UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE QUÍMICA
INSTITUTO DE FÍSICA
INSTITUTO DE BIOCÊNCIAS
FACULDADE DE EDUCAÇÃO

Joana Guilares de Aguiar

Mapas conceituais como material instrucional de Química:
estratégias que minimizam a desorientação do aluno e potencializam a
aprendizagem de conceitos científicos

São Paulo
2018

Joana Guilaes de Aguiar

**Mapas conceituais como material instrucional de Química:
estratégias que minimizam a desorientação do aluno e
potencializam a aprendizagem de conceitos científicos**

Versão Corrigida

Tese apresentada ao Instituto de Física,
Instituto de Química, Instituto de Biociências e
Faculdade de Educação da Universidade de São
Paulo para a obtenção do título de Doutor em
Ensino de Ciências.

Área de concentração: Ensino de Química.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Rogério Miranda
Correia.

São Paulo

2018

FICHA CATALOGRÁFICA
Preparada pelo Serviço de Biblioteca e Informação
do Instituto de Física da Universidade de São Paulo

Aguiar, Joana Guilaes de

Mapas conceituais como material instrucional de química: estratégias que minimizam a desorientação do aluno e potencializam a aprendizagem de conceitos científicos. São Paulo, 2018.

Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo. Faculdade de Educação, Instituto de Física, Instituto de Química e Instituto de Biociências.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Rogério Miranda Correia
Área de Concentração: Ensino de Química

Unitermos: 1. Química – Estudo e ensino; 2. Ensino e aprendizagem; 3. Ensino de química; 4. Mapas conceituais; 5. Teoria da carga cognitiva.

USP/IF/SBI-014/2018

*Nenhum homem é uma ilha, isolado
em si mesmo, todos são parte do
continente, parte de um todo.*

Jonh Donne (1623)

AGRADECIMENTOS

A Deus pela minha vida.

Aos meus pais, meu irmão e familiares pelo apoio, carinho e admiração. Em especial à minha mãe por ser um exemplo a ser seguido.

À Tati por ser a inspiração desta e de outras vidas. O seu amor e companheirismo me fizeram perseverar e ir além dos meus limites.

Ao professor e meu orientador Paulo Correia pelos ensinamentos, dedicação e parceria. São oito anos memoráveis, de incontáveis oportunidades de crescimento pessoal e profissional.

Ao professor Ian M. Kinchin (e família) e aos colegas do *Department of Higher Education* da *University of Surrey* (Reino Unido) por me receber e me acolher como parte da equipe.

Aos professores membros da banca de qualificação e defesa pelas discussões, sugestões e disponibilidade. Vocês são uma inspiração para mim.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Pró-Reitoria de Pós-Graduação da USP pelas bolsas de estudos no país e no exterior.

Aos professores que participaram da pesquisa e contribuíram para sua melhoria, Bayardo Torres, Cassiana Nomura, Melissa Dazzani, Pedro Vitoriano, Stela Piconez, Thiago Paixão.

Aos colegas de grupo, Adriano, Aline, Anderson, Bárbara, Camila, Giuliana, Gisele, João Marcelo, José Francisco (Zé), Laura, Marília, Raíssa e Rafael pelos profundos debates teóricos e acadêmicos. Suas contribuições foram fundamentais para que eu sempre buscasse o melhor. Um agradecimento especial às minhas colegas de grupo e também amigas, Thalita Nascimento e Ronise Corrêa.

Aos amigos da vida, que dividiram comigo angústias e alegrias: Nicole, Magna, Rosi, Andrea, Sérgio Hernique, Daiane, Nadili, Morgana, Paula, Luciana Marhen, Lu Cassiano, Marcelo Pulido, Anne Kinchin, Ione, Valdez (in memorian), Siomara (in memorian).

Aos meus lindos filhos de quatro patas, que participaram ativamente das minhas noites em claro: Preto, Deco, Dudu, Marquito, Bebeia, Memove, Princesa e Lili.

Por fim, a todos os alunos que participaram desta pesquisa e aos meus ex-alunos, sem vocês não haveria motivação para se buscar o melhor ensino.

RESUMO

Aguiar, J. G. (2018). Mapas conceituais como material instrucional de Química: estratégias que minimizam a desorientação do aluno e potencializam a aprendizagem de conceitos científicos. (Tese de Doutorado). Instituto de Física, Instituto de Química, Instituto de Biociências, Faculdade de Educação. Universidade de São Paulo, São Paulo.

Os mapas conceituais (MCs) são organizadores gráficos com grande potencial para estimular a aprendizagem significativa. Porém, poucos trabalhos exploram o uso dos MCs elaborados pelo professor como material instrucional de Química. Nesta tese, a explicação química para dois fenômenos macroscópicos (cor nos fogos de artifício e a condução elétrica em diferentes materiais) foram escolhidos para serem representados e ensinados por meio dos MCs. A possibilidade de ler o MC de várias formas, a necessidade em estabelecer uma sequência de leitura e, a dificuldade do conteúdo representado podem gerar, no aluno que interage com o material, uma sensação de desorientação. A desorientação compromete os recursos cognitivos destinados à aprendizagem (processamento generativo) devido a uma alta complexidade do conteúdo (i.e., carga cognitiva intrínseca) ou a um formato de instrução inadequado (i.e., carga cognitiva extrínseca). Considerando os pressupostos da Teoria da Carga Cognitiva e da Teoria da Aprendizagem Multimídia, esses materiais devem ser elaborados de modo que as demandas cognitivas impostas ao aluno não excedam a limitada capacidade da MT, caso contrário, não sobrarão recursos cognitivos suficientes para processar e adquirir novas informações, isto é, aprender. Sendo assim, o objetivo dessa tese foi avaliar o impacto de algumas estratégias para minimizar a desorientação provocada por MCs que organizam conteúdos de Química e, consequentemente, potencializar a aprendizagem de conceitos científicos. Três estudos foram conduzidos para avaliar o impacto do uso de dicas gráficas de navegação (Estudo I), do tipo de organização conceitual (Estudo II), do uso de recursos digitais associados ao MC (i.e., um hipertexto) e do nível de conhecimento prévio dos alunos (Estudo III) no ganho de conhecimento factual e conceitual e na carga cognitiva (e.g., esforço mental) declarada para compreender o conteúdo químico. Ao total, 253 alunos ingressantes à Escola de Artes, Ciências e Humanidades da Universidade de São Paulo participaram desta pesquisa entre os anos de 2014 e 2017. A metodologia quantitativa (em um planejamento quase-experimental) foi adotada para comparar estatisticamente as médias de desempenho e esforço mental dos alunos alocados em diferentes condições experimentais. Com base nos resultados, foi possível concluir que (1) independentemente do tipo de MC utilizado como material instrucional, todos os alunos foram capazes de aumentar o seu nível de conhecimento factual sobre o conteúdo químico e, (2) o uso da cor e da hierarquia conceitual como dicas gráficas de navegação foram capazes de minimizar a desorientação provocada pelos MCs via gestão de carga intrínseca e redução da carga extrínseca, respectivamente. O processamento generativo pôde ser potencializado pelo uso de recursos digitais associados ao MC, tornando-o um hipertexto com certo grau de orientação de navegação. Algumas implicações educacionais, limitações da pesquisa e possibilidade de estudos futuros também são apresentadas.

Palavras-chave: Química – estudo e ensino; ensino e aprendizagem; ensino de Química; mapas conceituais; Teoria da Carga Cognitiva.

ABSTRACT

Aguiar, J. G. (2018). Concept maps as instructional material in chemistry: strategies to decrease disorientation and to foster scientific conceptual learning. (PhD Thesis). Instituto de Física, Instituto de Química, Instituto de Biociências, Faculdade de Educação. Universidade de São Paulo, São Paulo.

Concept maps (Cmaps) are graphical organisers with great potential to foster meaningful learning. However, just a few studies explore the use of teacher-prepared Cmaps as chemistry instructional material. In this thesis, chemical explanations for two macroscopic phenomena (the colour in fireworks and electric conductivity) are chosen to be represented and taught through Cmaps. The possibility of reading the Cmap in different ways, the need for establishing a reading sequence and the content difficulty can lead, for the learner who is interacting with the material, a sense of disorientation. Disorientation impairs the cognitive resources that should be used for learning (generative processes) due to either a high content complexity (i.e., intrinsic load) or an unsuited format of instruction (i.e., extraneous load). Based on the assumptions of Cognitive Load Theory and Multimedia Learning Theory, these materials should be elaborated in a way that the cognitive load imposed to the learners does not exceed the limited working memory capacity, otherwise, there are no left cognitive resources to process and acquire new knowledge (i.e., learn). The thesis' goal was to evaluate the impact of some strategies in minimizing the disorientation of Cmap that organizes chemistry contents and, consequently, to foster scientific conceptual learning. Three studies were conducted to evaluate the impact of: using navigational graphical cues (Study I), different types of conceptual organisation (Study II), using digital resources linked to the Cmap (i.e., hypertext) and the level of learners' prior knowledge (Study III) on the gain of factual and conceptual knowledge and the cognitive load (e.g., mental effort) related to understanding the chemical content. In total, 253 freshman university students to the School of Arts, Science and Humanities of the University of São Paulo participated in this research between 2014 and 2017. A quantitative methodology (by a pre-test-to-post-test quasi-experimental design) were adopted for statistically comparing the mean of performance and mental effort from students in different experimental conditions. Considering the results, it was concluded that: (1) regardless the type of Cmap used as instructional material, all students were capable to improve their level of factual knowledge about chemical concepts and (2) the use of colour and conceptual hierarchy as navigational graphical cues decreased Cmap disorientation by managing intrinsic load and reducing extraneous load, respectively. Generative processing was fostered using digital resources linked to the Cmap by offering a scaffold for hypertext navigation. Some educational implications, research limitations and future studies are also presented.

Palavras-chave: Chemistry – study and teaching; teaching and learning; chemical education; concept maps; Cognitive Load Theory.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1. Os três níveis conceituais da Química. Fonte: a autora, adaptada de Johnstone (1993).
.....26
- Figura 2. Organizadores gráficos, utilizados como materiais de ensino em pesquisas, incorretamente denominados como MCs. Fonte: Amadiou et al. (2009), Safdar et al. (2012), Liu (2014) e Grimaldi, Poston & Karpicke (2015).30
- Figura 3. Etapas de elaboração de um mapa conceitual a partir de um texto de base (disponível em <http://www.usp.br/quimicaverde/>), considerando (a) a seleção de conceitos-chave, (b) o “estacionamento” de conceitos (c) a organização hierárquica dos conceitos e o estabelecimento das proposições usando pares de conceitos e um termo de ligação e (d) a revisão da rede proposicional e estabelecimento da pergunta focal. O conceito inicial recebe um destaque e os exemplos ficam em caixas diferentes ou fora de caixas. Fonte: a autora.32
- Figura 4. Exemplo de uma página do Wikipedia sobre Educação que é um hipertexto, i.e., um texto com *hyperlinks*, que levam a outros recursos (texto, vídeos, imagens) ao serem clicados no próprio material. Fonte: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Educação> [jan.18].36
- Figura 5. Exemplo de um modelo de conhecimento sobre Marte, ou seja, um hipertexto na qual um MC agrupa *hyperlinks* atrelados aos conceitos que, quando clicados, podem levar a outros MCs, imagens, vídeos, textos, sites da web etc. Fonte: Cañas et al. (2004) – descrita em detalhes em Briggs et al. (2004).37
- Figura 6. Três sistemas de memória (MS, MT e MLP) que compõem a arquitetura cognitiva humana responsáveis pelo processamento, aquisição e recuperação de informações. Fonte: a autora.44
- Figura 7. Exemplo de como as cargas cognitivas associadas a um material instrucional variam em função da interatividade entre elementos (baixa no modelo HCl e alta no modelo H₂CO₃) e do formato de instrução (inadequado de forma textual e adequado de forma diagramática). Fonte: baseada em Carlson, Chandler & Sweller (2003).49

Figura 8. Propriedade aditiva das CGs que ocupam a limitada MT. Quando as CGs excedem a MT ocorre a sobrecarga cognitiva (a). A sua prevenção é crítica e deve ser feita através de estratégias que impliquem na (b) gestão da CG intrínseca e/ou (c) diminuição da CG extrínseca. Em ambas as situações, espera-se que o processamento generativo seja otimizado, melhorando os resultados de aprendizagem. Fonte: adaptada de Sweller, Ayres, & Kalyuga, 2011..... 50

Figura 9. Dois materiais instrucionais iguais elaborados sobre o ciclo do carbono. O material da direita evitou o efeito da atenção dividida ao integrar imagem e texto, diminuindo a CG extrínseca em relação ao material não integrado. Fonte: adaptada de Usberco & Salvado (2002, p.455)..... 52

Figura 10. Processamento de informação segundo a Teoria cognitiva da Aprendizagem Multimídia. Fonte: traduzida e adaptada de Mayer & Moreno (2003). 55

Figura 11. MC que representa o referencial teórico da tese, feito a partir do meu acoplamento entre o contexto da pesquisa (em preto) e os conceitos das teorias cognitivistas – Teoria da Carga Cognitiva (em vermelho), Teoria da Aprendizagem Multimídia (em azul), ambas as teorias (em roxo) e Teoria da Aprendizagem Significativa (em verde). Fonte: a autora. 60

Figura 12. Emissão de radiação do corpo negro em diferentes temperaturas T. Quanto maior a temperatura, maior a intensidade da radiação emitida, mas, o comprimento de onda máximo (λ_{max}) se desloca para valores cada vez menores. Consequentemente, há emissão de luz em diferentes regiões do espectro eletromagnético – UV: ultravioleta; VIS: visível; IV: infravermelho. Fonte: Schubert, E. F. (2006, p. 307)..... 63

Figura 13. Transições eletrônicas previstas em séries espectrais de Lyman, Balmer, Paschen, Brackett e Pfund que ditam a emissão de energia inversamente proporcional ao comprimento das ondas na região do ultravioleta, visível e infravermelho. Fonte: adaptada de <https://www.visionlearning.com/en/library/Chemistry/1//231/reading> [jan. 18]. 65

Figura 14. Exemplos de retículos cristalinos metálicos que apresentam cela unitária hexagonal compacta, cúbica de face ou corpo centrada(o). Fonte: adaptada de <https://www.ggsptd.com> [jan. 18]..... 67

Figura 15. Metal sódio (a) é formado pela união de átomos de sódio representado em (b) por um modelo submicroscópico do arranjo cristalino 3D. A ligação metálica é dada pela atração entre os cátions sódio com seus elétrons deslocalizados, que se movem facilmente pela rede. Fonte: adaptada de Zumdahl & Zumdahl (2014).68

Figura 16. Estrutura cristalina (a) cúbica do diamante e (b) lamelar da grafita (ou grafite). A presença de elétrons deslocalizados acima e abaixo das camadas da grafita permitem que ela seja um composto covalente condutor de eletricidade. Fonte: adaptada de http://www.crq4.org.br/qv_variedades_alotropicas_carbono [jan. 18].69

Figura 17. Representação de algumas ligações entre átomos de silício em um semicondutor. Em (a) o silício puro pode gerar lacunas dinâmicas devido a um aumento de temperatura e em (b) a dopagem com impurezas, boro e fósforo, que formam semicondutores do tipo-p (criam lacunas) ou tipo-n (adicionam elétrons livres), respectivamente. Fonte: <https://www.electronica-pt.com> [jan. 18].70

Figura 18. Representação de como ocorre a ligação entre dois, três, quatro e n-átomos de lítio. Os orbitais atômicos se combinam para formar orbitais moleculares (OM), que podem ser ligantes, não ligantes ou antiligantes. No metal lítio, os OM de energia semelhante formam uma contínua banda de energia. Fonte: adaptada de Mora, Lucas & Maran (2010) [jan. 18].72

Figura 19. Diferença (*gap*) energética entre o HOMO da banda de valência e o LUMO da banda de condução definem o nível de Fermi e, conseqüentemente, a capacidade do material em conduzir eletricidade. Fonte: a autora.73

Figura 20. Representação da solvatação do cloreto de sódio (NaCl) quando dissolvido em água. No estado sólido, uma rede cristalina rígida não permite condução elétrica, mas em meio aquoso, a presença de íons permite mobilidade eletrônica. Fonte: <http://www.projeto-biologico.arizona.edu> [jan. 18]. Para uma representação dinâmica desse processo consulte o vídeo: <https://www.youtube.com/watch?v=uTgJHP9msLE> [jan. 18].74

Figura 21. Visão geral do planejamento experimental adotado para os três estudos da tese. Do lado esquerdo os conteúdos de Química de cada estudo. Um planejamento quase-experimental foi delineado para verificar o efeito das variáveis independentes (manipuladas) sobre as variáveis dependentes (testadas). Conhecimento prévio é uma possível covariável. Fonte: a autora.78

Figura 22. Estudo I - planejamento quase-experimental resultando em quatro possíveis MCs a serem usados como material de estudo, com ou sem cor nos conceitos e com ou sem número nas proposições.....81

Figura 23. Estudo I - procedimento de coleta de dados com os tempos despendidos em cada etapa.....81

Figura 24. Estudo I - MC com cor e com número utilizado como material instrucional na condição experimental CCCN. Fonte: a autora.87

Figura 25. Estudo I - gráfico de eficiência da instrução em função das médias normalizadas de desempenho e esforço mental. Apenas o MC com cor e sem número (CCSN) teve uma eficiência positiva, i.e., gerou um alto ganho de conhecimento com baixo esforço mental. Fonte: a autora.95

Figura 26. Estudo II - planejamento quase-experimental 2 (dica gráfica cor: ausente vs. presente) X 3 (tipo de organização conceitual: hierárquica em “árvore”, cíclica ou não hierárquica), resultando em seis possíveis MCs a serem usados como material de estudo. ..104

Figura 27. Estudo II - procedimento de coleta de dados com os tempos despendidos em cada etapa.....105

Figura 28. Estudo II - gráfico de eficiência da instrução em função das médias normalizadas de desempenho e esforço mental. Valores positivos indicam uma eficiência positiva, i.e., que o MC em estudo gerou um alto ganho de conhecimento com baixo esforço mental. Fonte: a autora.111

Figura 29. Estudo III - planejamento quase-experimental 2 (nível de conhecimento prévio dos alunos: baixo vs. alto) X 2 (uso de recursos digitais associados ao MC: ausente vs. presente), resultando em quatro possíveis condições experimentais. Fonte: a autora.121

Figura 30. Estudo III – procedimento de coleta de dados com os tempos despendidos em cada etapa. O TCLE e o teste de classificação foram aplicados na primeira aula e as demais etapas na segunda aula. A coleta de dados ocorreu no laboratório de informática com o auxílio da plataforma *Moodle/STOA-USP*. Fonte: a autora.122

Figura 31. Estudo III - MC utilizado como material instrucional. Alguns conceitos possuem ícones abaixo deles. Quando clicados, eles abrem os recursos digitais associados ao mapa. Fonte: a autora. 132

Figura 32. Estudo III - gráfico da eficiência da instrução em função das médias normalizadas de desempenho e esforço mental. Apenas os MCs com recursos digitais tiveram uma eficiência positiva, i.e., gerou um alto ganho de conhecimento com baixo esforço mental. Fonte: a autora. 141

Figura 33. Estudo III – frequência das alternativas escolhidas pelos alunos nas seis questões de múltipla escolha do pré-teste (ver Quadro 1). A porcentagem escrita em preto se refere à alternativa correta. Fonte: a autora. 142

