 1 mol de oxigênio
- C. 48 g de ozônio produzem 48 g de oxigênio
- D. 24 dm³ de ozônio produz 24 dm³ de oxigênio

PARTE B

Formato de resposta curta e livre.

1. O diagrama abaixo mostra a estrutura da glicose:



(a) **Escreva** a fórmula molecular da glicose: _____

(b) **Deduza** a fórmula empírica da glicose: _____

2. Quando o metal de alumínio é exposto ao ar, uma camada protetora se forma em sua superfície. Essa camada evita mais reações entre o alumínio e o oxigênio.

(a) **Identifique** essa camada protetora: _____

(b) **Escreva** uma equação balanceada para a formação dessa camada protetora:

3. O que você sabe sobre (responda usando apenas **desenhos**):

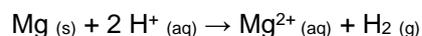
(a) Um átomo

(b) Uma molécula

(c) Um elemento

4. **Desenhe** a estrutura de Lewis para uma molécula de oxigênio.

5. O magnésio reage com uma solução ácida para produzir hidrogênio. A seguinte equação descreve essa reação:



Na equação acima, o número “2” aparece 3 vezes, com significados diferentes em cada caso.

Explique o significado do número “2” em:

(a) $2 \text{H}^+_{(aq)}$ _____

(b) $\text{Mg}^{2+}_{(aq)}$ _____

(c) $\text{H}_{2(g)}$ _____

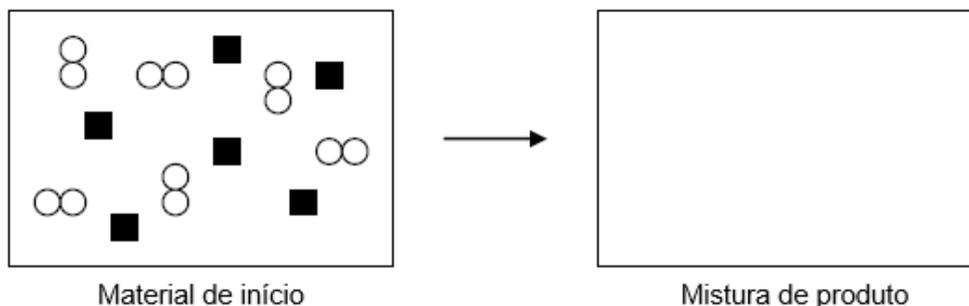
6. Considere a equação: $\text{CH}_4 + 2 \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2 \text{H}_2\text{O}$

(a) **Explique** seu significado no nível molecular:

(b) **Interprete** a equação em termo de mols.

7. A equação para uma reação é: $2 \text{S} + 3 \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{SO}_3$

Considere uma mistura de S (■) e O_2 (OO) em um recipiente fechado conforme ilustrado abaixo:



Supondo uma reação completa:

(a) **Desenhe** uma representação no nível molecular da mistura de produto na caixa acima fornecida.

(b) **Explique** como você chegou a essa representação:

Instrumento desenvolvido e validado no estudo de Sim (2010). Tradução para a língua portuguesa realizada pela pesquisadora.

SIM, Joong H. **Representational competence of form four science students on basic chemical concepts**. 2010. 532 p. Tese (Doutorado em Educação) - Faculdade de Educação, Universidade da Malásia, Kuala Lumpur, 2010.

ESPECIFICAÇÕES DO TESTE TCR (PARA USO DA PESQUISADORA)

• **Âmbito 1 da Competência Representacional:** A capacidade de interpretar os significados de representações químicas.

Parte A: questões 1, 3, 8, 18

Parte B: questões 5(a), 5(b), 5(c), 6(a), 6(b)

• **Âmbito 2 da Competência Representacional:** A capacidade de alternar entre diferentes representações em um mesmo âmbito.

Parte A: questões 2, 4, 5, 15, 16, 17, 20

Parte B: questões 1(a)

• **Âmbito 3 da Competência Representacional:** A capacidade de alternar entre diferentes representações em diferentes âmbitos.