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Descrição e exemplo de alguns efeitos baseados na TCC que guiam estratégias instrucionais para diminuir a CG extrínseca, fazer a gestão da CG intrínseca e otimizar processamentos generativos.	53
Tabela 2. Efeitos, princípios e métodos da Teoria da Aprendizagem Multimídia que podem ser usados para reduzir a demanda cognitiva imposta durante a tarefa quando o sujeito entra em sobrecarga por diferentes cenários.	58
Tabela 3. Sais e óxidos metálicos usados na composição de fogos de artifício. Durante a queima, cada composto gera uma cor devido à emissão de radiação eletromagnética com comprimento de onda na região do espectro visível (400nm a 700nm).	62
Tabela 4. Condutividade elétrica de alguns materiais.	66
Tabela 5. Estudo I - questionário validado e aplicado como pré-teste. As afirmações grifadas em amarelo estão incorretas do ponto de vista científico.	84
Tabela 6. Estudo I - questionário validado e aplicado como pós-teste. As afirmações grifadas em amarelo estão incorretas do ponto de vista científico.	85
Tabela 7. Estudo I - categorias e subcategorias definidas e exemplificadas para análise das respostas dos alunos à questão dissertativa do pré-teste e do pós-teste.	90
Tabela 8. Estudo I - médias (desvio-padrão) do desempenho e esforço mental em cada condição experimental. A eficiência da instrução é calculada a partir da combinação do ganho de conhecimento e esforço mental em escala normalizada.	93
Tabela 9. Estudo II - médias (desvio-padrão) do desempenho e esforço mental em cada condição experimental. A eficiência da instrução é calculada a partir da combinação do ganho de conhecimento e esforço mental em escala normalizada.	109

Tabela 10. Estudo III - questionário validado e aplicado para a classificação dos alunos de acordo com seu nível de conhecimento prévio. As afirmações grifadas em amarelo estão incorretas do ponto de vista científico. 125

Tabela 11. Descrição das subescalas que compõem o questionário NASA-TLX..... 135

Tabela 12. Estudo III - médias (desvio-padrão) do desempenho, carga cognitiva e tempo gasto na tarefa em cada condição experimental. A eficiência da instrução é calculada a partir da combinação do ganho de conhecimento e esforço mental em escala normalizada. 139

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

ACCR	Alto Conhecimento prévio Com Recursos digitais
ACP	Alto Conhecimento Prévio
ACSR	Alto Conhecimento prévio Sem Recursos digitais
ANCOVA	Análise de Covariância
ANOVA	Análise de Variância
APA	American Psychological Association
BCCR	Baixo Conhecimento prévio Com Recursos digitais
BCP	Baixo Conhecimento Prévio
BCSR	Baixo Conhecimento prévio Sem Recursos digitais
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior
CB	Ciclo Básico
CCCN	Com Cor Com Número
CCHA	Com Cor Hierarquia em “árvore”
CCHC	Com Cor Hierarquia Cíclica
CCNH	Com Cor Não Hierárquico
CCSN	Com Cor Sem Número
CG ou CGs	Carga Cognitiva Cargas Cognitivas
CN	Ciências da Natureza
CQ	Composto Químico
CR	Com Recursos (digitais)
D	Desempenho
E	Eficiência da instrução
EACH	Escola de Artes, Ciências e Humanidades
EB	Em Branco
EC	Erro Conceitual
EE	Espectro Eletromagnético
EL	Emissão de Luz
EM	Esforço Mental
EQ	Elemento Químico
FP	Fragilidade Pedagógica
GPMC	Grupo de Pesquisa Mapas Conceituais
HOMO	Highest Occupied Molecular Orbital
IV	Infravermelho
LUMO	Lowest Unoccupied Molecular Orbital

MC ou MCs	Mapa Conceitual Mapas Conceituais
MLP	Memória de Longo prazo
MS	Memória Sensorial
MT	Memória de Trabalho
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NE	Nível de Energia
NS	Não Sei
OA	Orbital Atômico
OM	Orbital Molecular
SCCN	Sem Cor Com Número
SCHA	Sem Cor Hierarquia em “árvore”
SCHC	Sem Cor Hierarquia Cíclica
SCNH	Sem Cor Não Hierárquico
SCSN	Sem Cor Sem Número
SI	Sistema Internacional (de unidades de medidas)
SPSS	Statistical Package for the Social Sciences
SR	Sem Recursos (digitais)
STOA	Sistema de apoio às disciplinas da USP
TAM	Teoria da Aprendizagem Multimídia
TCC	Teoria da Carga Cognitiva
TCLE	Termo de Consentimento Livre e Esclarecido
TLX	Task Load Index
USP	Universidade de São Paulo
UV	Ultravioleta
VIS	Visível

SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO	18
CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO	25
1.1 Ensino e aprendizagem de conceitos químicos	25
1.2 Mapas conceituais como material instrucional	29
1.2.1 Mapas conceituais como hipertextos e o problema da desorientação	35
1.3 Objetivo, pergunta de pesquisa e hipótese da tese	39
1.4 Organização da tese em estudos	40
CAPÍTULO 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	41
2.1 Teoria da Carga Cognitiva	41
2.1.1 Processamento, aquisição e recuperação de informações	42
2.1.2 As cargas cognitivas impostas à memória de trabalho durante a tarefa	47
2.1.3 O planejamento instrucional como um fator crítico para promover a aprendizagem	51
2.2 Teoria Cognitiva da Aprendizagem Multimídia	54
2.2.1 Demandas cognitivas impostas na tarefa, situações de sobrecarga cognitiva e como evitá-las	56
2.2.2 Resumo e articulação da fundamentação teórica	59
CAPÍTULO 3. BREVE REVISÃO CONCEITUAL DOS CONTEÚDOS QUÍMICOS ENVOLVIDOS NA PESQUISA	61
3.1 Por que os fogos de artifício têm cores?	61
3.2 Por que os metais conduzem eletricidade?	66
CAPÍTULO 4. METODOLOGIA	75
4.1 Contexto, participantes e questões éticas	75
4.2 Procedimentos de pesquisa: uma visão geral dos estudos	76
CAPÍTULO 5. ESTUDO I - O EFEITO DA ADIÇÃO DE DICAS GRÁFICAS AOS MAPAS CONCEITUAIS SOBRE QUÍMICA	79
5.1 Objetivo, pergunta de pesquisa e hipóteses de trabalho	79
5.2 Materiais e métodos	80
5.2.1 Contexto, participantes e planejamento experimental	80
5.2.2 Procedimento de coleta dos dados	81
5.2.3 Materiais	82

5.2.3.1 Desenvolvimento e validação do pré-teste e pós-teste	82
5.2.3.2 Desenvolvimento dos MCs usados como material de estudo	86
5.2.3.3 Medidas de esforço mental	88
5.2.4 Procedimento de análise dos dados	88
5.2.4.1 Conhecimento factual e conceitual dos alunos	88
5.2.4.2 Ganho de conhecimento factual e medidas de esforço mental	90
5.2.4.3 Eficiência da instrução	91
5.2.4.4 Análises quantitativas (estatísticas) e qualitativas (categorias)	92
5.3 Resultados e discussões	92
5.3.1 Os resultados de aprendizagem e o esforço mental durante a tarefa	92
5.3.2 Análise da eficiência da instrução	95
5.3.3 Análise do conhecimento conceitual dos alunos antes e após o período de estudo	97
5.4 Conclusões do Estudo I	100

CAPÍTULO 6. ESTUDO II - O EFEITO DA ESTRUTURA HIERÁRQUICA DO MAPA CONCEITUAL DE QUÍMICA

6.1 Objetivos, perguntas de pesquisa e hipóteses de trabalho	102
6.2 Materiais e métodos	104
6.2.1 Contexto, participantes e planejamento experimental	104
6.2.2 Procedimento de coleta de dados	105
6.2.3 Materiais	105
6.2.3.1 Questionários validados usados como pré-teste e pós-teste	106
6.2.3.2 Desenvolvimento dos MCs usados como material de estudo	106
6.2.3.3 Medidas de esforço mental	106
6.2.4 Procedimento de análise dos dados	107
6.2.4.1 Conhecimento factual e conceitual dos alunos	107
6.2.4.2 Ganho de conhecimento factual e medidas de esforço mental	107
6.2.4.3 Análise da eficiência da instrução	107
6.2.4.4 Análises quantitativas (estatísticas) e qualitativas (categorias)	108
6.3 Resultados e discussões	108
6.3.1 Os resultados de aprendizagem e o esforço mental durante a tarefa	108
6.3.2 Análise da eficiência da instrução	110
6.3.3 Análise do conhecimento conceitual dos alunos antes e após o período de estudo	112
6.4 Conclusões do Estudo II	114

CAPÍTULO 7. ESTUDO III - O EFEITO DO CONHECIMENTO PRÉVIO DOS ALUNOS E DA ADIÇÃO DE RECURSOS DIGITAIS AO MAPA CONCEITUAL QUE ORGANIZA UM HIPERTEXTO SOBRE CONCEITOS QUÍMICOS DIFÍCEIS

7.1 Objetivo, perguntas de pesquisa e hipóteses de trabalho	119
---	-----

7.2 Materiais e métodos	120
7.2.1 Contexto, participantes e planejamento experimental	120
7.2.3 Procedimento de coleta dos dados	122
7.2.4 Materiais	124
7.2.4.1 Desenvolvimento e validação do teste de classificação	124
7.2.4.2 Desenvolvimento dos questionários usados como pré-teste e pós-teste	125
7.2.4.3 Desenvolvimento dos MCs e dos recursos digitais	131
7.2.4.4 Medida de carga cognitiva	134
7.2.5 Procedimento de análise dos dados	134
7.2.5.1 Classificação dos alunos segundo o nível de conhecimento prévio no tema	134
7.2.5.2 Conhecimento factual, conceitual e o ganho de conhecimento	136
7.2.5.3 Análise da carga cognitiva e do tempo da tarefa	136
7.2.5.4 Análise da eficiência da instrução	137
7.2.5.5 Análises quantitativas (estatísticas) e qualitativas (categorias)	137
7.3 Resultados e Discussões	138
7.3.1 Análise da Eficiência da instrução	140
7.3.2 Análise qualitativa do desempenho dos alunos durante o pré-teste	141
7.3.2.1 Análise das concepções prévias dos alunos considerando os testes de múltipla escolha	142
7.3.2.2 Análise das concepções prévias dos alunos considerando as questões dissertativas	144
7.4 Conclusões do Estudo III	147
CAPÍTULO 8. CONCLUSÕES DA TESE	150
8.1 Implicações educacionais	150
8.2 Limitações da pesquisa e estudos futuros	154
REFERÊNCIAS	157
APÊNDICES	174
ANEXO	190

APRESENTAÇÃO

Desde que me lembro, sempre tive um interesse latente em compreender como o ser humano aprende e, com base em seus aprendizados, modula seus comportamentos. Esse interesse me levou a buscar, durante todo o bacharelado em Química na Unicamp, disciplinas eletivas na Faculdade de Educação voltadas ao mecanismo de ensino e aprendizagem que abordavam, principalmente, conceitos na interface educação e psicologia. Em 2006, ao final da graduação percebi que havia cumprido praticamente todo o currículo exigido ao curso de Licenciatura Plena em Química. Nascia, então, uma grande disposição em seguir a carreira docente. Esse desejo ficou ainda mais forte quando dei sequência ao curso de especialização em Docência no Ensino Superior, em 2007.

Em 2009, eu já ministrava aulas de Química para dez turmas de Ensino Médio e seis turmas de Ensino Superior da área da saúde, em um total de mais de 600 alunos sob minha responsabilidade. Não restavam mais dúvidas de que aquele era o meu talento, a minha missão. Porém, estar em sala de aula me fez perceber o quanto minha formação inicial falhou em fornecer o arcabouço necessário para atuar na prática. Além disso, a avalanche de atividades extracurriculares tomava o tempo que eu deveria estar me dedicando a refletir sobre as melhores opções metodológicas que atendiam às necessidades de cada turma ou daquele aluno com dificuldade. No fim, eu sabia que também estava falhando como professora. Era preciso me debruçar sobre discussões mais profundas da educação, aquelas que me transformariam na professora que eu gostaria de ser.

Nesse momento, decidi retornar à universidade e me dedicar à construção de uma carreira acadêmica. O programa de pós-graduação Interunidades em Ensino de Ciências da Universidade de São Paulo (USP) era exatamente o que eu desejava, a aliança entre o processo de ensinar e de aprender os conteúdos das Ciências e da Química. A entrada no Grupo de Pesquisa em Mapas Conceituais (GPMC), em 2010, foi fundamental para que eu pudesse não apenas vivenciar a condução de uma pesquisa educacional com rigor da metodologia científica, como também aprofundar os estudos das teorias da aprendizagem. As disciplinas oferecidas pelo programa complementaram minha formação permitindo que eu ampliasse o campo de visão para as mais diversas preocupações dentro do Ensino de Química, tais como a formação de professores, o uso de tecnologias e modelagem química, as dificuldades e obstáculos de

aprendizagem, as metodologias ativas de aprendizagem, a contribuição da história e filosofia das ciências e os procedimentos de pesquisa na área.

No GPMC, fui constantemente exposta a debates teóricos e metodológicos voltados ao uso dos mapas conceituais (MCs) como potencial ferramenta de ensino, avaliação e colaboração. Concebido por John Novak e fundamentado na teoria de Ausubel, os MCs são representações gráficas das representações mentais dos sujeitos acerca de determinado conteúdo. Diferentemente dos mapas mentais, organogramas, fluxogramas e esquemas, os MCs possuem como unidade semântica as proposições, formadas pela união de dois conceitos unidos por um termo de ligação com um verbo e uma seta que orienta a ordem de leitura.

Por exemplo, ao unir os conceitos “água” e “pontes de hidrogênio”, fica claro que existe algum tipo de relação entre eles, porém, até que alguém de fato explicita essa relação, é impossível avaliar se ela está correta ou incorreta do ponto de vista científico. Uma pessoa que nunca tenha estudado as propriedades da água e as forças intermoleculares possivelmente não seria capaz de unir esses dois conceitos de forma coerente. Durante o processo de construção das suas representações mentais, os alunos podem estabelecer relações incoerentes, confusas, imprecisas, ingênuas ou incorretas segundo o modelo científico mais aceito. Nós professores, no papel de especialistas no tema, não só devemos ser capazes de estabelecer corretamente essa relação, bem como estabelecê-la da forma mais completa e explicativa possível. Veja alguns exemplos:

- água — e as → pontes de hidrogênio (incoerente)
- água — poderia formar → pontes de hidrogênio (impreciso)
- água — possui → pontes de hidrogênio (incorreto)
- água — realiza → pontes de hidrogênio (correto)
- moléculas de água — são atraídas entre si por forças denominadas → pontes de hidrogênio (correto e com alto poder explicativo)

Quando aplicados como ferramenta pedagógica, os MCs abrem a possibilidade de visualizar e rastrear as mudanças na estrutura de conhecimento dos alunos bem como potencializar o processo de atribuição de significado de novos conceitos. Esses benefícios despertaram em mim novas ideias de pesquisa na área de ensino-aprendizagem. No mestrado, argumentei que a potencialidade máxima desse organizador gráfico só poderia ser atingida se os alunos soubessem elaborar bons MCs, ou seja, se fossem devidamente proficientes na técnica

de mapeamento conceitual. A pesquisa que culminou na dissertação¹ ofereceu algumas estratégias para treinar os alunos em sala de aula e um questionário validado para avaliar o conhecimento sobre a técnica. O mestrado, finalizado em meados de 2012, cumpriu seu papel ao permitir que eu aprendesse a fazer pesquisa na área de ciências sociais aplicadas (i.e., Educação) e transformasse minha prática docente.

Durante o ano de 2013 me dediquei a disseminar os resultados de pesquisa² por meio de (1) submissão e publicação de artigos em periódicos de grande estima acadêmica, tais como a *Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências* e a *Revista de Educación de las Ciencias*; (2) publicação de um capítulo de livro internacional pela Springer em colaboração com uma colega de grupo e (3) a participação com apresentação de trabalhos orais em eventos científicos nacionais e internacionais, tais como o IX Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências e a 6th *International Conference on Concept Mapping* (Santos, Brasil). Nesse último, pude participar como membro do comitê científico e do comitê organizador local, sendo este um momento marcante da minha vida pessoal e carreira acadêmica.

O ingresso no doutorado em 2014, com dedicação exclusiva, permitiu conceber e amadurecer um projeto de pesquisa mais amplo e profundo sobre o uso dos MCs como ferramenta de ensino-aprendizagem de Química. Até o momento, eu havia me restringido a pensar no aluno como mapeador (i.e., quem elabora o MC). Entretanto, uma pesquisa publicada em periódico internacional e, apresentada em um dos nossos seminários de grupo, me chamou a atenção para o uso dos MCs elaborados pelo professor/especialista.

Nessa pesquisa³, os autores propuseram o uso de um hipertexto organizado na forma de um MC. Amparados por referenciais teóricos da psicologia cognitiva, eles argumentam que o hipertexto pode causar uma sensação de desorientação no aluno, comprometendo os recursos cognitivos necessários para aprender. Eles compararam o efeito da estrutura do MC (hierárquico ou em rede) e do conhecimento prévio dos participantes (baixo ou alto) na

¹ A dissertação de mestrado pode ser acessada por meio do repositório digital de teses e dissertações da USP em www.teses.usp.br/teses/disponiveis/81/81132/tde.../Joana_Guilares_de_Aguiar.pdf [fev. 18].

² Os resultados de pesquisa mencionados e outros podem ser vistos em Aguiar & Correia (2013, 2014), Correia, Cicuto e Aguiar (2014), Aguiar, Cicuto e Correia (2014), Correia & Aguiar (2014), Rocha et al. (2014), Pereira et al. (2014).

³ Esse estudo, publicado por Amadiou et al. (2009), será apresentado com mais detalhes no Capítulo 1 (Introdução).

desorientação, nos resultados de aprendizagem e na carga cognitiva associada à tarefa. Além disso, eles observam o comportamento de navegação pelo hipertexto utilizando medidas de rastreamento do olhar. De modo geral, eles concluem que os alunos com baixo conhecimento prévio ganharam maior conhecimento factual com menor esforço mental investido e desorientação quando estudaram o hipertexto organizado na forma de um MC hierárquico. Já os alunos com alto conhecimento prévio apresentaram alta tolerância ao MC em rede (i.e., conceitos altamente integrados), tendo baixa desorientação e ganho de conhecimento ao estudar o hipertexto com ambas as estruturas. Apesar de ser uma pesquisa extremamente interessante, a organização do hipertexto não foi feita na forma de MC, identificado pela falta das proposições como unidades semânticas bem como o excesso de informação a ser processada ao clicar em cada conceito do hipertexto.

Inspirados por esses estudos (e outros correlatos) propusemos a pesquisa reportada nesta tese que tem como principal objetivo avaliar a capacidade de algumas estratégias em minimizar a desorientação causada por MCs e, conseqüentemente, potencializar a aprendizagem de conceitos científicos. A tese está organizada em três estudos, os quais verificam o impacto da adição de dicas gráficas, como por exemplo, adição de cores (Estudo I), da estrutura do MC (Estudo II), da adição de recursos digitais (i.e., em um hipertexto) e do conhecimento prévio (Estudo III) nos ganhos de conhecimento e na carga cognitiva associada à tarefa de estudo do MC.

Dois fenômenos macroscópicos (cores nos fogos de artifício e a condução de eletricidade em diferentes materiais), explicados pela adoção e compreensão de modelos atômicos mais recentes (Böhr e o modelo quântico) e interação energia-matéria, foram escolhidos como conteúdo a serem organizados na forma de MCs. Espera-se que ao estudar os MCs, os alunos possam construir ou rever seus esquemas mentais sobre o assunto, fornecendo um ponto de partida para promoção da aprendizagem factual e conceitual sobre o tema. Vale ressaltar que, para nós, o mapeamento conceitual é apenas uma das possíveis ferramentas pedagógicas que podem ser utilizadas em sala de aula e, que o planejamento e a mediação do professor, são fundamentais para promover a aprendizagem significativa ao longo do tempo.

A presente tese foi organizada e dividida em oito capítulos. O Capítulo 1 oferece uma breve introdução em que se delimita o problema de pesquisa e se declara o objetivo, a pergunta de pesquisa e a hipótese de trabalho da tese.

O Capítulo 2 descreve os fundamentos teóricos pautados em teorias cognitivistas, tendo como ponto central a Teoria da Carga Cognitiva de Sweller, a qual é complementada pela Teoria da Aprendizagem Multimídia de Mayer. O acoplamento entre essas duas teorias se configura no referencial teórico adotado nesta tese.

O Capítulo 3 oferece uma revisão dos conceitos científicos necessários para compreender a química dos fogos de artifício e a condução elétrica em diferentes materiais. Dentre os conceitos abordados nesse capítulo podemos citar a evolução dos modelos atômicos, a radiação de corpo negro, a luminescência, o espectro eletromagnético, a ligação metálica, a teoria do orbital molecular, a teoria de bandas, entre outros.

O Capítulo 4 apresenta a metodologia de pesquisa adotada nesta tese. São descritos, em linha gerais, o contexto, os participantes, o cuidado às questões éticas da pesquisa com seres humanos, o delineamento experimental, os instrumentos de pesquisa e os procedimentos de coleta e análise dos dados.

Os Capítulos 5, 6 e 7 apresentam, em detalhes, os Estudos I, II e III, respectivamente. Cada capítulo descreve para um estudo específico, a base lógica teórica que o fundamenta, as perguntas de pesquisa e as hipóteses de trabalho a serem testadas, os materiais e os métodos, os resultados, as discussões e as principais conclusões.

O Capítulo 8 reúne os resultados obtidos com os três estudos, retomando e respondendo à pergunta de pesquisa da tese. Uma subseção desse capítulo apresenta brevemente, alguns/algumas: (1) limitações da pesquisa, (2) implicações práticas ao uso dos MCs em sala de aula e (3) estudos futuros. Para finalizar, são oferecidos os apêndices e a lista de referências em formato APA (*American Psychological Association*).

Os resultados de pesquisa⁴ estão sendo oportunamente divulgados ao longo desses quatro anos destinados ao doutoramento, por meio da (1) submissão e publicação de artigos em periódicos nacionais e internacionais, tais como, a revista *Ciência e Educação* (Bauru), a revista da Graduação da USP – Grad+, a *Chemistry Education Research and Practice* e a *Knowledge Management & E-learning* e, da (2) participação com apresentação de trabalhos orais em eventos científicos nacionais e internacionais, tais como o X Encontro Nacional de Pesquisa

⁴ Os resultados de pesquisa mencionados e outros podem ser vistos em Aguiar & Correia (2015, 2016, 2017), Nascimento, Aguiar & Correia (2015), Vitiello, Aguiar & Correia (2015), Correia & Aguiar (2015, 2017), Correia et al. (2016), Correia, Cabral & Aguiar (2016), Aguiar, Correia & Kinchin (2017).

em Educação em Ciências e a 17th *Biennial Conference of European Association Research on Learning and Instruction* (Tampere, Finlândia).

O interesse do professor Ian Kinchin (Universidade de *Surrey*, Reino Unido) pelos trabalhos realizados pelo nosso grupo de pesquisa e sua proximidade com o orientador permitiram estabelecer uma parceria que ultrapassa, em partes, os limites desta tese.

Desde 2005, o prof. Kinchin se utiliza de entrevistas baseadas em MCs como forma de tornar visível os elementos da *fragilidade pedagógica* (FP) docente. O modelo da FP busca unificar os motivos que levam muitos professores (incluindo os mais experientes) a adotarem uma abordagem tradicional e “segura” durante sua prática pedagógica. Segundo relatado pelo prof. Kinchin, mapear os elementos da FP permitiu estabelecer um diálogo com esses docentes, atuando no desenvolvimento profissional docente e no alinhamento aos valores institucionais. Entretanto, essas entrevistas requerem uma pessoa que seja especialista na técnica de mapeamento conceitual (e técnicas de entrevistas) e que esteja familiarizado com o modelo da FP. Além disso, as entrevistas são longas (aproximadamente 3h) e individualizadas, dificultando a disseminação do modelo em larga-escala.

Pensando nesse problema, propusemos, no último ano do doutorado, um plano de estudos para desenvolver e testar um protótipo de elaboração de MCs por meio de atividades apresentadas no computador para caracterizar uma das dimensões da FP dos docentes. Para conceber esse protótipo, eu utilizei todo um arcabouço teórico e prático adquirido durante a pós-graduação, pautado nos processos cognitivos associados à elaboração de MCs por principiantes na técnica e na adoção de um planejamento instrucional mais eficiente para esse propósito. A contemplação de duas bolsas de estudos sequenciais⁵ permitiu a condução da pesquisa relatada durante um estágio de seis meses junto ao Departamento de Ensino Superior da Universidade de *Surrey*. Os resultados dessa pesquisa⁶ estão sendo oportunamente relatados, com destaque à produção de um capítulo de livro internacional editado pelo prof. Kinchin.

⁵ Uma bolsa da Pró-reitoria de pós-graduação/USP e outra pelo Programa de Doutorado Sanduíche da CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior. O Anexo ao final dessa tese apresenta brevemente o plano de estudos desenvolvido e os principais resultados obtidos durante o estágio no exterior.

⁶ Os resultados dessa parceria podem ser vistos em Aguiar, Kinchin & Correia (2017) e no capítulo de livro Correia & Aguiar (2017). Outros dois artigos internacionais e um artigo nacional estão sendo finalizados e serão submetidos ao longo do primeiro semestre de 2018.

A vivência no meio acadêmico do Reino Unido em um contexto distinto às pesquisas anteriores, despertaram meu interesse por aprofundar os estudos sobre o modelo da FP e o uso dos MCs para a formação profissional de docentes do Ensino Superior, tanto em âmbito individual como institucional. Esse interesse foi formalizado em pedidos de financiamento de pós-doutoramento nas principais agências de fomento e no estabelecimento da minha linha de pesquisa quando do ingresso a carreira docente em uma universidade pública.

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO

O uso dos MCs como material instrucional que organiza conteúdos de Química deve contemplar duas instâncias de planejamento, uma que se relaciona à natureza do conhecimento a ser organizado, com suas particularidades e conceitos próprios e, outra, que se relaciona ao formato pelo qual esse conteúdo será representado. Este capítulo apresenta esses dois pontos em questão, culminando no estabelecimento do objetivo, da pergunta de pesquisa e das hipóteses de trabalho que orientam a pesquisa conduzida nesta tese.

1.1 Ensino e aprendizagem de conceitos químicos

A Química é dominada pelo uso de modelos e modelagem (Gilbert, 1997; Justi & Gilbert, 2000). A elaboração e reformulação de modelos científicos são o mecanismo pelo qual se definem as características, a construção e a socialização do conhecimento científico (Driver et al., 1994; Lima & Nuñez, 2011). Muitas são as definições de modelo, porém, em Química, um modelo pode ser definido como uma “representação parcial de um objeto, evento, processo ou ideia que é produzida com o propósito de facilitar a visualização, fundamentar a elaboração e teste de novas ideias, possibilidade à elaboração de explicações e previsões sobre comportamento e propriedades de um sistema” (Souza, Justi & Ferreira, 2006, p. 7).

Segundo Hodson (1992), aprender Ciências requer que os alunos compreendam o conhecimento científico conceitual, ou seja, que eles conheçam e entendam os principais modelos científicos sobre o tema em estudo, bem como sua abrangência e limitações. Na maioria das vezes, esses modelos científicos são altamente abstratos em natureza, sendo referidos como modelos mentais. Segundo Johnstone (1982; 2000) e corroborado por Treagust, Chittleborough, & Mamiala, (2003), a compreensão conceitual em Química está intimamente relacionada à habilidade de explicar um fenômeno em nível macroscópico, com recursos simbólicos, no plano mental, para compreensão das transformações físicas ou químicas em um nível de maior abstração (i.e., nível submicroscópico). Em outras palavras, durante a manipulação mental do conhecimento científico, os alunos devem ser capazes de articular os

três níveis conceituais, macroscópico, submicroscópico e simbólico (Talanquer, 2011), conforme esquematizado no triângulo da Figura 1 proposto por Johnstone (1993).

Figura 1. Os três níveis conceituais da Química. **Fonte:** a autora, adaptada de Johnstone (1993).

Usualmente, os estudantes vivem e operam dentro da realidade macroscópica da matéria, enquanto químicos e professores de Química operam e transitam mais facilmente entre os níveis conceituais (Johnstone, 1991). Durante a aprendizagem, essa estrutura multirrepresentacional, necessária para compreender o abstrato e o não observável mundo particulado da Química, pode levar os alunos a uma alta demanda cognitiva (Ainsworth, 2006), principalmente para alunos com baixo nível de conhecimento no tema. Como consequência, uma situação de sobrecarga cognitiva poderá ocorrer, ou seja, os recursos cognitivos disponíveis da memória de curto prazo podem ser insuficientes para lidar com o processo de aquisição de conhecimento (Johnstone, 2000).

Para Nahum et al. (2010) fatores externos, tais como uma visão tradicional e simplista de ensino e avaliação também exercem forte influência de como os alunos irão compreender os conteúdos científicos. Para esses autores, essa visão diz respeito a (1) uma abordagem pedagógica tradicional focada no conteúdo disciplinar, configurado pelo uso do livro didático e de uma estrutura curricular pouco flexível e (2) uma metodologia de avaliação que reforça a cobrança desse conteúdo, via, por exemplo, testes de múltipla escolha. Para eles, essa visão levará a adoção de uma abordagem simplista e superficial de ensino, isto é, focada em uma linearidade de conteúdos em vez de uma rede interligada de conhecimento. Consequentemente, haverá a prevalência da adoção, por parte do aluno, de uma aprendizagem superficial ou mecânica (Ausubel, 2000). Esse tipo de abordagem deixa pouco espaço para mudança na estrutura de conhecimento do aluno, refletindo na manutenção de suas concepções errôneas.

A falta de entendimento conceitual dos estudantes é continuamente relatada na literatura usando termos intercambiáveis, tais como, as já citadas, concepções errôneas (*misconceptions*, e.g., Cho, Kahle, & Nordland, 1985; Griffiths & Grant, 1985), as crenças ingênuas (*naive beliefs*, e.g., Caramazza, McCloskey & Green, 1981), as concepções alternativas ou espontâneas (*alternative conceptions*, e.g., Driver & Easley, 1978). Nessa pesquisa, o termo concepção alternativa é usado como sinônimo de concepção errônea, entendido como conhecimentos ou ideias dos alunos, manifestado após exposição a modelos ou teorias formais, que surgem como resultado de confusão ou pensamento não formal e que não estão de acordo com os conceitos científicos, teorias e leis que servem para descrever o mundo em que vivem (Mulford & Robinson, 2002).

As concepções errôneas oferecem obstáculos à adoção de modelos adequados para explicar fenômenos observados na natureza (Justi & Gilbert, 2003). Por exemplo, se o aluno concebe um modelo mental do átomo como uma pequena partícula indivisível e sem carga (compatível com o modelo atômico de Dalton), não é possível que ele compreenda a interação matéria-energia e o seu uso para explicar fenômenos reais, tais como as cores nos fogos de artifício, as pinturas fosforescentes e a condução elétrica em metais.

Os conceitos relacionados à estrutura da matéria, modelos atômicos e ligações químicas são fundamentais na introdução à Química. Entretanto, a literatura aponta inúmeras concepções alternativas dentre estudantes que concluem o Ensino Médio ou mesmo o Ensino Superior (e.g., Melo, 2002). Por exemplo, em Griffiths & Preston (1992), alguns estudantes reportam o átomo como uma entidade viva, com formato e estrutura similares a uma célula. Harrison & Treagust (1996) reportam resultados semelhantes, onde os alunos expressam átomos como células que possuem camadas eletrônicas reais e concretas (em vez de níveis discretos de energia), que isolam e protegem o núcleo. Nos estudos de Gomes & Oliveira (2007), França, Marcondes & Carmo (2009) e Taber (2013), os alunos adotam modelos mentais incompletos ou inadequados, do ponto de vista científico, a respeito da organização do átomo, do papel das partículas subatômicas e da formação de íons.

Na pesquisa de Butts & Smith (1987), os alunos apresentaram dificuldade na compreensão e distinção entre os diferentes tipos de ligações químicas. Dos 26 estudantes do Ensino Médio analisados, dez deles reportaram a presença de moléculas no cloreto de sódio sólido; alguns deles ainda conceituaram que os átomos de sódio e cloro se unem por meio de ligação covalente. Apenas quatro alunos demonstraram um entendimento claro da estrutura

tridimensional cristalina desse sal. Resultados similares foram obtidos por Taber (1997). Em sua maioria, os alunos concebem a ideia de que compostos iônicos e metálicos são de natureza molecular apresentando dificuldades em reconhecer o comportamento elétrico que permite a formação e manutenção das ligações.

Em De Posada (1997) e Taber (1998) os estudantes possuem pouco entendimento sobre a ligação metálica, reportando-a como sendo “inferior” ou mais fraca do que as outras formas de ligação. Em relação às ligações covalentes, muitos estudantes acreditam que o número de elétrons de valência é igual ao número de ligações enquanto outros acham que a ligação covalente envolve transferência de elétrons (e.g., Coll & Taylor, 2001).

No estudo de Peterson, Treagust, & Garnett (1989), os estudantes das séries finais do Ensino Médio possuem uma concepção incorreta de que durante a mudança de estado físico de uma substância, as ligações covalentes são rompidas (em vez das forças intermoleculares). Para Novick & Nussbaum (1978) e Gabel, Samuel, & Hunn, (1987) uma das muitas razões para a dificuldade de compreensão do conceito de ligação química é que, apesar de instruções específicas, os alunos não abandonaram a crença sobre a continuidade da matéria ou adotaram uma visão distorcida sobre o mundo particulado da matéria (e.g., visão estática das partículas).

A pesquisa de Ben-Zvi, Eylon & Silberstein (1986) mostrou que os alunos tendem a atribuir aos átomos as características que são propriedades da substância, por exemplo, se o metal ouro é dourado então os átomos de ouro também devem ser dourados, assim como as moléculas de água devem ser molhadas ou que o sal, em meio aquoso, deveria tornar a solução branca. Por fim, em Taber & Watts (1996) e Taber & Adbo (2013), eles evidenciam a predominância de uma linguagem antropomórfica para explicar ligações ou fenômenos químicos, como, por exemplo, o átomo “querer” elétrons ou um ácido “comer” um tecido.

Diversas pesquisas vêm sendo realizadas para encontrar as melhores formas de potencializar a aprendizagem de conceitos químicos. Por exemplo, Novak (1984) e Nicoll, Francisco, & Nakhleh (2001) ilustram como os MCs são úteis para potencializar a aprendizagem significativa em Química. Já Johnstone (1993) alerta para a importância de se compreender os mecanismos de aprendizagem por meio de teorias cognitivistas e de realizar um planejamento de ensino com métodos adequados à natureza do conhecimento a ser ensinado. Gabel (1999), argumenta que é possível tornar os cursos de Química mais atraentes para os alunos a partir de atividade de resolução de problemas e aprendizagem colaborativa. Em Wu, Krajcik & Soloway (2001) os autores trazem evidências de que usar ferramentas de

visualização durante o ensino de Química baseado em computador traz benefícios à compreensão dos conceitos científicos.

Nesta tese, escolhemos os MCs, elaborados pelo professor, como material instrucional (i.e., de ensino) capazes de potencializar o ganho de conhecimento sobre temas específicos em Química (as cores nos fogos de artifício e a condução elétrica em diferentes materiais – veja Capítulo 3). A próxima seção discute as implicações do mapeamento conceitual com tal propósito.

1.2 Mapas conceituais como material instrucional

Mapas Conceituais (MCs) são organizadores gráficos úteis para tornar explícita a relação entre conceitos por meio de proposições. Os conceitos são imersos em uma rede proposicional que permite processar informações usando texto, isto é, conteúdo semântico, em uma organização visuoespacial (Novak, 2010). Normalmente, os conceitos são hierarquicamente organizados e a rede de proposições responde a uma pergunta focal (Cañas & Novak, 2006).

A falta dos elementos essenciais que caracterizam os bons MCs (Aguilar & Correia, 2013, 2017; Cañas, Novak, & Reiska, 2015), tais como conceitos curtos, proposições com verbos devidamente conjugados, uma hierarquia conceitual bem estabelecida e a pergunta focal declarada, comprometem a qualidade geral do MC e, conseqüentemente, sua capacidade de comunicação (Derbentseva & Kwants, 2014). A elaboração de um MC que seja não só conciso mas também de alto caráter explicativo depende de um período de treinamento na técnica de mapeamento conceitual (Aguilar, 2012), o qual deve preceder seu uso para fins pedagógicos, seja por alunos ou professores (Correia et al., 2016).

Apesar das características dos MCs parecerem estar devidamente estabelecidas, ainda é possível encontrar na literatura da área, o uso de outros organizadores gráficos como material de ensino indevidamente denominados como MCs (veja exemplos na Figura 2, retirado de Amadiou et al., 2009, Safdar et al., 2012, Liu, 2014 e Grimaldi, Poston & Karpicke, 2015).

Figure 2. Organizadores gráficos, utilizados como materiais de ensino em pesquisas, incorretamente denominados como MCs. **Fonte:** Amadiou et al. (2009), Safdar et al. (2012), Liu (2014) e Grimaldi, Poston & Karpicke (2015).

A Figura 3 traz um exemplo das etapas de elaboração de um bom MC a partir de um texto curto sobre o tema “Química Verde” (disponível em <http://www.usp.br/quimicaverde/>; [Jan. 18]). Na Figura 3a é apresentado o texto de base. O primeiro passo para elaboração do MC é selecionar de 15 a 20 conceitos-chave (retângulos vermelhos na Figura 3a), fazendo uma espécie de “estacionamento de conceitos” conforme a Figura 3b. Em seguida, se faz uma organização hierárquica desses conceitos, partindo do conceito mais geral que se detalha

progressivamente em conceitos subordinados a ele (i.e., em níveis hierárquicos mais específicos), como mostrado na Figura 3c.

O próximo passo é realizar a construção da rede de proposições a partir da união de pares de conceitos e um termo de ligação com verbo (e.g., Química Verde — segundo a IUPAC, inventa, desenvolve e aplica → produtos e processos químicos). Na Figura 3d é mostrado o MC final, que já passou por uma revisão de conteúdo e estrutura visual, com a declaração da pergunta focal respondida pela rede proposicional.

Ainda que não exista apenas um único procedimento para elaboração de MCs, espera-se que o MC final apresente as características que o distingam de outros organizadores gráficos e que atendam aos critérios básicos de uma boa qualidade de estrutura visual gráfica e de conteúdo semântico, conforme discutido em Cañas, Novak & Reiska (2015) e Aguiar & Correia (2017).

Na década de 70 e, pautado na Teoria da Aprendizagem Significativa de Ausubel (Ausubel, 2000), Novak e colaboradores desenvolveram os MCs como uma ferramenta capaz de tornar visível o conhecimento dos alunos sobre Biologia e, principalmente, identificar a ocorrência da aprendizagem pela modificação das estruturas de conhecimento desses alunos ao longo do tempo (Novak, 1977; Novak & Musonda, 1991). A partir desse momento, surgiram diversas pesquisas voltadas ao uso dos MCs com os mais diversos propósitos.

QUÍMICA VERDE

A **Química Verde** é definida pela IUPAC como [1]:

"A **invenção, desenvolvimento e aplicação de produtos e processos químicos** para **reduzir ou eliminar o uso e a geração de substâncias perigosas**".

Nessa definição, o termo "**perigosas**" deve ser entendido como **substâncias nocivas** de algum modo à **saúde humana** ou ao **meio ambiente**.

A USEPA e a *American Chemical Society* propuseram **12 princípios** para nortear a **pesquisa** em Química Verde que, fundamentalmente, resumem-se à busca da **redução de rejeitos**, do uso de **materiais e energia**, do **risco**, da **periculosidade** e do **custo de processos** químicos [2].

Alguns **exemplos** de pesquisa em Química Verde são:

- desenvolvimento de **catalisadores**;
- eliminação ou substituição de **solventes**;
- uso de matérias-primas renováveis;
- substituição de produtos tóxicos por outros ambientalmente aceitáveis;
- monitoramento, controle e a intensificação de processos;
- **uso eficiente de energia**;
- melhoria nos processos de separação;
- reagentes e reações intrinsecamente mais seguras.

O objetivo da **Escola de Verão em Química Verde** é proporcionar aos alunos de graduação uma visão geral da Química Verde e sua importância na solução de problemas ambientais.

[1] P. Tundo et al., *Pure Appl. Chem.* 72(7), p.1207–1228, 2000.