Parte A: questões 12, 14, 19, 21, 22, 23, 25

Parte B: questões 7(a)

• **Âmbito 4 da Competência Representacional:** A capacidade de usar representações para gerar explicações.

Parte A: nenhuma questão

Parte B: questões 2(a), 2(b), 3(a), 3(b), 3(c), 4, 7(b)

• **Âmbito 5 da Competência Representacional:** A capacidade de fazer conexões entre representações e conceitos.

Parte A: questões 6, 7, 9, 10, 11, 13, 24

Parte B: questões 1(b)

Especificações descritas no estudo de Sim (2010). Tradução para a língua portuguesa realizada pela pesquisadora.

SIM, Joong H. **Representational competence of form four science students on basic chemical concepts.** 2010. 532 p. Tese (Doutorado em Educação) - Faculdade de Educação, Universidade da Malásia, Kuala Lumpur, 2010.

APÊNDICE B - Questionário de Estratégia (QE)

QUESTIONÁRIO DE ESTRATÉGIA (QE)

Código de Identificação: _____

Nome: _____ Idade: _____

Gênero: () Feminino () Masculino () Outro: _____ Data: _____

() ESTUDANTE

Semestre na Graduação: cursando o ___º semestre

Disciplinas de Química Orgânica já cursadas:

() Química Orgânica I () Química Orgânica II () Química Orgânica III

() Química Orgânica Experimental I () Espectroscopia Molecular Orgânica

() Introdução a Polímeros () Química Orgânica de Biomoléculas

() PROFESSOR(A)

Tempo de atuação como professor(a): _____ anos

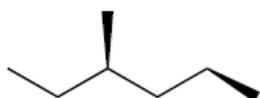
Disciplina(s) ministrada(s) atualmente na Graduação:

INSTRUÇÕES:

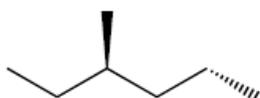
1. Esse questionário consiste em 6 questões de múltipla escolha.
2. Responda TODAS as questões.
3. Escolha a melhor resposta para cada questão e circule apenas UMA das alternativas.

QUESTÕES

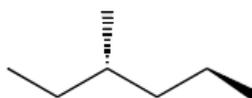
1. Qual molécula é igual à ORIGINAL mostrada?