[2] P.T. Anastas e J.C. Warner, *Green Chemistry: Theory and Practice*. Oxford University Press:

(a)

Figura 3. Etapas de elaboração de um mapa conceitual a partir de um texto de base (disponível em <http://www.usp.br/quimicaverde/>), considerando (a) a seleção de conceitos-chave, (b) o “estacionamento” de conceitos, (Continua...).

Do que se trata a Química Verde?

Figura 3. (Continuação) (c) a organização hierárquica dos conceitos e o estabelecimento das proposições usando pares de conceitos e um termo de ligação e (d) a revisão da rede proposicional e estabelecimento da pergunta focal. O conceito inicial recebe um destaque e os exemplos ficam em caixas diferentes ou fora de caixas. **Fonte:** a autora.

Ao longo das três últimas décadas, algumas revisões da literatura e meta-análises⁷ já foram conduzidas sobre o uso de MCs na educação. A meta-análise, publicada por Horton et al. (1993), reuniu 18 artigos e dissertações de mestrado, publicados entre 1980 e 1993, de estudos experimentais ou quase-experimentais que apresentavam o efeito do uso dos MCs como material instrucional nos resultados de aprendizagem e atitude dos alunos. A meta-análise, publicada por Nesbit & Adesope (2006), reuniu 122 artigos, dissertações e trabalhos em eventos, publicados entre 1975 e 2005, de estudos experimentais que comparavam o uso de MCs e mapas de conhecimento com outras ferramentas de ensino nas mais diversas situações educacionais. A revisão da literatura, publicada por Stevenson, Hartmeyer & Bentsen (2017), reuniu 17 artigos publicados entre 2006 e 2017, para analisar a potencialidade de tecnologias baseadas em MCs para promover a autorregulação da aprendizagem, limitada ao ensino de ciências em nível básico (fundamental e médio). Nessas revisões, os MCs são relatados como ferramentas capazes de:

- Auxiliar os alunos a aprenderem a aprender (Novak, 1984).
- Ajudar os alunos a se engajarem em uma aprendizagem ativa (e.g., Mayer, 2004; Blunt & Karpicke, 2014).
- Promover a aprendizagem colaborativa ou cooperativa (e.g., Torres & Marriott, 2010).
- Promover maior capacidade de processamento de informação (e.g., Hauser, Nückles, & Renkl 2006).
- Avaliar o conhecimento conceitual dos alunos (e.g., Novak, 2002; Shavelson, Ruiz-Primo, & Wiley, 2005).
- Elucidar a estrutura de um texto, melhorando a capacidade de compreensão de leitura (e.g., Redford et al., 2012).
- Aumentar a capacidade da memória de trabalho durante a leitura de materiais (e.g., Huang et al., 2012).

⁷ A revisão da literatura usa métodos sistemáticos para identificar, selecionar e avaliar criticamente estudos relevantes sobre um tópico de interesse. Já a meta-análise é o método estatístico utilizado na revisão sistemática que integra os resultados dos estudos a fim de aumentar o poder estatístico da pesquisa inicial. Por exemplo, se o tópico de interesse é a potencialidade do uso dos MCs como ferramenta de avaliação em ensino de Ciências, uma revisão da literatura incluiria trabalhos relevantes que fazem uso dos MCs em comparação a outros métodos de avaliação. Já a meta-análise consideraria se os resultados estatísticos de cada um desses trabalhos de fato indicam um efeito positivo do MC nessa comparação. Se a maioria dos trabalhos indicar um efeito positivo do MC, a meta-análise servirá como uma revisão sistemática capaz de reforçar a potencialidade dos MCs considerando as pesquisas da área nessa temática em questão.

Considerando as revisões sistemáticas mencionadas anteriormente, pode-se constatar que a maioria dos estudos descritos envolveu o uso dos MCs como ferramenta de ensino por meio de atividades em que os alunos constroem ou elaboram MCs,⁸ sendo a maioria desses estudos voltados ao ensino de ciências (predominantemente Biologia). Além disso, esses estudos mostram que o uso dos MCs usualmente leva a um aumento do ganho de conhecimento quando comparado a outras formas de instrução e/ou estudo. Em Stensvold & Wilson (1990), por exemplo, os autores reportam que a elaboração de MCs durante atividades de laboratório de química surte efeitos positivos na aprendizagem, principalmente para alunos com baixas habilidades de comunicação verbal. Em Johnstone & Otis (2006) os alunos do curso de Medicina que elaboraram individualmente os MCs durante o estudo, planejamento e revisão sobre determinado cenário clínico tiveram resultados marginalmente melhores na avaliação dos que os alunos que elaboraram o MC em grupo. Infelizmente, a instrução de elaboração dos MCs nesse último estudo induziu os alunos a produzirem um mapa mental⁹ em vez de um MC.

Menor atenção vem sendo despendida para compreender a utilidade dos MCs elaborados pelo professor como material de ensino. Alguns estudos confirmam que os resultados de aprendizagem podem ser potencializados quando os estudantes leem MCs feitos pelo professor em vez de quando os elaboram (e.g., Hwang et al., 2004; Stull & Mayer, 2007; Hagemans, van der Meij & de Jong, 2013).

1.2.1 Mapas conceituais como hipertextos e o problema da desorientação

Considerando a utilidade dos MCs como material de ensino, eles vêm sendo explorados como uma ferramenta capaz de auxiliar na organização de conteúdo na forma de hipertextos, i.e., camadas de conteúdo (na forma de texto ou não) que podem ser acessadas sem uma ordem predefinida a partir de *hyperlinks* contidos no próprio material. Por exemplo, uma página do

⁸ Considerando Nesbit & Adesope (2006), dos 5.818 trabalhos que envolvem o uso de MCs para âmbitos educacionais, 3.160 (54%) deles reportam experimentos em que os alunos os elaboram, onde 1.400 são voltados às Ciências em Geral, Biologia, Ciências Físicas (i.e., não vivos) e Estatística. Já em Horton et al. (1993), dez dos 19 artigos selecionados (52%) reportam a construção de MCs pelos alunos, sendo que desses, apenas um deles envolve o conteúdo de Química (oito em Biologia e um em Ciências Físicas).

⁹ O mapa mental é uma representação gráfica pictórica, de elevado caráter idiossincrático, e essencialmente hierárquico onde obrigatoriamente um conceito central (conceito mãe) se desdobra em conceitos-filhos e netos subordinados a ele. Não há a presença de termos de ligação, nem proposições (Davies, 2011).

Wikipedia na internet pode ser entendida como um hipertexto (Figura 4). Conceitos importantes, marcados em azul em um texto linear, indicam que há um *hiperlink* associado a eles, ao serem clicados levam a outros textos ou vídeos ou imagens.

Figura 4. Exemplo de uma página do Wikipedia sobre Educação que é um hipertexto, i.e., um texto com *hyperlinks*, que levam a outros recursos (texto, vídeos, imagens) ao serem clicados no próprio material. **Fonte:** <https://pt.wikipedia.org/wiki/Educação> [jan.18].

Um outro exemplo de hipertexto utilizando os MCs são os chamados modelos de conhecimento¹⁰ (Cañas, Ford & Coffey, 1994). A Figura 5 mostra várias janelas abertas como o resultado da navegação através de um modelo de conhecimento sobre Marte utilizado pela NASA em seu programa educacional (publicado em Cañas et al., 2004). O MC inicial (mapa “Marte”) é o ponto de entrada para esse hipertexto. Alguns conceitos nesse mapa têm pequenos ícones clicáveis embaixo deles (i.e., um *hiperlink*). Cada um desses ícones pode agrupar diferentes recursos e, ao serem clicados, podem levar a outros MCs, imagens, esquemas, vídeos, textos, páginas da web. Briggs et al. (2004) faz uma descrição detalhada do modelo de conhecimento sobre “Marte” que inclui mais de 100 MCs e mais de 600Mb de recursos digitais, disponíveis no servidor da NASA para navegação e compartilhamento.

¹⁰ No capítulo de livro publicado em Correia, Cicuto, & Aguiar (2014) descrevemos o uso dos modelos de conhecimento para potencializar a aprendizagem colaborativa no ensino da pós-graduação.

Figura 5. Exemplo de um modelo de conhecimento sobre Marte, ou seja, um hipertexto na qual um MC agrupa *hyperlinks* atrelados aos conceitos que, quando clicados, podem levar a outros MCs, imagens, vídeos, textos, sites da web etc. **Fonte:** Cañas et al. (2004) – descrita em detalhes em Briggs et al. (2004).

Ao utilizar um hipertexto como um material de ensino (e.g., Dillon & Gabard, 1998; Unz & Hesse, 1999; Shapiro & Niederhauser, 2004) há um pressuposto de que o aluno saberá definir uma ordem de navegação que seja a mais adequada para o seu nível de conhecimento prévio e que, essa ordem, permitirá que ele recorde informações e construa novos esquemas mentais, levando a um ganho de conhecimento. Os resultados de pesquisa mostram que, sem uma devida orientação de navegação, não é possível verificar melhorias nos resultados de aprendizagem. Por exemplo, em McDonald & Stevenson (1996), os alunos obtiveram melhores resultados de aprendizagem em um texto linear do que em um documento hipermídia hierárquico. Já em Salmerón et al. (2009), o uso dos organizadores gráficos para representar a macroestrutura inicial do texto só gerou maior compreensão no caso de hipertextos difíceis.

Amparados na psicologia cognitiva, os autores explicam que, durante o processamento de informação relevante contida no hipertexto, o aluno pode ser levado à **desorientação**, ou

seja, a um estado psicológico resultante de problemas na construção de caminhos através do hipertexto (Conklin, 1987) e/ou na construção de uma representação mental do espaço físico e conceitual dos hipertextos (Cress & Knabel, 2003). Segundo Schneider (2005) a desorientação pode ser definida como a “incapacidade de estabelecer rapidamente um modelo mental satisfatório, fornecendo uma espécie de estrutura ou esqueleto de conhecimento a ser desenvolvida a partir de mais informações” (p. 200-201; [tradução nossa]).

De modo geral, a desorientação gera uma demanda cognitiva adicional à tarefa, devido a um formato de instrução inadequado (i.e., há um aumento da carga cognitiva extrínseca). A principal consequência da desorientação é a redução dos recursos cognitivos disponíveis na memória de trabalho do aluno que seriam necessários para lidar com o conteúdo (i.e, carga cognitiva intrínseca) e, consequentemente, aprender.

Uma maneira de minimizar a desorientação seria oferecer o conteúdo desse hipertexto organizado na forma de um MC, o qual apresentaria um certo grau de estruturação e guia para a navegação (e.g., Mueller-Kalthoff & Moeller, 2003; Sunawan & Xiong, 2017). Entretanto, os MCs, conforme concebidos por Novak (Cañas & Novak, 2006; Aguiar & Correia, 2013, 2017), também não possuem uma estrutura linear. A necessidade de se estabelecer uma ordem de leitura das proposições, a grande quantidade de informação, a disposição visual dos conceitos em uma rede integrada e sem uma hierarquia definida também podem causar uma sensação de desorientação. Conforme salienta Dias & Sousa (1997) “talvez não seja sensato assumir que um mapa que ajude no desempenho em um contexto espacial também sirva de auxílio em um meio hipermídia sob um modelo não hierárquico” (p. 184; [tradução nossa]).

Algumas pesquisas vêm explorando fatores que parecem ser críticos para a eficiência dos MCs como material de ensino, esteja ou não presente na forma de um hipertexto. Por exemplo, conforme já mencionado, Amadiieu et al. (2009) mostraram que a estrutura do MC influencia diretamente na desorientação dos alunos durante a navegação ou leitura do hipertexto — estruturas hierárquicas causam menos desorientação em relação àquelas em rede, principalmente para alunos com baixo conhecimento prévio. Cangoz & Altun (2012) trouxeram evidências de que estruturas hierárquicas e com apresentação pictórica causaram menor desorientação nos alunos que interagiram com o material em comparação às estruturas em rede e apresentação apenas verbal/textual. Hilbert & Renkl (2009) argumentam que a adição de instruções com recursos digitais potencializa a aprendizagem significativa do conteúdo em estudo, ainda que a carga cognitiva associada à tarefa aumente consideravelmente. Já os estudos de Jeung, Chandler & Sweller (1997) e Aguiar & Correia (2016) indicam que a adição de dicas

gráficas pode oferecer uma orientação que facilita a navegação pelo conteúdo, diminuindo a carga cognitiva imposta durante o estudo ou aumentando os resultados de aprendizagem, respectivamente.

Diante do exposto, é possível perceber uma evidente potencialidade do uso dos MCs como material instrucional, seja sozinho ou na forma de um hipertexto. Entretanto, a possibilidade de ocorrência de desorientação durante a leitura e/ou navegação do MC podem comprometer os resultados de aprendizagem. Sendo assim, a motivação desta tese é centrada na manipulação de diferentes estratégias capazes de minimizar a desorientação provocada pelos MCs que organizam conteúdos de Química e, conseqüentemente, o seu impacto na aprendizagem de conceitos científicos.

1.3 Objetivo, pergunta de pesquisa e hipótese da tese

O objetivo da tese foi avaliar o impacto da adição de dicas gráficas, da hierarquia conceitual, do uso de recursos digitais e do conhecimento prévio dos alunos para minimizar a desorientação causada por MCs utilizados como materiais instrucionais de Química e, conseqüentemente, potencializar a aprendizagem sobre conceitos químicos.

Pergunta de pesquisa da tese

Até que ponto a adição de dicas gráficas, a hierarquia conceitual, o uso de recursos digitais e o conhecimento prévio são fatores capazes de minimizar a desorientação causada por mapas conceituais utilizados como materiais instrucionais de Química e, conseqüentemente, potencializar a aprendizagem?

Hipótese de trabalho da tese

Os alunos que estudarem os MCs com dicas gráficas, em uma estrutura conceitual hierárquica e com recursos digitais (grupo experimental), teriam menor desorientação quando comparados aos alunos que não tiveram acesso a essas estratégias (grupo controle). Conseqüentemente, os alunos no grupo experimental teriam maior desempenho nos resultados de aprendizagem (Hipótese da tese A) e menor esforço mental ou carga cognitiva (Hipótese da tese B) nas tarefas de aprendizagem sobre conceitos químicos do que os alunos no grupo

controle, sendo essas diferenças ainda mais marcantes para os alunos com baixo conhecimento prévio no tema (Hipótese da tese C).

1.4 Organização da tese em estudos

Para responder à pergunta de tese e testar as hipóteses levantadas, a pesquisa foi organizada em três estudos, denominados I, II e III. Essa organização contemplou as seguintes características:

- **Independência:** cada estudo foi conduzido como uma pesquisa independente, contendo seus objetivos, perguntas, hipóteses e procedimentos de pesquisa específicos. Mas, que estavam alinhados aos objetivos e opções metodológicas da tese.
- **Otimização:** as conclusões obtidas ao final de cada estudo serviram de auxílio na preparação do MC a ser usado como material instrucional do estudo subsequente, contemplando a mais alta eficiência de instrução obtida anteriormente.
- **Anual:** cada estudo foi conduzido e finalizado dentro do período de um ano, sendo, portanto, compatível com os quatro anos destinados ao doutoramento. A opção por estudos anuais e independentes também se justifica pela facilidade em reportá-los à comunidade científica.
- **Viabilidade:** cada estudo, conduzido no período de um ano, foi viabilizado por uma sequência de pesquisa que envolveu: a preparação e validação dos materiais nos meses de férias escolares (jan./fev.), a coleta de dados durante os meses iniciais de aulas (abr./mai. – sempre em semestre ímpar devido à característica da disciplina em que ocorreu a coleta), o tratamento e discussão dos resultados obtidos nos meses seguintes (jun./jul./ago.), a dedicação à divulgação científica por meio de apresentação em eventos e manuscritos para submissão em revistas nacionais e internacionais (set./out./nov.) e a confecção e entrega dos relatórios parciais de pesquisa e atividades (dez./jan.).

CAPÍTULO 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A fundamentação teórica que orienta a base lógica por trás dos estudos e subsidia a discussão dos resultados tem como ponto central a Teoria da Carga Cognitiva, complementada pela Teoria da Aprendizagem Multimídia. O meu acoplamento destas duas teorias cognitivistas,¹¹ frente ao contexto da tese, se constitui no referencial teórico adotado nessa pesquisa, o qual auxilia na compreensão dos processos cognitivos envolvidos na aprendizagem e dos princípios instrucionais que guiam a elaboração de materiais de ensino, seja em papel ou em meio digital. Este capítulo buscou trazer as principais definições, pressupostos, modelos e princípios dessas teorias.

Ao contrário das teorias comportamentalistas, as teorias cognitivistas colocam mais ênfase nos fatores internos que levam à aprendizagem do que nos fatores externos (ambientais) ao qual os aprendizes estão sujeitos. Essas teorias buscam explicar o desenvolvimento das estruturas cognitivas, o processo de aquisição de informação e os métodos de mediação entre instrução e aprendizagem. Nesse sentido, alguns pressupostos norteiam a perspectiva cognitivista, como, por exemplo, o papel do aprendiz como um participante ativo do processo de aprendizagem, o qual constrói o significado a partir da instrução (sendo, portanto, um pressuposto compatível com a perspectiva construtivista de aprendizagem). Além disso, as teorias cognitivistas buscam explicar a aprendizagem em termos de processos cognitivos, baseado em uma arquitetura cognitiva humana e seus sistemas de memórias.

2.1 Teoria da Carga Cognitiva

A Teoria da Carga Cognitiva (TCC), proposta por John Sweller no final da década de 1980 (Sweller, 1988), vem sendo adotada como um panorama para a investigação sobre os

¹¹ Outras teorias e modelos cognitivistas enriquecem o referencial teórico adotado nessa pesquisa, tais como a Teoria da Aprendizagem Significativa de Ausubel, a Teoria dos Esquemas de Piaget e Bartlett, o modelo de processamento de informação por multicomponentes da memória de trabalho de Baddley e a Teoria da Dupla Codificação de Paivio.

processos cognitivos durante a aprendizagem e princípios instrucionais para elaboração de materiais de ensino (Sweller, 1989, 1994; de Jong, 2010; Mayer, 2010; Moreno, 2010).

2.1.1 Processamento, aquisição e recuperação de informações

A TCC considera que a arquitetura cognitiva humana é formada por três sistemas de memória (sensorial, de trabalho e longo prazo) que atuam em conjunto durante o processamento, aquisição e recuperação de informação (Figura 6).

A **memória sensorial** (MS) é definida como um conjunto de cinco subsistemas de memórias que processam, simultaneamente, os principais estímulos provenientes do ambiente, capturados pela visão, audição, tato, olfato e gustação. Esses estímulos são, então, transferidos à memória de trabalho.

A **memória de trabalho** (MT) é definida como o local onde ocorre o processo cognitivo consciente, ou seja, a memória de curto prazo. Ela é limitada, pois sozinha permite apenas o processamento de informações triviais e mais importantes durante a aquisição de informação. Segundo Miller (1956), a MT só é capaz de reter de cinco a nove **elementos de informação**¹² e não mais do que dois a quatro elementos simultaneamente (coincidindo com o conhecido “número mágico” de Miller 7 ± 2). Isso ocorre, pois, quando se trata de uma nova informação, o número de elementos que devem ser organizados na MT aumenta linearmente, bem como o número de interações e combinações possíveis aumentam exponencialmente. Portanto, a MT

¹² Os elementos de informação (em inglês *bits*), são estímulos sensoriais provenientes do ambiente, que após seleção pela MS são transferidos à MT. Na MT, esses *bits* se combinam para formar *chunks* de informação (i.e., agrupamento de *bits*). Se esses *chunks* forem codificados (i.e., receberem um significado), são transferidos à MLP em um esquema (Kleinberg & Kaufman, 1971). Por exemplo, os números de telefone. Associar aleatoriamente nove dígitos não tem nenhum significado. Nesse caso, cada dígito é um *bit* de informação que se processado separadamente custará muito para ser aprendido (possivelmente ele será decorado e esquecido rapidamente). Mas, ao associar nove dígitos para formar o seu número de telefone, teremos um *chunk* de informação, o qual, tendo um significado para você, será guardado na MLP. Ao perguntarem o seu número você automaticamente ‘recita’ ele em uma cadência e não aleatoriamente. Um outro exemplo é ao olhar para um carro passando na rua. Nesse caso, não é possível processar todas as informações disponíveis no ambiente. Apenas alguns *bits* de informação serão capturados pela MS e transferidos à MT, tais como a cor, o modelo, as características do passageiro e a velocidade. Outros *bits* serão simplesmente ignorados por uma atenção seletiva, tais como, a placa do carro, a presença de uma lâmpada queimada, a marca dos pneus. Se você, por exemplo, estiver interessado em comprar aquele carro é possível que você seja capaz de vê-lo mais vezes na rua, uma vez que a sua atenção está voltada a esse objeto devido à sua motivação.

tem capacidade insuficiente para suportar a explosão combinatória sobre a interatividade entre elementos. Durante uma tarefa ou resolução de um problema, a atenção do sujeito é seletiva, ou seja, captura estímulos relevantes para aquela situação, de modo a minimizar o impacto de múltiplas informações em uma MT limitada em espaço e tempo.

Segundo o modelo de processamento de informação proposto por Baddeley (1988), a MT é formada por multicomponentes capazes de processar informações múltiplas e simultâneas. Baseado na Teoria da Dupla Codificação (Paivio, 1990), a MT é formada por dois subsistemas que processam, simultaneamente, as informações visuoespaciais (e.g., textos e diagramas) e as informações fonológicas (e.g., sons e narração). O armazenamento episódico conecta as informações visuais, espaciais, verbais processadas por esses dois subsistemas guardando-os momentaneamente na MT. Se os múltiplos elementos dessa nova informação se combinarem formando um único elemento cognitivo (i.e., a codificação), diz-se que houve a **construção de um esquema**, o qual é transferido à memória de longo prazo (Sweller, Ayres & Kalyuga, 2011).

A **memória de longo prazo** (MLP) é definida como o local que armazena incontáveis esquemas transferidos da MT. Ela é ilimitada em tamanho, espaço e tempo (Paas, Renkl & Sweller, 2004), ou seja, armazena múltiplos esquemas quase permanentemente, criando uma espécie de rede que os interconecta. Essa rede, que é altamente organizada e hierárquica, é também conhecida como o conhecimento prévio que um sujeito possui sobre determinado assunto.

A Teoria do Esquema, proposta muitos anos antes da TCC, já explicava o processo de aquisição de informação por meio da construção de esquemas (e.g., Piaget, 1928; Bartlett, 1932). Os esquemas são feitos de importantes atributos, propósitos e regras os quais definem o uso de unidades conceituais (i.e., conceitos). Por exemplo, o conceito de “manga” pode estar presente tanto nos esquemas mentais que um sujeito possui sobre “frutas” como sobre “roupas”, porém, esses esquemas terão características totalmente distintas, o que faz com que um mesmo conceito represente entidades (nesse caso, concretas) com propósitos diferentes e que só podem ser usados mediante determinada regra.

Figura 6. Três sistemas de memória (MS, MT e MLP) que compõem a arquitetura cognitiva humana responsáveis pelo processamento, aquisição e recuperação de informações.
Fonte: a autora.

Na MLP, as unidades conceituais são organizadas na forma de uma rede semântica, a qual representa a estrutura cognitiva de um sujeito sobre um determinado assunto. Essa estrutura é formada pela combinação de vários modelos mentais (i.e., representações da realidade) e *esquematas* (i.e., conceitos e suas conexões). Como os conceitos estão hierarquicamente organizados nos modelos mentais, a rede semântica também o será. Por exemplo, o conceito de “cachorro” é diferente do conceito de “lobo”, bem como suas conexões – cachorro pode se conectar com casa, doméstico, bravo, segurança, já lobo pode se conectar com floresta, silvestre, matilha, caça. Os esquemas mentais (imagens, sons, cheiros associados a esses conceitos) que um sujeito tem sobre ambos os conceitos também serão diferentes, porém, como eles possuem características e atributos semelhantes (e.g., ambos são animais, peludos, com cauda, tem olfato aguçado etc.) é possível que uma criança que ainda esteja aprendendo sobre mamíferos, acione o conceito de cachorro para se referir a um lobo. Além disso, os conceitos de lobo e cachorro estarão dentro de uma mesma rede semântica, hierarquicamente organizada em, por exemplo, Animais → Mamíferos → Quadrúpedes → Carnívoros → Espécie Canina.¹³ Tanto a capacidade de conexão entre conceitos, como o acionamento dos esquemas e modelos mentais mais adequados para determinado momento serão definidos pelos elementos presentes na rede de conhecimento prévio do sujeito (i.e., na sua estrutura cognitiva).

Diante de uma nova tarefa, o sujeito recupera da MLP para a MT os esquemas necessários para solucionar o problema ou lidar com a própria tarefa (i.e., lidar com conteúdo e com o formato da instrução). Em um primeiro momento, há um custo ou carga cognitiva imposta tanto para a recuperação desses esquemas como para promover a interação e integração desse conhecimento prévio com a nova informação na MT. Após múltiplas repetições, é possível dizer que houve uma **automação ou automatização dos esquemas**, ou seja, os recursos cognitivos da MT não são mais utilizados para recuperar tais esquemas da MLP.

¹³ Cientificamente, os cães domésticos pertencem ao Reino *Animalia*, Filo *Chordata*, Classe *Mammalia*, Ordem *Carnivora*, Família *Canidae*, Gênero *Canis*, Espécie *Canis lupus*, Subespécie *Canis lupus familiaris*. Já os lobos pertencem ao mesmo Reino, Filo, Classe, Ordem e Família dos cães, se diferenciando apenas nas espécies e subespécies.

Esquemas automatizados¹⁴ implicam em maiores chances de aprendizagem significativa uma vez que há mais recursos disponíveis para codificar novas informações a partir do acionamento de conhecimentos prévios. Para a TCC, a diferença entre um novato e um especialista, é que o último é capaz de acessar rapidamente e sem custo os esquemas mais relevantes para solucionar um problema.

Segundo Paas (1992), o processamento de informações que leva à construção e automação de esquemas na MT pode ser entendido como o próprio processo de **aprendizagem**, o qual leva à retenção e/ou à transferência. A retenção da informação ocorre quando o sujeito é capaz de manipular os esquemas recuperados da MLP na MT para lidar com uma tarefa semelhante àquela em que ocorreu a aprendizagem, indicando que houve uma efetiva integração dos novos esquemas sobre o assunto em questão à rede de conhecimento prévio. Já a transferência ocorre quando o sujeito é capaz de recuperar e manipular um esquema específico para lidar com uma tarefa diferente daquela em que ocorreu a aprendizagem, indicado por maior habilidade e desempenho na tarefa, mesmo que após longos períodos de tempo.

Pressupostos semelhantes podem também ser encontrados na Teoria da Aprendizagem Significativa de Ausubel (2000). Segundo Ausubel, o conhecimento é hierarquicamente organizado na estrutura cognitiva do aprendiz por meio de conceitos e proposições. Os conceitos são objetos, acontecimentos, situações ou propriedades que possuem atributos específicos e que são designados pelo mesmo signo ou rótulo. Já as proposições são as conexões entre esses conceitos, hierarquicamente estabelecidas (i.e., um conceito sempre se conecta a outros conceitos superordenados ou subordinados a ele).

Para Ausubel, o processo de aprendizagem se encontra entre dois extremos: a aprendizagem mecânica ou memorização e a aprendizagem significativa. A aprendizagem mecânica é caracterizada pelo estabelecimento de relações arbitrárias e literais entre os conhecimentos prévios e a nova informação. Havendo pouco esforço para criar sentido ao

¹⁴ De acordo com a TCC, a automação ou automatização de esquemas ocorre quando o sujeito é capaz de recuperar informação previamente codificadas e organizadas na MLP sem custo ou esforço cognitivo algum à MT. Um esquema automatizado, ao ser recuperado sem custo à MT, não requererá recursos cognitivos, permitindo uma maior liberação de espaço na MT destinado para aprender. Consequentemente, esquemas automatizadas aumentam a chance de ocorrência de aprendizagem significativa. Por exemplo, um especialista em xadrez deixa de ser um novato ao acumular uma gama de múltiplos movimentos de peças disponíveis em sua MLP no momento do jogo. Ao recuperar facilmente esses movimentos à MT no momento exato para solucionar um problema faz com que ele seja diferente do novato, que ainda precisa solucionar o problema e aprender com a situação. Vale ressaltar que a automação ou automatização não implica em aprendizagem mecânica ou memorização.

relacioná-los, a nova informação pode ser esquecida após curto período de tempo, sendo difícil utilizá-la em um novo contexto (i.e., não há retenção do conhecimento). A aprendizagem significativa ocorre quando o sujeito age intencionalmente para criar significado entre o conhecimento prévio e a nova informação, transformando a estrutura de conhecimento inicial. Essa transformação causada pela nova informação é conhecida como obliteração (i.e., construção de esquemas na TCC) e leva à retenção do conhecimento. A aprendizagem significativa leva à transferência do conhecimento, ou seja, na sua aplicação em outros contextos, mesmo após um longo período de tempo (Moreira, 1998; Mayer, 2002).

Além disso, Ausubel defende o uso de organizadores prévios como um mecanismo pedagógico que medeia a implementação desses princípios na prática, estabelecendo uma ligação entre o que o aprendiz já sabe e aquilo que ele precisa saber (Moreira, 2006). Esse organizador possui conceitos gerais e conexões que são relevantes para o desempenho da tarefa (i.e., subsunçores) ao mesmo tempo em que fornecem subsídios para que os alunos recuperem conceitos prévios (i.e., ideias “ancoradas” na estrutura cognitiva prévia do aprendiz).

2.1.2 As cargas cognitivas impostas à memória de trabalho durante a tarefa

A TCC distingue dois tipos de cargas cognitivas (CGs) capazes de interferir no processamento de informações pela MT durante a aprendizagem (Sweller, Ayres, & Kalyuga, 2011): a CG intrínseca e a CG extrínseca.

A **CG intrínseca** se refere à natureza, complexidade e dificuldade do conteúdo ao qual o aluno precisa lidar durante a tarefa de aprendizagem. Ela é definida em função da quantidade de elementos (poucos ou muitos) a serem processados na MT e a interatividade entre eles (baixa ou alta). Quanto maior a quantidade de elementos e maior a interatividade entre eles, mais complexo e difícil é considerado o conteúdo. Por exemplo, na tarefa de ensinar uma segunda língua, a aprendizagem de conceitos em um dicionário é considerada de baixa complexidade, pois aprende-se uma palavra por vez isoladamente. Já a tarefa de aprender a gramática dessa língua é considerada de alta complexidade, pois é necessário combinar sujeito + ação + complemento, sendo que eles podem ser substantivos, pronomes, verbos, adjetivos, advérbios etc., que colocados em uma certa ordem comunicam uma mensagem.

A **CG extrínseca** se refere ao formato da instrução. Quanto mais inadequado for o formato da instrução maior a carga extrínseca. De acordo com a TCC, essa carga prejudica o

processo de aprendizagem, devendo ser manipulada de modo a torná-la a mais baixo possível. Por exemplo, na tarefa de aprender o que é um quadrado, ao fornecer uma instrução apenas verbal resultaria em um aumento da CG extrínseca, uma vez que o aluno deve construir mentalmente a imagem de um quadrado enquanto processa a explicação no canal fonológico. Já oferecer a imagem de um quadrado associada à informação verbal deverá diminuir essa carga e potencializar o processo de aquisição de informação.

Em pesquisa conduzida por Carlson, Chandler & Sweller (2003), os autores manipulam ambas as CGs durante a tarefa de construção de modelos moleculares (Figura 7), mostrando como a combinação entre as CGs intrínseca e extrínseca influencia diretamente na compreensão dos alunos sobre o assunto e, conseqüentemente, no seu desempenho nos testes de retenção e transferência. Eles manipularam a CG intrínseca solicitando que os alunos construíssem modelos com baixa ou alta interatividade entre elementos. No caso, a construção do modelo do ácido clorídrico apresentava baixa CG intrínseca uma vez que há apenas dois átomos e uma só possível combinação entre esses elementos. Já a construção do modelo do ácido carbônico apresentava alta CG intrínseca, pois requeria a manipulação de seis átomos de três elementos químicos diferentes, em uma combinação específica com ligações simples ou duplas e geometria definida. Eles também manipularam a CG extrínseca, alterando o formato da instrução da tarefa. No caso, poderia ser feita via textual ou diagramática.

No primeiro experimento (coleta de dados em condições controladas), eles mostraram que o formato de instrução diagramático só auxiliou nos casos em que havia alta interatividade entre elementos. No segundo experimento (coleta de dados em condições de sala de aula), eles mostraram que o desempenho dos alunos que receberam a instrução diagramática só foi significativamente maior apenas nos aspectos que envolviam alta interatividade entre elementos. Em outras palavras, ao aumentar a CG intrínseca não sobrou recursos cognitivos para que os alunos lidassem com a CG extrínseca, passando a ser prejudicial ao processo de aprendizagem. Já nos casos em que a CG intrínseca era baixa, os alunos foram capazes de lidar com um formato de instrução inadequado, ou seja, com uma CG extrínseca alta.

Se considerarmos puramente os pressupostos da TCC (Sweller, Ayres & Kalyuga, 2011), é possível incluir uma terceira CG imposta à MT durante a aprendizagem, denominada CG pertinente ou relevante. Para eles, essa é a carga imposta para a condução do próprio processo de construção de esquemas. Entretanto, estudos que criticam alguns aspectos teóricos, metodológicos e práticos da TCC (e.g., de Jong, 2010; Moreno, 2010) afirmam que não se trata de uma carga e sim de um **processamento generativo**, ou seja, de que a construção de

esquemas é o resultado de processos cognitivos generativos, tais como interpretação, exemplificação, classificação, diferenciação e organização que levam à aprendizagem efetiva.

MENOR CARGA EXTRÍNSECA	<p style="text-align: center;">MENOR CARGA INTRÍNSECA</p> <p style="text-align: center;">FAÇA O MODELO DO HCl</p> <p style="text-align: center;">Esse é o modelo para a molécula de ácido clorídrico</p>	<p style="text-align: center;">MAIOR CARGA INTRÍNSECA</p> <p style="text-align: center;">FAÇA O MODELO DO H_2CO_3</p> <p style="text-align: center;">Esse é o modelo para a molécula de ácido carbônico</p>
	<p style="text-align: center;">FAÇA O MODELO DO HCl</p> <p style="text-align: center;">Junte uma esfera branca pequena de hidrogênio com uma esfera verde de cloro usando uma haste branca fixa.</p> <p style="text-align: center;">Esse é o modelo para a molécula de ácido clorídrico</p>	<p style="text-align: center;">FAÇA O MODELO DO H_2CO_3</p> <p>Junte uma esfera azul de oxigênio com uma esfera preta de carbono usando uma haste branca reta. Na mesma esfera preta, junte outra esfera azul de oxigênio com uma haste branca reta. Una outra esfera azul de oxigênio com a esfera preta de carbono usando agora duas hastes brancas curvas. Selecione uma das esferas azuis de oxigênio que só tem uma haste branca ligada a ela. Ligue-a com uma esfera branca pequena de hidrogênio utilizando uma haste branca fixa. Por fim, ligue a outra esfera azul de oxigênio que também só tem uma haste branca ligada a ela e junte com a esfera branca pequena de hidrogênio utilizando a haste branca reta.</p> <p style="text-align: center;">Esse é o modelo para a molécula de ácido carbônico</p>
MAIOR CARGA EXTRÍNSECA		

Figura 7. Exemplo de como as cargas cognitivas associadas a um material instrucional variam em função da interatividade entre elementos (baixa no modelo HCl e alta no modelo H_2CO_3) e do formato de instrução (inadequado de forma textual e adequado de forma diagramática). **Fonte:** baseada em Carlson, Chandler & Sweller (2003).

Nessa tese consideraremos essa visão, de que existem apenas duas CGs, uma relativa ao conteúdo e outra relativa ao formato da instrução. Essa visão modifica ainda a forma como entendemos o processo de **sobrecarga cognitiva** da MT.¹⁵ De acordo com os pesquisadores

¹⁵ A TCC considera que a CG intrínseca se soma à CG pertinente e, ambas, contribuem para a aprendizagem. Enquanto isso, a CG extrínseca prejudica a aprendizagem e deve ser a menor possível. Se a CG extrínseca for baixa, sobra espaço na MT para lidar com as duas CGs associadas à aprendizagem, resultando em bons desempenhos na tarefa. Alguns conflitos são encontrados na literatura que comprometem esse paradigma.

que criticam a TCC, ambas as CGs intrínseca e extrínseca são aditivas e, ao se somarem, não podem ultrapassar a capacidade limitada da MT. Quando essa capacidade é ultrapassada, afirma-se que o sujeito entrou em sobrecarga ou seja, não sobram recursos cognitivos disponíveis na MT para ocorrência dos processamentos generativos (Figura 8a). Consequentemente, o sujeito não é capaz de construir ou rever seus esquemas mentais durante a tarefa. A gestão de CG intrínseca (Figura 8b) e a diminuição da CG extrínseca (Figura 8c) são duas manipulações instrucionais que permitem aumentar a disponibilidade de recursos cognitivos na MT que podem ser ocupadas pelo processamento generativo. O maior indicativo da ocorrência da sobrecarga cognitiva são os baixos desempenhos nos testes de retenção e transferência.

Figura 8. Propriedade aditiva das CGs que ocupam a limitada MT. Quando as CGs excedem a MT ocorre a sobrecarga cognitiva (a). A sua prevenção é crítica e deve ser feita através de estratégias que impliquem na (b) gestão da CG intrínseca e/ou (c) diminuição da CG extrínseca. Em ambas as situações, espera-se que o processamento generativo seja otimizado, melhorando os resultados de aprendizagem. **Fonte:** adaptada de Sweller, Ayres, & Kalyuga, 2011.

Por exemplo, segundo a TCC, a CG pertinente sempre auxilia no processo de aprendizagem, porém, relatos da literatura indicam que se os processos cognitivos durante a aprendizagem forem muito maiores dos recursos disponíveis do aluno (e.g., alunos com baixo conhecimento prévio), essa carga pode ser tão alta que prejudica a aprendizagem. Os críticos afirmam então que, nesse caso, a CG pertinente se transformou em CG extrínseca, mostrando que há um conflito teórico não resolvido. Outro problema que existe, por exemplo, é que dependendo do nível de conhecimento prévio dos sujeitos, alguns formatos de instrução podem levar tanto a gerar CG extrínseca como CG pertinente. Novamente, parece não haver uma definição clara de como reconhecer (e medir experimentalmente) cada uma dessas cargas. Isso foi resolvido, propondo-se que só existem duas cargas, uma relativa ao conteúdo e outra relativa ao formato da instrução. O sujeito precisa lidar com ambas durante a tarefa e o balanço entre elas definirá se há espaço para os processamentos generativos ou não.

2.1.3 O planejamento instrucional como um fator crítico para promover a aprendizagem

O **planejamento instrucional** se refere ao “processo sistemático e reflexivo de transpor princípios da aprendizagem e instrução durante o planejamento de materiais de ensino, atividades, recursos e avaliação” (Smith & Ragan, 1999, p.2). Esse planejamento pode ser feito considerando diferentes teorias da aprendizagem e instrução, bem como diferentes modelos, metodologias e procedimentos.

Ao considerar os pressupostos da TCC, o planejamento instrucional deverá seguir três princípios gerais, baseados na (1) gestão da CG intrínseca, (2) diminuição da CG extrínseca e (3) otimização dos processamentos generativos, sempre com o objetivo de evitar situações de sobrecarga cognitiva e garantir os melhores resultados de aprendizagem. Os procedimentos de instrução (i.e., como o material instrucional deverá ser elaborado) gerados pela TC partem de uma demonstração experimental que traz evidências empíricas de que o procedimento baseado nos princípios da teoria de fato facilita a aprendizagem ou a resolução de problemas quando comparado a um procedimento mais tradicional. Esses procedimentos baseados em dados empíricos são denominados **efeitos de CG**. Por exemplo, uma das diretrizes indicadas pela TCC é o efeito da atenção dividida (do inglês, *split-attention effect*). Esse efeito recomenda que múltiplas Fontes de informação espalhadas pelo material, no espaço e/ou tempo, sejam integradas como um único elemento (veja exemplo com uma representação do ciclo do carbono na Figura 9). A integração dessas informações é relatada na literatura como capaz de reduzir a CG extrínseca, uma vez que o sujeito não precisa integrá-las na MT durante a tarefa (Kalyuga, Chandler & Sweller, 1999).