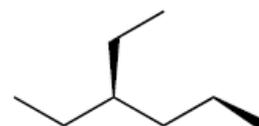
ORIGINAL



A

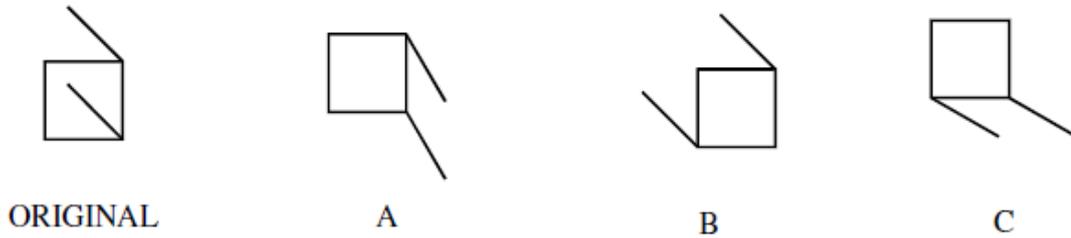


B

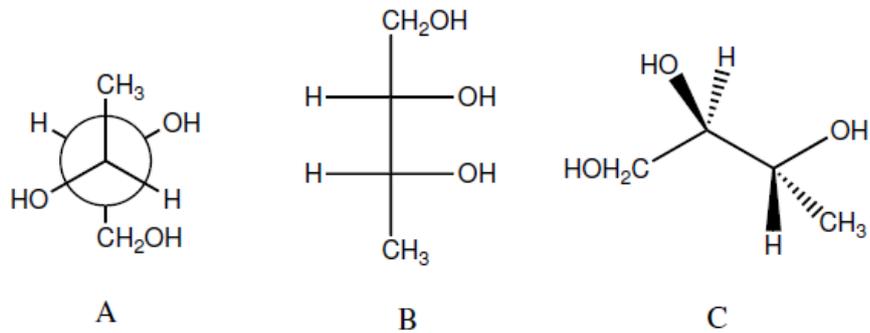


C

2. Qual dos seguintes diagramas é um estereoisômero diferente da molécula ORIGINAL?



3. Quais são as duas moléculas iguais?

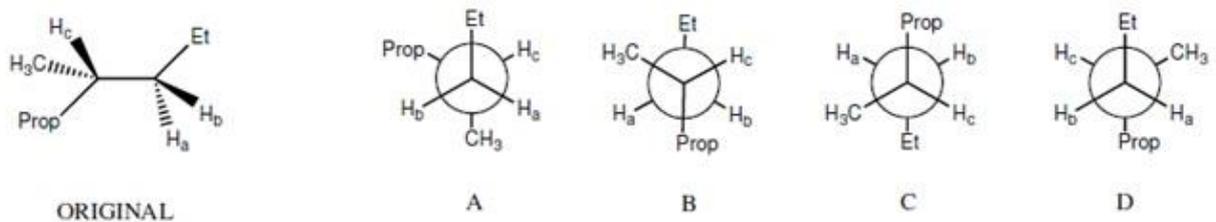


1. A e B

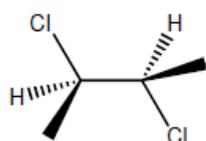
2. A e C

3. B e C

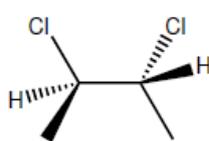
4. Escolha a projeção de Newman que corresponda à estrutura ORIGINAL mostrada abaixo:



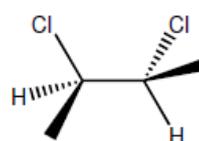
5. Qual das seguintes estruturas é um estereoisômero diferente do ORIGINAL?



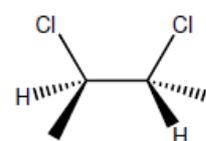
ORIGINAL



A

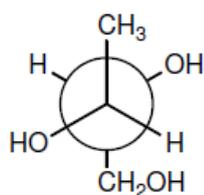


B

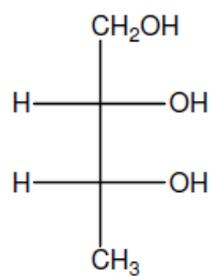


C

6. Verdadeiro ou falso? Essas duas moléculas são isômeros conformacionais.



A



B

1. Verdadeiro

2. Falso

Instrumento desenvolvido nos estudos de Stieff e Raje (2010) e Stieff *et al.* (2012). Tradução para a língua portuguesa realizada pela pesquisadora.

STIEFF, Mike; RAJE, Sonali. Expert algorithmic and imagistic problem solving strategies in advanced chemistry. **Spatial cognition and computation**, v. 10, n. 1, p. 53-81, 2010.

STIEFF, Mike *et al.* The role of spatial ability and strategy preference for spatial problem solving in organic chemistry. **Journal of chemical education**, v. 89, n. 7, p. 854-859, 2012.

APÊNDICE C - Protocolo *Report Aloud* para entrevista individual**PROTOCOLO REPORT ALOUD PARA ENTREVISTA (PREENCHIDO PELA PESQUISADORA)**

Código de Identificação: _____

Nome: _____ Idade: _____

Gênero: () Feminino () Masculino () Outro: _____ Data: _____

() ESTUDANTE - NOVATO

Semestre na Graduação: cursando o ____º semestre

Disciplinas de Química Orgânica já cursadas:

() Química Orgânica I () Química Orgânica II () Química Orgânica III

() Química Orgânica Experimental I () Espectroscopia Molecular Orgânica

() Introdução a Polímeros () Química Orgânica de Biomoléculas

() PROFESSOR(A) - ESPECIALISTA

Tempo de atuação como professor(a): _____ anos

Disciplina(s) ministrada(s) atualmente na Graduação:

_____**PROTOCOLO:**

1. Entrevista individual retomando o **Questionário de Estratégia (QE)**.
2. Após o participante responder o questionário QE, iniciar a entrevista com a gravação em vídeo e áudio da mesma.
3. Solicitar ao participante um relato de como construiu seu raciocínio durante a resolução de cada uma das 6 questões do questionário QE, indicando as estratégias adotadas.
4. Analisar a gravação da entrevista, transcrevendo e identificando as expressões indicativas do tipo de estratégia utilizada, assim como os gestos descritivos, para cada uma das resoluções.