A Tabela 1 descreve e exemplifica algumas outras estratégias instrucionais, descritas na literatura, que são eficazes para a diminuição da CG extrínseca, a gestão da CG intrínseca e a otimização dos processamentos generativos.

Material instrucional não-integrado
(Alta CG extrínseca devido ao efeito da atenção dividida)

Material instrucional integrado
(Menor CG extrínseca, pois evitou o efeito da atenção dividida)

Figura 9. Dois materiais instrucionais iguais elaborados sobre o ciclo do carbono. O material da direita evitou o efeito da atenção dividida ao integrar imagem e texto, diminuindo a CG extrínseca em relação ao material não integrado. **Fonte:** adaptada de Usberco & Salvado (2002, p.455).

Tabela 1. Descrição e exemplo de alguns efeitos baseados na TCC que guiam estratégias instrucionais para diminuir a CG extrínseca, fazer a gestão da CG intrínseca e otimizar processamentos generativos.

ESTRATÉGIAS INSTRUCIONAIS	DESCRIÇÃO	EXEMPLO (Química)
Diminuir a CG extrínseca		
[1] Efeito do objetivo livre (Goal-free effect)	Substitua tarefas convencionais por aquelas que requerem dos alunos um objetivo amplo e não específico.	Pergunte aos alunos “Por favor, liste tantas evidências quanto possível que possam estar relacionadas a essas reações químicas”, em vez de perguntar “Qual é a reação química que está ocorrendo quando há esse tipo de evidência?”
[2] Efeito do exemplo trabalhado (Worked-example effect)	Substitua tarefas convencionais por exemplos trabalhados que fornecem uma solução completa onde os alunos devam estudar cuidadosamente os passos para resolução.	Deixe os alunos criticarem um relatório experimental pronto, em vez de fazê-los gerar de maneira independente um relatório.
Gestão da CG intrínseca		
[3] Efeito do simples-ao-complexo (Simple-to-complex effect)	Substitua uma série de tarefas convencionais por aquelas que apresente primeiro apenas elementos isolados e, depois, gradualmente aumente até a totalidade de sua complexidade.	Dê aos alunos tarefas que exijam a aplicação de princípios básicos de proporção e porcentagem antes de dar-lhes exercícios de estequiometria.
[4] Efeito da baixa-a-alta fidelidade (Low-to-high fidelity effect)	Substitua uma série de tarefas convencionais por tarefas que são executadas pela primeira vez em um ambiente de baixa fidelidade (baixa interatividade dos elementos) e, em seguida, ambientes cada vez mais fidelizados.	Ao ensinar aos alunos sobre pH, comece com descrições textuais sobre ácidos e bases, depois faça testes com simulações digitais, continue com práticas de laboratório e termine com casos reais e verídicos.
Otimizar processamentos generativos		
[5] Efeito da auto-explicação (self-explanation effect)	Substitua exemplos trabalhados por tarefas enriquecidas contendo instruções onde se pergunte aos alunos para autoexplicar a informação fornecida ao resolver o problema.	Para os alunos que estão aprendendo como determinar a voltagem de uma pilha eletroquímica, apresente uma animação e peça que eles expliquem os componentes (semicelas, eletrodos, ponte salina), os processos (de fluxo de elétrons e íons) e as semirreações.
[6] Efeito da variabilidade (variability effect)	Substitua uma série de tarefas com características superficiais e semelhantes por uma série de tarefas que diferem umas das outras onde a variabilidade ocorra em todas as dimensões do mundo real.	Ao descrever os efeitos da radioatividade no corpo humano, enriqueça os exemplos variando as características dos acidentes, as pessoas, os locais, o tempo de exposição.

Fonte: a autora, baseada em Plass, Moreno & Brünken (2010); Sweller, Ayres & Kalyuga (2011).

2.2 Teoria Cognitiva da Aprendizagem Multimídia

A Teoria cognitiva da Aprendizagem Multimídia (TAM) proposta por Richard Mayer, define aprendizagem multimídia como sendo a capacidade de aprender utilizando materiais de ensino que agregam duas fontes de informação, as palavras, que podem ser escritas ou narradas, e imagens, que podem ser estáticas (e.g., ilustrações, gráficos, fotos, mapas, diagramas) ou dinâmicas (e.g., animações, vídeos, ilustrações interativas). Segundo essa teoria (e baseada em resultados empíricos), as pessoas aprendem mais quando o material fornece ambas as informações (palavras e imagens) simultaneamente – a denominando de Princípio Multimídia. Em linhas gerais, a TAM se baseia em três pressupostos:

- Que o ser humano processa simultaneamente um material pictórico (imagem) e verbal (texto ou narração) em canais separados da MT (**pressuposto do duplo canal**).
- Que cada canal é limitado em capacidade de processamento de informação, só sendo possível processar uma fonte de informação por vez em cada canal (**pressuposto da capacidade limitada**).
- Que a aprendizagem significativa envolve um processamento cognitivo em que o sujeito age intencionalmente na construção de conexões entre as informações pictóricas e verbais (**pressuposto do processamento ativo**).

O primeiro pressuposto modifica, na essência, o paradigma dos múltiplos sistemas definido por Baddeley (1988), em que a MT processa simultaneamente, mas em sistemas separados, as informações visuoespaciais (e.g., textos e diagramas) e as informações fonológicas (e.g., sons e narração). Para a TAM, a narração é considerada uma fonte de informação verbal, assim como o texto escrito e, portanto, são processados no mesmo canal. Assim como os diagramas são processados pelo canal pictórico e não pelo sistema visuoespacial, conforme previsto no modelo de Baddeley. Para essa teoria não há uma central executiva responsável por unir essas informações na MT, elas seriam processadas simultaneamente e integradas em um único esquema. Como é possível perceber, o pressuposto do duplo canal (verbal/pictórico) difere do paradigma da dupla codificação (visuoespacial/fonológico) de Paivio (1990), ainda que a TAM tenha se baseado nesses princípios para expandir suas ideias. A Figura 10 apresenta um esquema para representar como ocorre esse processamento de informação segundo a TAM.

Figura 10. Processamento de informação segundo a Teoria cognitiva da Aprendizagem Multimídia. **Fonte:** traduzida e adaptada de Mayer & Moreno (2003).

O segundo pressuposto corrobora com aquele já apresentado pela TCC. O processamento de informação simultâneo via duplo canal ocorre na MT, que é limitada em capacidade. O processamento, aquisição e manipulação de informações que levam à construção e automação de esquemas ditados pela TCC foram incorporados pela TAM, porém, as CGs impostas pelo material de ensino agora são denominadas **demandas cognitivas**.

O terceiro pressuposto vai de encontro a Teoria da Aprendizagem Ativa, também de Mayer (1999; 2002). Para a TAM, aprender implica no processo intencional e ativo por parte do sujeito, requerendo a (1) atenção ao material apresentado, (2) organização mental das informações em uma estrutura coerente e (3) integração das novas informações aos conhecimentos prévios já existentes. Essa ideia é similar a uma das condições para ocorrência da aprendizagem significativa apresentada na Teoria da Aprendizagem Significativa de Ausubel (2000), em que o aluno deve intencionalmente escolher aprender significativamente.

2.2.1 Demandas cognitivas impostas na tarefa, situações de sobrecarga cognitiva e como evitá-las

Três tipos de demandas cognitivas (i.e., processamento de informação pela MT) são impostos durante a tarefa:

- **Processamento essencial:** destinado à atribuição de significado ao material apresentado, incluindo seleção, organização e integração de palavras e imagens (similar à CG pertinente da TCC).
- **Processamento incidental:** destinado aos aspectos que não são essenciais para a condução da tarefa (similar à CG extrínseca da TCC).
- **Manutenção representacional:** destinada a manter as representações verbais e visuais na MT como um todo coerente (similar à CG pertinente da TCC).

Da mesma forma que a TCC, a TAM prevê uma situação de sobrecarga cognitiva. Entretanto, ela pode ocorrer devido a uma série de combinações possíveis entre um excesso de processamento essencial e/ou incidental e/ou para manutenção representacional em apenas um canal ou ambos os canais de processamento de informação. A constituição de diferentes cenários que podem levar à sobrecarga cognitiva em ambientes multimídia expande a discussão iniciada pela TCC.

A aprendizagem significativa requer grande quantidade de processamento essencial e manutenção representacional, mas a MT é severamente limitada em sua capacidade, principalmente para alunos com baixo nível de conhecimento prévio no tema. Portanto, um dos maiores desafios de quem planeja o ensino é manter o processamento incidental o mais baixo possível e preparar um material instrucional que destaque apenas os elementos essenciais que precisam ser integrados para promover esse tipo de aprendizagem. Baseada em dados empíricos, a TAM propõe alguns efeitos da demanda cognitiva à aprendizagem. Cada um desses efeitos gerou princípios, no qual o material instrucional deve ser preparado.

Por exemplo, quando o aluno é sobrecarregado com processamento essencial no canal visual, a literatura aponta que uma forma de minimizar esse efeito é mover algumas informações desse canal visual para o canal auditivo. Em outras palavras, em vez de apresentar apenas páginas de texto, uma parte da informação pode ser um vídeo com narração do conteúdo que estava no texto. Esse é o conhecido efeito da modalidade (do inglês, *modality effect*) em que a preparação de materiais não deve apenas apresentar textos, mas também palavras narradas. Esse efeito gerou o princípio da modalidade, em que a TAM afirma que as pessoas aprendem mais com gráficos e narração do que com animações e apenas textos. Para resultados de pesquisa envolvendo esse princípio, ver Moreno & Mayer (1999), Moreno et al., (2001) e a dissertação de Kutbay (2016).

A Tabela 2 reúne alguns outros cenários em que a sobrecarga pode ocorrer, os efeitos, princípios e métodos de como evitá-la.

Tabela 2. Efeitos, princípios e métodos da Teoria da Aprendizagem Multimídia que podem ser usados para reduzir a demanda cognitiva imposta durante a tarefa quando o sujeito entra em sobrecarga por diferentes cenários.

CENÁRIOS DE POSSÍVEL SOBRECARGA	MÉTODO PARA REDUZIR A DEMANDA COGNITIVA	EFEITO (E PRINCÍPIO)
Processamento essencial em ambos os canais		
[1] Mayer & Chandler (2001)	Permita um espaço de tempo entre uma informação e outra.	Efeito da segmentação: as pessoas aprendem mais quando podem controlar o acesso a um conteúdo seriado do que a uma unidade completa.
[2] Mayer, Mathias, & Wetzell (2002)	Ofereça um treinamento prévio à tarefa que introduz conceitos e características importantes.	Efeito do pré-treino: as pessoas aprendem mais quando já conhecem os nomes, componentes e processos da tarefa.
Processamento essencial + incidental (materiais com formato inadequado)		
[3] Sweller (1999)	Elimine qualquer material estranho à tarefa para evitar ter que processar o desconhecido.	Efeito da coerência: as pessoas aprendem mais quando o material estranho não é incluído na tarefa.
[4] Jamet (2014)	Forneça dicas gráficas de como processar o material em estudo.	Efeito da sinalização: as pessoas aprendem mais quando há um destaque da organização do material a ser essencialmente processado.
Processamento essencial + incidental (materiais com apresentação confusa do conteúdo)		
[5] Hegarty, & Just (1989)	Coloque as palavras perto das imagens a que se referem, evitando a necessidade de uma busca visual.	Efeito da contiguidade espacial ou efeito da atenção dividida: as pessoas aprendem mais quando palavras e imagens estão integradas no material.
[6] Kalyuga et al. (2003)	Evite colocar exatamente o mesmo conteúdo escrito com a narração.	Efeito da redundância: as pessoas aprendem melhor quando há apenas narração do que quando há narração do texto escrito.
Processamento essencial + manutenção representacional		
[7] Mayer et al. (1999)	Apresente a narração junto à animação para evitar ter que manter todas as informações à medida que o tempo passa.	Efeito da contiguidade temporal: as pessoas aprendem mais quando imagens e palavras narradas são apresentadas simultaneamente em vez de em sequência.
[8] Mayer & Sims (1994)	Se certifique de que os alunos possuem as habilidades necessárias para manter as representações na MT.	Efeito da habilidade pessoal: pessoas com alta habilidade visual aprendem mais com materiais bem planejados do que os alunos com baixa habilidade visual.

Fonte: baseada em Mayer & Moreno (2003).

2.2.2 Resumo e articulação da fundamentação teórica

O acoplamento entre conceitos-chave da TCC e da TAM, especialmente importantes no contexto desta tese, gerou o referencial teórico que orienta a base lógica por trás de cada estudo, a elaboração dos materiais de ensino e a discussão dos resultados obtidos. A forma como esse acoplamento foi feito por mim, resultou em um MC (Figura 11) que responde à pergunta focal: *Como as teorias cognitivistas tratadas nesse capítulo se articulam para constituir o meu referencial teórico?* Os conceitos em vermelhos são provenientes exclusivamente da TCC, os conceitos em azul são provenientes exclusivamente da TAM. Os conceitos em roxo mostram os conceitos mencionados em ambas as teorias. Dei um destaque para a aprendizagem significativa (em verde), por ser um conceito ausbeliano, mas que também está presente nas outras teorias cognitivistas.

O foco da tese, evidenciado pelos conceitos escritos em preto na Figura 11, é o uso dos MCs como material de ensino em Química. Para sua elaboração são consideradas as cargas ou demandas impostas à MT dos alunos, a partir da combinação do conteúdo químico, que apresenta suas particularidades e características e o uso de estratégias instrucionais para otimizar o formato do MC a ser apresentado aos alunos. Cada estudo proposto nesta tese manipula estratégias específicas a fim de potencializar o processamento generativo ou a manutenção representacional, para construção e automação de esquemas que resultem em maiores ganhos de conhecimento. Sendo o conhecimento prévio um fator crítico na percepção das cargas ou demandas associadas às tarefas e, consequentemente, na eficiência do MC como material de ensino, essa variável também será analisada.

Figura 11. MC que representa o referencial teórico da tese, feito a partir do meu acoplamento entre o contexto da pesquisa (em preto) e os conceitos das teorias cognitivistas – Teoria da Carga Cognitiva (em vermelho), Teoria da Aprendizagem Multimídia (em azul), ambas as teorias (em roxo) e Teoria da Aprendizagem Significativa (em verde).
Fonte: a autora.

CAPÍTULO 3. BREVE REVISÃO CONCEITUAL DOS CONTEÚDOS QUÍMICOS ENVOLVIDOS NA PESQUISA

Nessa pesquisa é proposto o uso dos MCs, elaborados pelo professor, como material de ensino para potencializar a aprendizagem de conceitos químicos. Nos Estudos I e II, a presença de cores nos fogos de artifício foi escolhido como evento macroscópico capaz de articular conceitos relativos à estrutura da matéria, ao modelo atômico de Böhr e à interação luz-matéria. No Estudo III, a condução elétrica foi escolhida como um evento macroscópico capaz de articular os conceitos relativos ao modelo dos orbitais atômicos, à teoria dos orbitais moleculares e à teoria de bandas. As duas subseções a seguir fazem uma breve revisão dos conceitos envolvidos nesses temas. As referências utilizadas ao longo desse capítulo foram Kotz, Treichel, & Weaver (2006), Santos Filho (2007), Atkins & Jones (2011) e Levine (2014).

3.1 Por que os fogos de artifício têm cores?

Os **fogos de artifício** são artefatos produzidos pela combinação de um agente oxidante (normalmente ânions de nitratos, cloratos e percloratos), um combustível (pólvora – 75% nitrato de potássio, carvão e enxofre), um **sal** ou **óxido metálico** (veja Tabela 3) e um ligante, que mantém todos os outros componentes unidos (normalmente um composto orgânico, como a dextrina). Na presença de chama ou faísca, o agente oxidante e o combustível se envolvem em uma série de reações químicas complexas que liberam calor intenso e gás. A expansão do gás dentro do compartimento fechado provoca a explosão dos fogos de artifício no ar produzindo o estampido característico desse artefato (Russell, 2008). Outra consequência é a ocorrência da incandescência e/ou luminescência.

Tabela 3. Sais e óxidos metálicos usados na composição de fogos de artifício. Durante a queima, cada composto gera uma cor devido à emissão de radiação eletromagnética com comprimento de onda na região do espectro visível (400nm a 700nm).

Sais ou óxidos metálicos	Cor	Comprimento de onda* (nm)
Sais de estrôncio e lítio (SrCl_2 , $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$; Li_2CO_3 ; LiCl_2)	Vermelha	620-740
Sais de cálcio (CaCl_2 ; CaSO_4)	Laranja	590-620
Sais de sódio (NaCl ; Na_2CO_3)	Amarela	570-590
Sais de bário (BaCl ; BaClO_2)	Verde	495-570
Sais e óxidos de cobre I (CuCl ; Cu_2O)	Verde azulada	450-495
Mistura de sais de estrôncio e cobre	Violeta	400-450

Fonte: Russel (2008). *Acima de 750nm: infravermelho; Abaixo de 400nm: ultravioleta

A **incandescência** ocorre quando o sal metálico é altamente aquecido começando a brilhar (semelhante a um filamento de Tungstênio em uma lâmpada). Esse fenômeno pode ser explicado pela emissão de radiação de corpo negro.¹⁶ Um corpo em qualquer temperatura emite radiações eletromagnéticas, o qual independe da sua composição.

O modelo prático mais simples de um corpo negro é o de uma pequena abertura num objeto oco onde qualquer radiação que entra é totalmente absorvida nas paredes do objeto e totalmente refletida. O que se observou nos experimentos com corpo negro é que se esse objeto oco for aquecido por uma fonte de calor no seu interior, há emissão de radiação pelo orifício. Sendo assim, foi possível obter dados experimentais relacionando a intensidade da radiação emitida por um corpo negro em função do comprimento de onda, a uma dada temperatura.

Os resultados experimentais mostram que um aumento da temperatura, para um dado comprimento de onda, faz aumentar a intensidade da radiação emitida, mas o pico da distribuição se desloca para comprimentos de onda menores – denominado deslocamento de Wien (veja o gráfico da Figura 12). Na prática isso significa que, em baixas temperaturas a maior taxa de emissão está na região do **espectro eletromagnético** correspondente ao infravermelho (IV). Porém, aumentando-se gradativamente a temperatura de um corpo, ele começa a emitir luz visível (VIS), de início vermelha, passando à amarela, verde, azul e, em altas temperaturas, a luz branca, chegando à região do ultravioleta (UV) do espectro eletromagnético.

¹⁶ Por definição, um corpo negro é qualquer corpo capaz de absorver 100% da radiação incidente e, pelo princípio de Kirchhof, também emitir 100% dessa radiação (visto como uma luz branca).

Figura 12. Emissão de radiação do corpo negro em diferentes temperaturas T . Quanto maior a temperatura, maior a intensidade da radiação emitida, mas, o comprimento de onda máximo ($\lambda_{\max}$) se desloca para valores cada vez menores. Consequentemente, há emissão de luz em diferentes regiões do espectro eletromagnético – UV: ultravioleta; VIS: visível; IV: infravermelho. **Fonte:** Schubert, E. F. (2006, p. 307).

A teoria clássica era capaz de explicar parte dos resultados observados, àquela referente aos grandes comprimentos de onda, mas não para comprimento de onda menores. Para resolver esse problema, Max Planck, em 1900, considerou a existência, na superfície do corpo negro, de cargas elétricas oscilantes que emitem energia radiante não de modo contínuo, como sugere a teoria clássica, mas em porções descontínuas, que transportam, cada qual, uma quantidade de energia bem definida. Os fótons, como foram definidos, carregariam um *quantum* de energia radiante E de frequência ν em uma relação $E = h\nu$, em que h é uma constante de proporcionalidade denominada constante de Planck ($h = 6,6262 \times 10^{-34} \text{ J.s}^{-1}$).

No caso dos fogos de artifício, a explosão dá início à emissão da radiação infravermelha, a qual não pode ser vista a olho nu, seguida da emissão de radiação visível nas cores vermelha, laranja e amarela. As cores branca e prateada são consequência da combustão dos metais (e.g., $2\text{Mg} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{MgO}$) magnésio, alumínio e titânio produzindo seus óxidos correspondentes.

Quando a temperatura de queima é controlada pelas proporções de pólvora e agente oxidante, é possível manipular o tempo em que o brilho das substâncias metálicas dos fogos de artifício aparecerá no ar e, consequentemente, a cor observada (Russell, 2008).

A **luminescência** ocorre quando o sal metálico absorve energia durante a queima. A cores observadas na queima dos fogos de artifício é um fenômeno macroscópico que só pode ser

totalmente compreendido pela adoção de **modelos atômicos** submicroscópicos que concebem a interação luz-matéria (i.e., a partir do modelo de Böhr em diante).

No modelo atômico de J. J. Thomson¹⁷, os átomos seriam pequenos corpos esféricos, pesados, cuja massa estaria distribuída em toda a sua extensão e teria carga elétrica positiva. Distribuídos no interior dessa massa estariam os elétrons negativos. Esse modelo qualitativo, datado de 1904, prevaleceu até que Ernest Rutherford tentava explicar o espalhamento de partículas α através da matéria (folha de ouro). O modelo de Thomson e Rutherford se assemelham, pois, ambos concebem um átomo esférico e neutro (interações entre prótons e elétrons). Entretanto, esses modelos diferem basicamente em um ponto importante: o raio da esfera positiva; para Thomson esse raio seria o próprio raio do átomo; já no modelo de Rutherford, o diâmetro da parte positiva seria muitíssimo menor do que o átomo, ou seja, praticamente toda a massa do átomo estaria localizada em um núcleo, enquanto os elétrons estariam ao redor do núcleo.

O modelo de Rutherford, datado de 1911, também qualitativo, foi complementado por Niels Böhr em 1913. O modelo de Rutherford e Böhr se assemelham, pois ambos consideram interações eletrostáticas entre um núcleo positivo (onde se concentra a maior massa do átomo) e uma parte periférica negativa (onde estão os elétrons). Entretanto, a abordagem física e matemática utilizada para explicar a órbita dos elétrons é o que difere seus modelos. Rutherford tinha consciência de que a teoria eletromagnética clássica levaria seu átomo a ser instável e autodestrutivo, pois os elétrons em movimento acelerado irradiariam energia continuamente até que colidiriam com o núcleo. Böhr, utilizando outra abordagem que considerava as leis de Newton e Coulomb, previu que os elétrons permaneceriam em cada uma das órbitas estacionárias sem perder energia. Para isso, ele introduziu uma quantidade de energia à eletrodinâmica clássica, previamente definida por Planck como *quantum* de energia.

Sendo assim, os modelos diferem em um ponto principal: o movimento dos elétrons ao redor do núcleo; para Rutherford esse movimento culminaria em uma colisão das cargas negativas com positivas, já no modelo de Böhr, tanto elétron como próton girariam em torno do centro de massa do sistema, em um movimento estacionário e de **energia quantizada**. Böhr deduziu, para o átomo de hidrogênio (número atômico $Z = 1$), que as órbitas estacionárias do elétron ao redor do próton são dadas por um raio fixo e, portanto, correspondem a uma

¹⁷ A evolução dos modelos atômicos pode ser acompanhada por resultados reportados por esses cientistas em Thomson (1897), Rutherford (1911, 1914) e Böhr (1913).

quantidade fixa de energia. Böhrr concluiu, então, que quando um elétron passasse de uma órbita a outra (denominada transição eletrônica), isso só seria possível pela absorção ou emissão de certos valores de energia ou radiação. O elétron, em seu **estado fundamental**, quando absorve energia é submetido a um **estado excitado** de energia. A diferença de energia entre os níveis de transição é inversamente proporcional ao comprimento de onda da radiação eletromagnética emitida ($|\Delta E| = \frac{hc}{\lambda}$). No caso, as séries espectrais de Lyman, Balmer, Ritz-Paschen, Brackett e Pfund (Figura 13) irão ditar as transições permitidas e a região do espectro eletromagnético a qual corresponderá o comprimento de onda (ou frequência) da radiação emitida.

Figura 13. Transições eletrônicas previstas em séries espectrais de Lyman, Balmer, Paschen, Brackett e Pfund que ditam a emissão de energia inversamente proporcional ao comprimento das ondas na região do ultravioleta, visível e infravermelho. **Fonte:** adaptada de <https://www.visionlearning.com/en/library/Chemistry/1/231/reading> [jan. 18].

No caso dos fogos de artifício, a queima fornece a energia quantizada que os elétrons do cátion metálico absorvem, migrando do estado fundamental para um estado excitado de energia (i.e., transição eletrônica). Quando os elétrons retornam ao seu estado fundamental, essa energia é liberada, correspondendo a uma onda eletromagnética com uma frequência específica. Estando o comprimento de onda entre 750 nm a 400 nm, a luz emitida observada corresponderá

a uma **cor** no espectro eletromagnético na região do visível. Diferentes sais metálicos presentes nos fogos de artifício geram, portanto, cores características quando queimados (Tabela 3).

3.2 Por que os metais conduzem eletricidade?

Todos os materiais possuem uma capacidade intrínseca de condução de corrente elétrica, chamada **condutividade elétrica** (unidade no SI, siemens/metro ou $S.m^{-1}$, equivalente a ohm/m ou $\Omega.m^{-1}$). A condutividade é o inverso da resistividade elétrica, a qual pode ser empiricamente determinada utilizando um condutivímetro. Na prática, um material é classificado como **condutor elétrico** quando apresenta condutividade maior que $10^2 \Omega.m^{-1}$ e **isolante elétrico** (ou dielétrico) quando apresenta condutividade menor que $10^{-10} \Omega.m^{-1}$. Os **semicondutores** têm condutividade elétrica variando entre esses dois valores acima (Tabela 4).

Tabela 4. Condutividade elétrica de alguns materiais.

Material	Condutividade elétrica ($\Omega.m^{-1}$)	Classificação
Prata	$6,8 \times 10^7$	Condutor elétrico
Cobre	$6,0 \times 10^7$	Condutor elétrico
Ouro	$4,3 \times 10^7$	Condutor elétrico
Alumínio	$3,8 \times 10^7$	Condutor elétrico
Latão	$1,6 \times 10^7$	Condutor elétrico
Ferro	$1,0 \times 10^7$	Condutor elétrico
Aço	$0,6 \times 10^7$	Condutor elétrico
Grafite	$1,7 \times 10^2$	Condutor elétrico
Germânio (puro)	2,1	Semicondutor (dielétrico)
Silício (puro)	$4,6 \times 10^{-4}$	Semicondutor (dielétrico)
Vidro	$1,0 \times 10^{-11}$	Isolante elétrico
Borracha	$1,1 \times 10^{-15}$	Isolante elétrico

Fonte: Callister (2002).

O que se observa na prática é que todos os **metais**, em estado sólido e líquido, são bons condutores elétricos enquanto os compostos de não metais, em sua maioria, são bons isolantes elétricos. Para entender os fatores que determinam tais propriedades macroscópicas é necessário compreender e articular conceitos complexos provenientes de diferentes teorias, tais como ligação metálica, retículo cristalino, orbitais atômicos, função de onda, teoria do orbital molecular e teoria de bandas.

Os arranjos ordenados tridimensionais de átomos que existem num sólido são denominados **retículo cristalino** (Figura 14a). Nesses, os átomos são representados como esferas rígidas que se repetem periodicamente, em três dimensões, até os limites físicos do cristal em uma unidade básica chamada célula unitária (Figura 14a). Os metais diferem em seus arranjos cristalinos com diferentes tipos de células unitárias (veja exemplos na Figura 14b).

Figura 144. Exemplos de retículos cristalinos metálicos que apresentam célula unitária hexagonal compacta, cúbica de face ou corpo centrada(o). **Fonte:** adaptada de <https://www.ggsdpdt.com> [jan. 18].

No caso dos metais, a alta eletropositividade¹⁸ de seus átomos faz com que haja a liberação de elétrons de valência, com a consequente formação de cátions metálicos. Esse é o caso, por exemplo, do metal sódio (Figura 15a), formado por um arranjo cristalino tridimensional (Figura 15b) de átomo monovalente de sódio (Na). As unidades que ocupam os pontos reticulares são os cátions sódio (cargas positivas, Na^+) estabilizados pela atração com

¹⁸ A eletropositividade, ou caráter metálico, é a tendência que um átomo possui de “perder” ou “doar” elétrons em comparação a outro átomo, na formação de uma ligação. Ou seja, é a tendência de um átomo de formar cátions. Se trata de uma propriedade periódica, que se repete em função da mudança de período na tabela periódica dos elementos químicos. Não existe uma escala de eletropositividade, porém, o que se sabe experimentalmente é que ela aumenta com o aumento do raio atômico.

seus elétrons (cargas negativas, e^-) na rede cristalina. Esses elétrons formam uma nuvem eletrônica ou gás de elétrons que se espalha por todo o retículo e, como eles não estão ligados a qualquer átomo específico ou mesmo emparelhados (formando um par), dizemos que eles estão **deslocalizados** ou “livres” para se moverem pela rede (Figura 15c).

Figura 15. Metal sódio (a) é formado pela união de átomos de sódio representado em (b) por um modelo submicroscópico do arranjo cristalino 3D. A ligação metálica é dada pela atração entre os cátions sódio com seus elétrons deslocalizados, que se movem facilmente pela rede. **Fonte:** adaptada de Zumdahl & Zumdahl (2014).

Já nos sólidos covalentes (formados pela união de átomos não metálicos), as unidades nos pontos reticulares são átomos que compartilham elétrons por meio de ligações covalentes. Nesse caso, os átomos possuem elétrons de valência firmemente envolvidos na formação de ligações *sigma* e/ou *pi* e, portanto, não estão livres para se moverem na rede cristalina. Como consequência, observamos uma alta resistividade elétrica que leva a uma baixa condução de corrente elétrica na estrutura tridimensional dessas “moléculas gigantes”. Esse é o caso, por exemplo, do diamante (Figura 16a), do vidro, da borracha, dos plásticos.

Algumas exceções são observadas, como é o caso da **grafita** e dos materiais a base de silício e germânio. A grafita é uma variação alotrópica do carbono que apresenta uma estrutura em camadas (Figura 16b). Dentro das camadas, cada carbono está ligado a outros três carbonos adjacentes, utilizando três de seus elétrons de valência para a formação de uma extensa rede de ligações *sigma*. Porém, o quarto elétron de valência de cada carbono, cujo eixo está presente em um orbital *p* perpendicular à rede cristalina, contribui para a formação de um imenso orbital de ligações *pi* deslocalizados acima e abaixo dessa rede, ligados fracamente por interações de van de Waals. Portanto, a grafita apresentará camadas de ligação *sigma* suplementadas por ligações *pi* com elétrons deslocalizados e capazes de conduzir corrente elétrica.

Diamante: estrutura cúbica **Grafita (grafite): estrutura lamelar**

Figura 16. Estrutura cristalina (a) cúbica do diamante e (b) lamelar da grafita (ou grafite). A presença de elétrons deslocalizados acima e abaixo das camadas da grafita permitem que ela seja um composto covalente condutor de eletricidade. **Fonte:** adaptada de http://www.crq4.org.br/qv_variedades_alotropicas_carbono [jan. 18].

Já os compostos à base de silício e germânio formam materiais amplamente utilizados na indústria como semicondutores. Na sua forma pura, esses materiais possuem átomos com elétrons que vibram de forma constante e não uniforme. Ao sofrer um aumento de temperatura e/ou pressão, um dos seus quatro elétrons de valência pode adquirir energia suficiente para se libertar da ligação e ficar “vagando” pelo cristal, adquirindo certa condutividade elétrica momentânea. Os lugares vagos deixados pelos elétrons são denominados **lacunas** (buracos/vacâncias), as quais podem ser preenchidas por elétrons vizinhos criando de modo dinâmico uma nova lacuna (Figura 17a). Quando finalmente o elétron excedente encontra uma lacuna vazia, ele se aniquila mutuamente fazendo o material voltar a ser um isolante elétrico.

Para que a condutividade desses materiais seja permanente, as indústrias fazem o processo de **dopagem** do material, na qual adiciona-se boro, fósforo ou arsênio de modo a tornar o silício ou o germânio impuro. Os defeitos de impureza produzem os semicondutores do tipo-p (positivo) ou tipo-n (negativo). Cada átomo de silício ou germânio liga-se covalentemente a outros quatro átomos adjacentes a si. A adição de boro à estrutura força a criação de uma lacuna, uma vez que o boro só apresenta três elétrons de valência. Nesse caso, haverá a falta de um elétron, formando um semicondutor do tipo-p (Figura 17b). A condução elétrica ocorre, pois, os elétrons que ganham energia podem se mover nas lacunas sem que haja a aniquilação total dos mesmos. Já a adição de fósforo ou arsênio forma um semicondutor do tipo-n (Figura 18b).

Esses elementos apresentam cinco elétrons de valência, e, portanto, adicionam um elétron livre extra na estrutura. Nesse caso, a condução elétrica ocorre devido à mobilidade desse elétron extra na rede cristalina.

Figura 17. Representação de algumas ligações entre átomos de silício em um semicondutor. Em (a) o silício puro pode gerar lacunas dinâmicas devido a um aumento de temperatura e em (b) a dopagem com impurezas, boro e fósforo, que formam semicondutores do tipo-p (criam lacunas) ou tipo-n (adicionam elétrons livres), respectivamente. **Fonte:** <https://www.electronica-pt.com> [jan. 18].

Um fator crítico para a eficiência desses materiais é a **temperatura**. Nos metais, o aumento de temperatura faz aumentar a vibração dos cátions no retículo cristalino interferindo no movimento dos elétrons deslocalizados e, conseqüentemente, diminuindo a condutividade elétrica. Já nos semicondutores dopados, um aumento de temperatura faz com que alguns elétrons adquiram energia necessária para se desprender da forte ligação covalente com seu átomo, tornando-se deslocalizados. Quanto mais elétrons livres para circularem pela rede maior a condutividade elétrica. Resumindo, um aumento da temperatura em metais tem um efeito contrário aos semicondutores dopados.

Baseado no efeito fotoelétrico, Einstein deduziu que os fotoelétrons eram ejetados da superfície de um metal irradiado com uma energia cinética igual à energia incidente menos a energia mínima para arrancar os elétrons ($E_{cinética} = E_{incidente} - E_{mínima}$). De acordo com as teorias de Planck e de Einstein foi possível estabelecer a relação: $mc^2 = h\nu = pc$, logo, $p = \frac{h}{\lambda}$. Com essa equação Einstein pôde introduzir o conceito dualístico da luz, isto é, a luz que, experimentalmente, possui um comprimento de onda ($\lambda = c/\nu$) comporta-se também como uma partícula que tem um momento $p = h/\lambda$. Em 1924, Louis de Broglie expandiu esse conceito, ao

considerar que todos os fenômenos naturais envolviam certa forma de matéria e radiação (ondas eletromagnéticas) e, que se as ondas podiam ter propriedades de partículas, o inverso também seria verdadeiro, isto é, a toda partícula de momento p estaria associada uma onda de comprimento λ . Essa teoria, chamada **dualidade onda-partícula**, permitiu introduzir um novo modelo atômico conhecido como modelo quântico.

É possível descrever qualquer movimento ondulatório por uma equação matemática conhecida como equação ou **função de onda**. Em 1926, Erwin Schrödinger e Heisenberg definiram a função de onda para o elétron do átomo de hidrogênio isolado. As soluções para essa equação forneceram diversas informações sobre os estados de energia para esse átomo ampliando suas deduções para outros átomos também.

Em um átomo isolado, os elétrons estão distribuídos em **níveis** e **subníveis de energia** estacionária e quantizada. Para a mecânica quântica, a maior probabilidade de se encontrar um elétron presente em um específico nível e subnível é definido como **orbital**. No caso de átomos isolados, os elétrons estarão em um **orbital atômico** (OA). A maneira específica pela qual os orbitais de um átomo serão ocupados por elétrons é chamada **configuração eletrônica**. Por exemplo, o átomo de lítio apresenta número atômico $Z = 3$ e, portanto, apresenta sua configuração no estado fundamental como: $1s^2 2s^1$. O lítio apresenta um elétron de valência situado no segundo nível energético, subnível s .

Se unirmos dois átomos de lítio (Figura 18), cada átomo contribuirá para a formação de uma ligação. De acordo com a Teoria dos Orbitais Moleculares, a combinação dos dois OA ocorre tanto quando há interferência construtiva dos dois AO (soma), resultando em um orbital molecular (OM) de menor energia (chamado **OM ligante**) ou quando há interferência destrutiva dos dois AO (subtração), resultando em um OM de maior energia (chamado **OM antiligante**). Os elétrons emparelhados (em par) formarão uma ligação entre os átomos ocupando o OM ligante (Figura 18).

Figura 18. Representação de como ocorre a ligação entre dois, três, quatro e n -átomos de lítio. Os orbitais atômicos se combinam para formar orbitais moleculares (OM), que podem ser ligantes, não ligantes ou antiligantes. No metal lítio, os OM de energia semelhante formam uma contínua banda de energia. **Fonte:** adaptada de Mora, Lucas & Maran (2010) [jan. 18].

Se adicionarmos um terceiro átomo de lítio, o elétron de valência a mais ocupará um OM não ligante, ou seja, com o mesmo conteúdo energético do OA, mas que não participa da ligação (Figura 18). Ao adicionarmos o quarto átomo de lítio, formaremos novos OM ligantes e antiligantes que apresentam energia muito próxima daqueles formados inicialmente. Por fim, se uníssemos infinitos átomos de lítio, haveria a união de OM com energia muito próximos entre si, formando uma contínua **banda de energia** (Figura 18).

Quando os OM ligantes totalmente preenchidos com os elétrons de valência se unem, há a formação da **banda de valência**. De forma análoga, quando os OM antiligantes vazios se unem, há a formação da **banda de condução**, que pode receber elétrons de valência com mobilidade na rede cristalina. Na banda de valência existe um OM de mais alta energia ocupada por pelo menos um elétron, chamado **HOMO** (do inglês, *Highest Occupied Molecular Orbital*), enquanto na banda de condução existe um OM de mais baixa energia não ocupado por elétrons, chamado **LUMO** (do inglês, *Lowest Unoccupied Molecular Orbital*).

De acordo com a Teoria das Bandas, a diferença (ou *gap*) de energia entre a banda de valência (i.e., HOMO) e a banda de condução (i.e., LUMO) é definido como **nível de Fermi** e está intimamente relacionado à condutividade elétrica dos materiais (Figura 19). Se o nível de Fermi é zero ou próximo de zero isso indica que os elétrons podem facilmente migrar do HOMO para o LUMO caracterizando o material como um condutor elétrico. Quando o nível de Fermi é tão alto que impossibilita essa migração dos elétrons, mesmo com a manipulação de temperatura e/ou pressão, caracteriza-se o material como isolante elétrico. Por fim, quando

existe uma diferença significativa de energia entre o HOMO e o LUMO, porém, ao aumentar a temperatura ou dopar o material, é possível migrar os elétrons de uma banda para outra, então o material é classificado como um semicondutor.

Figura 19. Diferença (*gap*) energética entre o HOMO da banda de valência e o LUMO da banda de condução definem o nível de Fermi e, consequentemente, a capacidade do material em conduzir eletricidade. **Fonte:** a autora.

É importante notar que os modelos adotados para explicar a possibilidade de condutividade elétrica em sólidos metálicos e covalentes não se aplicam aos compostos iônicos, como, por exemplo, o cloreto de sódio (NaCl). No estado sólido, compostos iônicos não conduzem eletricidade, pois os cátions metálicos são fortemente atraídos pelos ânions não metálicos. Essa estabilidade eletrostática do tipo íon-íon é altamente energética e, não havendo elétrons livres na rede cristalina, não é possível haver condução elétrica (Figura 20). Entretanto, quando em meio aquoso, tanto cátions como ânions são envolvidos por moléculas de água em um processo de **solvatação** (Figura 20). Nesse caso, os cátions são removidos da rede cristalina, atraídos pelo polo negativo da molécula de água (i.e., o oxigênio, pois tem maior eletronegatividade), enquanto os ânions são atraídos pelo polo positivo da molécula de água (i.e., os hidrogênios, pois têm menor eletronegatividade). Como consequência, o retículo cristalino iônico se desfaz ocorrendo a dissolução/solvatação do sólido, enquanto a presença de cátions e ânions livres em solução permite agora a mobilidade de elétrons e, portanto, a condutividade elétrica.