REGISTROS:

QUESTÃO 1			
Momento da gravação	Expressão verbal	Gesto descritivo	Observação

QUESTÃO 2			
Momento da gravação	Expressão verbal	Gesto descritivo	Observação

QUESTÃO 3			
Momento da gravação	Expressão verbal	Gesto descritivo	Observação

QUESTÃO 4			
Momento da gravação	Expressão verbal	Gesto descritivo	Observação

QUESTÃO 5			
Momento da gravação	Expressão verbal	Gesto descritivo	Observação

QUESTÃO 6			
Momento da gravação	Expressão verbal	Gesto descritivo	Observação

Protocolo elaborado segundo diretrizes do estudo de Trevisan *et al.* (2019).

TREVISAN, Robson *et al.* Peeking into students' mental imagery: the Report Aloud technique in Science Education research. **Ciência & Educação (Bauru)**, v. 25, p. 647-664, 2019.

ANEXOS

ANEXO A - Carta de anuência do local da coleta de dados



CARTA DE ANUÊNCIA DO LOCAL DA COLETA DE DADOS

Ao Comitê de Ética em Pesquisa em Seres Humanos da Universidade Luterana do Brasil/RS

Prezados Senhores,

Declaro que tenho conhecimento e autorizo a realização do projeto de pesquisa intitulado **“Competência Representacional na Aprendizagem Química: Elucidando as Bases Neurais e os Mecanismos Mentais Associados ao Raciocínio Químico de Novatos e Especialistas”**, proposto pela pesquisadora **Thaygra Severo Prodanov**.

O referido projeto será realizado na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Porto Alegre/RS), no Instituto de Química, e só poderá ocorrer a partir da apresentação do Parecer de Aprovação do Colegiado do Comitê de Ética em Pesquisa em Seres Humanos da Universidade Luterana do Brasil/RS.

Canoas, agosto de 2021.

Coordenação de Graduação
Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS
Porto Alegre/RS

ANEXO B - Termo de Consentimento Livre e Esclarecido (TCLE)

TERMO DE CONSENTIMENTO LIVRE E ESCLARECIDO

1. IDENTIFICAÇÃO DO PROJETO DE PESQUISA

Título do Projeto: COMPETÊNCIA REPRESENTACIONAL NA APRENDIZAGEM QUÍMICA: ELUCIDANDO AS BASES NEURAIS E OS MECANISMOS MENTAIS ASSOCIADOS AO RACIOCÍNIO QUÍMICO DE NOVATOS E ESPECIALISTAS

Área do Conhecimento: Ciências Humanas | Número de Participantes: 20 | Total: 20

Curso: Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências e Matemática - PPGEICIM ULBRA | Unidade: Ensino e Aprendizagem em Ciências

Projeto Multicêntrico		Sim	x	Não	x	Nacional	Internacional	Cooperação Estrangeira		Sim	x	Não
-----------------------	--	-----	---	-----	---	----------	---------------	------------------------	--	-----	---	-----

Patrocinador da pesquisa: a pesquisadora e Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES - Ministério da Educação)

Instituição onde será realizada: Universidade Luterana do Brasil (ULBRA)

Nome da pesquisadora: Thaygra Severo Prodanov

Você está sendo convidado(a) para participar do projeto de pesquisa acima identificado. O documento abaixo contém todas as informações necessárias sobre a pesquisa que estamos fazendo. Sua colaboração nesse estudo será de muita importância para nós, mas se desistir, a qualquer momento, isso não causará nenhum prejuízo a você.

2. IDENTIFICAÇÃO DO PARTICIPANTE DA PESQUISA

Nome: _____ Data de Nasc.: _____ Sexo: _____

Nacionalidade: _____ Estado Civil: _____ Profissão: _____

RG: _____ CPF/MF: _____ Telefone: _____ E-mail: _____

Endereço: _____

3. IDENTIFICAÇÃO DO PESQUISADOR RESPONSÁVEL

Nome: Thaygra Severo Prodanov | Telefone: _____

Profissão: Química | Registro no Conselho Nº: _____ | E-mail: thaygra@rede.ulbra.br

Endereço: Rua Farroupilha, 8001 - Prédio 14 - Sala 338

Eu, participante da pesquisa, abaixo assinado(a), após receber informações e esclarecimento sobre o projeto de pesquisa, acima identificado, concordo de livre e espontânea vontade em participar como voluntário(a) e estou ciente:

1. Da justificativa e dos objetivos para realização dessa pesquisa.

A representação de conceitos químicos sempre foi uma área problemática na aprendizagem química. Isso ocorre porque, nessa ciência, os fenômenos no nível macroscópico, como reações químicas, podem ser conceituados em termos de entidades submicroscópicas, como átomos e moléculas, e traduzidos em representações simbólicas, como símbolos químicos, fórmulas e equações. São esses vários níveis de representação que muitas vezes tornam a Química um assunto difícil, especialmente para os estudantes iniciantes. Compreender como os estudantes processam as informações, em nível neuronal, pode trazer novas perspectivas ao iluminar o processo de raciocínio e o uso das habilidades envolvidas na resolução de problemas. Na perspectiva da neurociência cognitiva, esta concebe relações dinâmicas entre comportamento, experiência e estrutura do cérebro. Por isso, essa pesquisa objetiva investigar na perspectiva da interseção entre Neurociência e Educação as diferenças entre novatos (estudantes) e especialistas (professores) ao definirem estratégias para a resolução de problemas químicos, podendo-se estabelecer relações que amparem o ensino de Química e superem dificuldades de aprendizagem dessa ciência.

2. Do objetivo de minha participação.

Minha participação nessa pesquisa objetiva contribuir com um estudo entre Neurociência e Educação, onde meus dados/resultados serão comparados com os demais participantes da pesquisa a fim de estabelecer relações acerca do processamento do raciocínio químico durante a resolução de problemas. Disponibilizando meus dados/resultados, irei contribuir na elucidação das bases neurais associadas ao raciocínio químico e, conseqüentemente, com a ampliação de pesquisas na interface Educação e Neurociência.

3. Do procedimento para coleta de dados.

A coleta de dados ocorrerá na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Porto Alegre/RS) em horários previamente agendados com a pesquisadora, conforme minha disponibilidade. Minha participação consistirá em responder questionários e participar de uma entrevista com a pesquisadora. Caso eu seja um dos participantes selecionados para a sessão de ressonância magnética funcional, serei conduzido a um laboratório de neuroimagens com o auxílio da pesquisadora, que custeará o exame e as despesas de locomoção (transporte público, combustível e/ou estacionamento).

4. Da utilização, armazenamento e descarte dos dados.

Os dados coletados serão utilizados exclusivamente nessa pesquisa. Os instrumentos de coleta de dados e as observações efetuadas serão analisados pela pesquisadora, por meio de técnicas qualitativas e quantitativas. Os dados e as análises serão armazenados em arquivo próprio da pesquisadora, sendo os materiais físicos descartados ao término do estudo.

5. Dos desconfortos e dos riscos.

Ao participar desse estudo, estou ciente que há o risco de pequenos desconfortos, como também o risco de uma quebra acidental de confidencialidade. Estou ciente que haverá uma coleta de dados por meio do preenchimento de questionários e observações realizadas pela pesquisadora. Nos questionários, as perguntas serão relacionadas ao meu conhecimento químico e que, caso eu me sinta desconfortável em responder, ficarei à vontade para não participar. Caso eu seja um dos participantes selecionados para a sessão de ressonância magnética funcional, serei instruído acerca do exame e da localização do laboratório de neuroimagens, sendo o exame e as despesas de locomoção (transporte público, combustível e/ou estacionamento) previamente pagas pela pesquisadora. Sobre esse exame, estou ciente que possíveis desconfortos poderão ocorrer, como a necessidade de permanecer imóvel durante o exame e o barulho emitido pelo aparelho. Também, a permanência no aparelho (30-45 minutos) poderá gerar uma situação de risco para participantes com claustrofobia. A ressonância magnética funcional não necessita de nenhum preparo prévio do participante, contudo, estou ciente que no dia do exame será necessário seguir as seguintes recomendações:

- estar com os cabelos secos e sem gel;
- não utilizar piercings e anéis.
- não ter realizado tatuagem ou maquiagem definitiva em tempo inferior a três meses;
- não estar grávida;
- não ser usuário de marca-passo, cliques de aneurisma, válvulas cardíacas e implantes cocleares;
- participantes que possuem algum tipo de implante metálico no corpo deverão apresentar o laudo do fabricante atestando sua compatibilidade com a ressonância magnética de 3 Tesla.

Caso eu não me sinta confortável em participar da sessão de ressonância magnética funcional, ficarei à vontade para não participar.

6. Dos benefícios.

Ao participar dessa pesquisa, poderei compreender melhor como elaboro meu raciocínio químico na perspectiva da neurociência cognitiva. Ao ter meus mecanismos neurais elucidados durante a resolução de problemas, poderei conectá-los com os fundamentos das dificuldades da aprendizagem química, colaborando com a rede de pesquisa entre Neurociência e Educação no contexto brasileiro.

7. Da isenção e ressarcimento de despesas.

A minha participação é isenta de despesas e não receberei nenhum ressarcimento, já que não terei despesas na realização da coleta de dados. Os encontros com a pesquisadora serão realizados na Universidade, local que já estudo/trabalho, logo o deslocamento até a instituição não será considerado uma despesa para essa pesquisa. Contudo, caso eu seja um dos participantes selecionados para a sessão de ressonância magnética funcional, serei instruído acerca do exame e da localização do laboratório de neuroimagens, sendo previamente auxiliado pela pesquisadora que custeará o exame e as despesas de locomoção (transporte público, combustível e/ou estacionamento).

8. Da forma de acompanhamento e assistência.

Durante minha participação na pesquisa terei livre acesso à pesquisadora, via telefone, e-mail ou encontros presenciais na Universidade, que me auxiliará no desenvolvimento de minhas atividades, como também sanará eventuais dúvidas.

9. Da liberdade de recusar, desistir ou retirar meu consentimento.

Tenho a liberdade de recusar, desistir ou de interromper a colaboração nessa pesquisa no momento em que desejar, sem necessidade de qualquer explicação. A minha desistência não causará nenhum prejuízo à minha saúde ou bem-estar físico. Assim como não interferirá na minha continuidade como estudante/profissional na instituição a qual estou vinculado(a).

10. Da garantia de sigilo e de privacidade.

Os resultados obtidos durante esse estudo serão mantidos em sigilo, mas concordo que sejam divulgados em publicações científicas, desde que meus dados pessoais não sejam mencionados.

11. Da garantia de esclarecimento e informações a qualquer tempo.

Tenho a garantia de tomar conhecimento e obter informações, a qualquer tempo, dos procedimentos e métodos utilizados nesse estudo, bem como dos resultados finais dessa pesquisa. Para tanto, poderei consultar a **pesquisadora Thaygra Severo Prodanov (acima identificada)**. Em caso de dúvidas não esclarecidas de forma adequada pela pesquisadora, de discordância com os procedimentos ou de irregularidades de natureza ética, poderei ainda contatar o **Comitê de Ética em Pesquisa em Seres Humanos da ULBRA Canoas/RS**, com endereço na Rua Farroupilha, 8001 - Prédio 14 - Sala 224, Bairro São José, CEP 92425-900 - telefone (51) 3477-9217, e-mail comitedeetica@ulbra.br.

Declaro que obtive todas as informações necessárias e esclarecimento quanto às dúvidas por mim apresentadas e, por estar de acordo, assino o presente documento em duas vias de igual conteúdo e forma, ficando uma em minha posse.

Canoas, _____ de _____ de _____ .

Pesquisadora Responsável pelo Projeto

Participante da Pesquisa

ANEXO C - Termo de autorização de uso de imagem, nome e voz

**TERMO DE AUTORIZAÇÃO DE USO DE IMAGEM, NOME E VOZ**

Pelo presente instrumento particular de licença de uso de imagem, nome e voz, _____, portador(a) do CPF de nº _____, residente e domiciliado(a) na rua _____, nº _____, na cidade de _____ /_____, doravante denominado(a) Participante, autoriza a veiculação de sua imagem, nome e voz, gratuitamente por tempo indeterminado, por Thaygra Severo Prodanov, portadora do CPF de nº _____, doravante denominada pesquisadora.

Mediante assinatura desse termo, fica a pesquisadora autorizada a utilizar a imagem, nome e voz do(a) Participante no projeto de doutorado intitulado “**Competência Representacional na Aprendizagem Química: Elucidando as Bases Neurais e os Mecanismos Mentais Associados ao Raciocínio Químico de Novatos e Especialistas**”, para fins exclusivos de pesquisa.

Os resultados obtidos durante esse estudo serão mantidos em sigilo, sendo divulgados apenas em publicações científicas, sem qualquer contraprestação ou onerosidade, comprometendo-se o(a) Participante a nada exigir da pesquisadora em razão do ora autorizada.

Em nenhuma hipótese poderá a imagem, nome e voz do(a) Participante ser utilizada de maneira contrária a moral, bons costumes e ordem pública.

E, por estarem de acordo, as partes assinam o presente instrumento em 02 (duas) vias, de igual teor e forma, para que produza entre si os efeitos legais.

Canoas, _____ de _____ de _____ .

Participante

Pesquisadora

ANEXO D - Orçamento do Instituto do Cérebro (InsCer - PUCRS)



Orçamento para Realização de Pesquisa

1. **Dados da pesquisa:** *A Teoria da Mediação Cognitiva em Rede: Elucidando as bases neurais associadas a aspectos do raciocínio em ciências de novatos e especialistas*

Solicitantes:

- Thaygra Severo Bernardes
- Prof. Dr. Agostinho Serrano de Andrade Neto
- Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências e Matemática - Universidade Luterana do Brasil - Canoas/RS

2. **Orçamento para RM funcional por participante:**

RESSONÂNCIA	Valor
Ressonância Magnética	R\$ 720,00
RM Funcional + Estrutural (20')	R\$ 720,00
RM Funcional + Estrutural (40')	R\$ 900,00
RM Funcional + Estrutural (60')	R\$ 1.200,00
RM Funcional + Estrutural (80')	R\$ 1.500,00

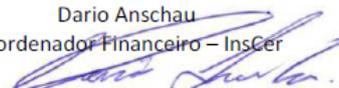
Obs:

1. Os valores não contemplam laudo sobre a neuroimagem estrutural e interpretações.
2. É de inteira responsabilidade dos pesquisadores submeterem o projeto ao comitê de ética pertinente.
3. Estes valores não contemplam desenvolvimento do estudo/paradigma experimental no formato para ressonância magnética funcional no InsCer (E-Prime ou Psychopy) e não contemplam a análise de dados.

3. **Forma de pagamento.** Boletim ou Depósito bancário.
- Validade da proposta 90 dias a contar da data desse orçamento.

Porto Alegre, 29 de abril de 2022

Dario Anschau
 Coordenador Financeiro – InsCer



Instituto do Cérebro do Rio Grande do Sul – PUCRS
 Avenida Ipiranga, 6690 – Bairro Jardim Botânico – Porto Alegre/RS CEP: 90.610-000
 Telefone: 51 - 3320.5912 / 3320.5913 – E-mail: financeiro.inscer@pucrs.br
 CNPJ: 88.630.413/0008-77