Figura 20. Representação da solvatação do cloreto de sódio (NaCl) quando dissolvido em água. No estado sólido, uma rede cristalina rígida não permite condução elétrica, mas em meio aquoso, a presença de íons permite mobilidade eletrônica. **Fonte:** <http://www.projeto-biologico.arizona.edu> [jan. 18]. Para uma representação dinâmica desse processo consulte o vídeo: <https://www.youtube.com/watch?v=uTgJHP9msLE> [jan. 18].

CAPÍTULO 4. METODOLOGIA

A metodologia de pesquisa adotada nesta tese foi quantitativa. A abordagem quantitativa se utiliza de um pressuposto positivista para desenvolvimento do conhecimento (Creswell, 2013), isto é, que tem na sua base:

- Um pensamento de causa e consequência onde fatores interferem em resultados.
- A redução a poucas variáveis a serem testadas.
- O estabelecimento *a priori* de perguntas de pesquisas e hipóteses de trabalhos.
- A adoção de estratégias de pesquisa baseadas em experimentos reais ou quase-experimentos.
- O uso de instrumentos de coleta de dados precisos e validados.
- O uso da análise estatística de dados como meio para confirmar ou refutar as hipóteses preestabelecidas.

4.1 Contexto, participantes e questões éticas

A pesquisa foi conduzida na Escola de Artes, Ciências e Humanidades (EACH) da Universidade de São Paulo (USP), entre os anos de 2014 e 2017. Com uma diretriz administrativa e acadêmico-pedagógica diferenciada das propostas tradicionais em vigor na maioria das universidades ou mesmo daquela considerada central na USP, a EACH não apresenta departamentos, se constituindo como uma única unidade de ensino (Gomes, 2005).

A não departamentalização da EACH potencializa os esforços por um currículo de graduação interdisciplinar, reforçado pela constituição do Ciclo Básico (CB). O CB corresponde a um conjunto de seis disciplinas obrigatórias ofertadas nos dois primeiros semestres a todos os alunos ingressantes à EACH. Dentre as disciplinas oferecidas em semestres ímpares, está a ACH0131 – Ciências da Natureza – Ciência, Cultura e Sociedade (CN), a qual oferece uma visão abrangente sobre o impacto do desenvolvimento científico-tecnológico na sociedade contemporânea, com o objetivo de aumentar a alfabetização científica dos participantes (Dehaan, 2005; Bybee & Fuchs, 2006; Holbrook & Rannikmae, 2007; Linsingen, 2007; Correia et al., 2010; Chassot, 2016).

A disciplina CN, quando ministrada pelo orientador da tese Prof. Paulo Rogério Miranda Correia, se organiza em 15 aulas (de 100 minutos cada), divididas em três blocos temáticos: “História da Astronomia e o Nascimento da Ciência Moderna”, “Mudanças Climáticas” e “Biologia Molecular e Bioética”. A disciplina cumpre os seguintes objetivos específicos:

- Introduzir discussões relacionadas com as ciências naturais, visando apresentar seus mecanismos de funcionamento e suas relações com a tecnologia e a sociedade.
- Favorecer a compreensão do processo histórico do desenvolvimento da ciência.
- Permitir que os alunos estabeleçam uma relação próxima com o conhecimento científico estimulando a apropriação crítica desse conhecimento, valorizando a reflexão dos alunos com relação ao impacto da ciência e da tecnologia na sociedade do conhecimento.

Os alunos matriculados na disciplina CN, provenientes dos dez cursos¹⁹ de graduação da EACH, foram convidados a participar dos estudos conduzidos nesta tese. Ao todo, 253 alunos (mantidos em anonimato) participaram da pesquisa de modo voluntário e sem remuneração. Todos os participantes assinaram o Termo de Consentimento Livre e Esclarecido (TCLE), elaborado segundo a Resolução nº 466 de 2012 do Conselho Nacional de Saúde e aprovado pelo Comitê de Ética da EACH sob nº 40104314.7.0000.5390. Os TCLEs originais solicitados para assinatura podem ser vistos nos APÊNDICES 1, 2 e 3.

Vale notar, que durante as aulas de CN, o professor não abordou formalmente os conceitos químicos específicos envolvidos nessa pesquisa, tais como estrutura da matéria, modelos atômicos, ligações químicas. Porém, era de se esperar que os alunos possuíssem algum conhecimento prévio sobre esses assuntos, uma vez que eles estão contemplados na base curricular estadual de Química do Ensino Médio (São Paulo, 2009).

4.2 Procedimentos de pesquisa: uma visão geral dos estudos

Os procedimentos de pesquisa contemplaram o delineamento experimental, os materiais ou instrumentos de pesquisa, os procedimentos de coleta de análise de dados. Um planejamento

¹⁹ Dentre os anos em que a pesquisa foi realizada (2014 e 2017), os cursos de graduação oferecidos na EACH eram: Ciências das Atividades Físicas, Gerontologia, Gestão Ambiental, Gestão de Políticas Públicas, Lazer e Turismo, Licenciatura em Ciências da Natureza, Marketing, Obstetrícia, Sistemas da Informação, Têxtil e Moda.

quase-experimental foi adotado para condução dos três estudos desta tese (visão geral na Figura 21). Esse tipo de delineamento se faz necessário, pois dois pré-requisitos à condução de um experimento real não puderam ser satisfeitos: (1) a total aleatoriedade dos alunos distribuídos nos grupos e (2) a presença de um grupo controle em que a variável em teste estivesse completamente ausente (Kerlinger, 1979).

Os instrumentos de pesquisa (ou materiais) compreendem: (1) os questionários sobre o conhecimento científico utilizados antes e depois da fase de estudo (i.e., pré-testes e pós-testes), (2) os MCs, e os possíveis recursos digitais associados a eles, utilizados durante a intervenção ou fase de estudo e (3) as medidas psicométricas de esforço mental ou carga cognitiva. Os MCs foram produzidos utilizando o programa computacional *CmapTools* (IHMC, Pensacola, EUA) e, em seguida, exportados como arquivos de figura – extensão .jpeg (para impressão no papel) ou como arquivos da web – extensão .html (para uso no meio digital).

De acordo com a Figura 21, os MCs aplicados como material de ensino versavam sobre a química dos fogos de artifício (Estudos I e II, conteúdo descrito na seção 3.1) ou sobre a condutividade elétrica de diferentes materiais (Estudo III, conteúdo descrito na seção 3.2). As variáveis independentes (i.e., variáveis manipuladas pelo pesquisador e a serem testadas na pesquisa) definem se o planejamento será do tipo 2 X 2 (4 condições experimentais) ou fatorial 2 X 3 (6 condições experimentais). As variáveis dependentes (i.e., variáveis a serem mensuradas após a intervenção ou estudo com os MCs) incluem medidas de desempenho no pós-teste, ganho de conhecimento (factual e/ou conceitual), esforço mental ou carga cognitiva, eficiência da instrução e tempo na tarefa.

Apesar do pequeno número de participantes por condição relatados nos Estudos, o teste de Kolmogorov-Smirnov (com correção de Lilliefors) confirmou que todos os dados possuem distribuição paramétrica ou normal (Field, 2013). As análises de dados foram realizadas utilizando o programa computacional SPSS 22.0 (IBM, EUA) com nível de significância definido em 0,05 (Field, 2013). Foram conduzidas Análise de Variância (ANOVA) de fator único ou dois fatores (sem ou com repetição na segunda variável), testes-t independentes e pareados. Nos Estudos I e II, o conhecimento prévio foi considerado como uma possível covariável, pois se trata de uma variável que não foi manipulada *a priori*, mas que poderia interferir nos resultados de aprendizagem. Quando confirmada essa possibilidade, conduziu-se a Análise de Covariância (ANCOVA). Os Capítulos 5, 6 e 7 oferecem os detalhes necessários para compreender o planejamento experimental, os materiais utilizados e os procedimentos de pesquisa (coleta e análise de dados) adotados nos Estudo I, II e III, respectivamente.

Figura 21. Visão geral do planejamento experimental adotado para os três estudos da tese. Do lado esquerdo os conteúdos de Química de cada estudo. Um planejamento quase-experimental foi delineado para verificar o efeito das variáveis independentes (manipuladas) sobre as variáveis dependentes (testadas). Conhecimento prévio é uma possível covariável. **Fonte:** a autora.

CAPÍTULO 5. ESTUDO I – O EFEITO DA ADIÇÃO DE DICAS GRÁFICAS AOS MAPAS CONCEITUAIS SOBRE QUÍMICA

Dicas gráficas são elementos visuais que introduzem ênfase nas informações contidas no material como um todo ou em parte dele. Baseado nos princípios da TCC e da TAM, argumenta-se que o uso de dica gráfica reduz a CG extrínseca e potencializa a aprendizagem devido a três motivos principais: (1) minimizar o processo de busca desnecessária para relacionar informações imagéticas e verbais (e.g., Jeung, Chandler e Sweller, 1997), (2) orientar a atenção para informações importantes para a tarefa (e.g., Lin & Atkinson, 2011) e (3) auxiliar na organização (de cima para baixo) e integração dos conteúdos presentes no material (e.g., Underwood & Foulsham, 2006).

Em revisão recente da literatura, Beege et al. (2017) reportaram um efeito positivo da dica gráfica ou sinalização do material (do inglês, *cueing effect* ou *signaling effect*) quando comparados aos materiais sem o uso desses elementos visuais. Dentro desse contexto, alguns estudos (e.g., Folker, Ritter, & Sichelschmidt, 2005) reportam um efeito positivo do uso de cores como dica gráfica (do inglês, *color-coding effect*). Por exemplo, em Ozcelik et al. (2009), as cores são usadas para orientar e direcionar a atenção dos alunos, facilitando a integração do conteúdo (texto e imagem) em um todo coerente. Como consequência, os alunos que estudaram com o material colorido tiveram melhores desempenhos nos testes de retenção e transferência em comparação aos alunos que estudaram o MC convencional preto e branco. Ainda que prática comum na área instrucional, o uso de dicas gráficas associadas aos MCs ainda é pouco explorado na literatura.

5.1 Objetivo, pergunta de pesquisa e hipóteses de trabalho

O objetivo do Estudo I foi avaliar o efeito da adição de dicas gráficas ao MC nos resultados de aprendizagem e esforço mental durante a tarefa de compreensão do conteúdo químico (i.e., causa das cores nos fogos de artifício). Duas dicas gráficas serão avaliadas, a atribuição da mesma cor aos conceitos para agrupar visualmente áreas de conhecimento similar e números nas proposições como forma de oferecer uma sequência de leitura.

Pergunta de pesquisa

Qual o impacto da adição das dicas gráficas “cor” e “número” ao MC no desempenho e no esforço mental dos alunos para compreender o conteúdo químico?

Hipóteses de trabalho

Se as dicas gráficas forem responsáveis por diminuir a desorientação causada pelo MC, espera-se que os alunos que estudarem os MCs coloridos apresentem melhores resultados de aprendizagem (Hipótese 1a) e menor esforço mental (Hipótese 1b) quando comparados aos alunos que estudarem com os MCs preto e branco, assim como, os alunos que estudarem os MCs com numeração nas proposições apresentem melhores resultados de aprendizagem (Hipótese 1c) e menor esforço mental (Hipótese 1d) quando comparados aos alunos que estudarem os MCs sem essa numeração.

5.2 Materiais e métodos

5.2.1 Contexto, participantes e planejamento experimental

A condução do Estudo I ocorreu no 1º semestre de 2014 e contou com a participação de 85 alunos ingressantes à EACH/USP matriculados na disciplina CN. O delineamento quase-experimental resultou em quatro condições experimentais (Figura 22), em que os alunos tiveram acesso a um MC sem nenhum tipo de dica gráfica (sem cor e sem número, SCSN), ao menos um tipo de dica gráfica (sem cor e com número, SCCN ou com cor e sem número, CCSN) ou com as duas dicas gráficas (com cor e com número, CCCN).

Figura 22. Estudo I - planejamento quase-experimental resultando em quatro possíveis MCs a serem usados como material de estudo, com ou sem cor nos conceitos e com ou sem número nas proposições.

5.2.2 Procedimento de coleta dos dados

A coleta de dados ocorreu conforme procedimento esquematizado na Figura 23. O tempo total de coleta foi de aproximadamente 60 minutos e ocorreu em sala de aula. Os materiais utilizados em cada etapa serão descritos em detalhes na seção 5.2.3.

Figura 23. Estudo I - procedimento de coleta de dados com os tempos despendidos em cada etapa.

- **TCLE:** 5 minutos para explicar o objetivo, a metodologia e os riscos da pesquisa, bem como os alunos assinarem o TCLE.

- **Pré-teste:** 10 a 15 minutos para que os alunos julgassem 30 afirmações em escala Likert 4-níveis (*1 = discordo totalmente a 4 = concordo totalmente*) e uma pergunta dissertativa. Instrumento validado com especialistas e análise de consistência interna (ver seção 5.2.3.1). Ao final do pré-teste os alunos deveriam declarar o esforço mental para responder ao questionário usando escala Likert 7-níveis (*1 = muito, muito baixo a 7 = muito, muito alto*).
- **Estudo do MC:** cada grupo experimental recebeu uma folha contendo instruções prévias e, no verso, o MC conforme características apresentadas na Figura 22. Os alunos tiveram até 20 minutos para estudar o conteúdo do MC. Conteúdo e formato do MC foram validados com especialistas (ver seção 5.2.3.2).
- **Pós-teste:** 10 a 15 minutos para que os alunos julgassem 30 afirmações em escala Likert 4 -níveis mais a pergunta dissertativa. Instrumento validado com especialistas e análise de consistência interna (ver seção 5.2.3.1). Ao final do pós-teste, os alunos deveriam declarar o esforço mental para compreender o conteúdo do MC e responder ao questionário usando a escala Likert 7-níveis.

5.2.3 Materiais

Os materiais utilizados no Estudo I foram os questionários aplicados como pré-teste e pós-teste, os MCs usados como material de estudo e a escala do esforço mental declarado nas tarefas.

5.2.3.1 Desenvolvimento e validação do pré-teste e pós-teste

Inicialmente, uma lista contendo 40 afirmações foi elaborada sobre a química dos fogos de artifício (conteúdo descrito na seção 3.1), as quais poderiam estar corretas ou incorretas. Essas afirmações deveriam ser julgadas pelos alunos utilizando uma escala Likert 4-níveis sendo *1 = discordo totalmente, 2 = discordo parcialmente, 3 = concordo parcialmente e 4 = concordo totalmente*). A opção “não sei ou não quero responder” foi adicionada como forma de prevenir respostas aleatórias.

Em seguida, foram conduzidas duas sessões individuais de validação com cada uma das especialistas, sendo: (1) uma professora de Química do Ensino Superior, pesquisadora da área de Química Analítica – subárea Absorção Atômica e (2) uma professora de Química do Ensino

Médio, mestre em Ensino de Química. Durante as sessões, que duraram em média 3h cada, discutiu-se cada uma das afirmações, em função da:

- **Pertinência:** quão apropriada e relevante em relação ao conteúdo científico.
- **Validade:** quão útil e fiel ao conteúdo científico.
- **Limitações:** quão dúbias, imprecisas ou incoerentes.

Com base nas sugestões das professoras especialistas, apenas 30 afirmações permaneceram ao final do questionário a ser aplicado como pré-teste (Tabela 5). Ambas sugeriram a adição de uma pergunta dissertativa como forma de complementar a avaliação do conhecimento conceitual do aluno sobre o tema. A pergunta definida foi “*Explique em poucas palavras – Qual é a diferença entre fogos de artifício de cor laranja e verde?*” Algumas assertivas do pré-teste foram selecionadas, levemente modificadas e embaralhadas para compor o pós-teste, contendo 30 afirmações a serem julgadas na escala Likert de 4-níveis (discordo totalmente a concordo totalmente) finalizado com a mesma pergunta dissertativa do pré-teste (Tabela 6).

A fim de validar os instrumentos de coleta de dados (questionários), um **projeto piloto** foi conduzido com 21 participantes (alunos de graduação, pós-graduação e professores) no 1º semestre de 2014. Uma análise de consistência interna revelou valores satisfatórios para o alfa de Cronbach, sendo 0,773 para o pré-teste e 0,764 para o pós-teste (Field, 2013).

Tabela 5. Estudo I - questionário validado e aplicado como pré-teste. As afirmações grifadas em amarelo estão incorretas do ponto de vista científico.

Nome:	Idade:	Curso:			
INSTRUÇÕES					
Julgue as afirmações apresentadas a seguir de acordo com os seus conhecimentos atuais. Expresse sua opinião da forma mais sincera possível utilizando a seguinte escala: (0) Não sei. Não quero responder. (1) Discordo totalmente. (2) Discordo parcialmente. (3) Concordo parcialmente. (4) Concordo totalmente.					
AFIRMAÇÃO	0	1	2	3	4
1. Fogos de artifício apresentam cor devido à presença de corantes em sua composição					
2. A eletrosfera de um átomo é dividida em níveis de energia					
3. A incandescência ocorre quando o elemento químico é aquecido e emite luz no infravermelho					
4. A luminescência ocorre quando um elétron libera energia na forma de luz					
5. A quantidade de prótons de um átomo caracteriza o seu respectivo elemento químico					
6. Os prótons e os nêutrons são partículas subatômicas					
7. Os elementos químicos presentes nos Fogos de artifício são responsáveis por suas cores					
8. Cada substância apresentará uma cor específica quando submetido à chama					
9. Cada elemento químico possui a sua configuração eletrônica					
10. Cada nível de energia pode ser dividido em subníveis de energia					
11. De acordo com o modelo de Rutherford-Böhr, o átomo tem uma parte central chamada núcleo					
12. Os Fogos de artifício só apresentam cores quando queimados					
13. Os prótons e nêutrons são partículas subatômicas periféricas e os elétrons são nucleares					
14. Elétrons, quando retornam ao seu estado fundamental, liberam energia na forma de luz					
15. O modelo de Rutherford-Böhr diz que o átomo tem uma parte periférica chamada eletrosfera					
16. A absorção de energia quantizada leva o elétron a um estado fundamental de energia					
17. Um elemento químico é constituído por um conjunto de átomos com mesmo número atômico					
18. Elétrons podem absorver energia quantizada					
19. Fogos de artifício apresentam cor devido ao fenômeno da luminescência					
20. Não é possível prever a ordem energética de distribuição dos elétrons na eletrosfera					
21. A radiação eletromagnética na região do visível pode ser vista na forma de cores					
22. Fogos de artifício apresentam cor devido ao fenômeno da incandescência					
23. Fogos de artifício apresentam cor devido a uma ilusão de óptica					
24. Os Fogos de artifício apresentam em sua composição substâncias químicas explosivas					
25. Fogos de artifício apresentam cor, pois, a pólvora utilizada na sua composição é colorida					
26. Os níveis e subníveis de energia da eletrosfera possuem energia quantizada					
27. A emissão de luz na região do ultravioleta não pode ser vista na forma de cores					
28. Substâncias químicas são formadas por apenas um elemento químico					
29. Os elétrons são partículas com carga negativa e massa desprezível					
30. A Química não é capaz de explicar totalmente a causa das cores nos Fogos de artifício					
Sendo 1 = muito, muito baixo e 7 = muito, muito alto: Qual foi o seu esforço mental para responder a esse questionário? (por favor, escolha um número inteiro entre 1 e 7)					
Explique, em poucas palavras: Qual é a diferença entre Fogos de artifício de cor laranja e verde?					

Fonte: a autora.

Tabela 6. Estudo I - questionário validado e aplicado como pós-teste. As afirmações grifadas em amarelo estão incorretas do ponto de vista científico.

Nome:					
INSTRUÇÕES - PÓS TESTE					
Julgue as afirmações apresentadas a seguir de acordo com os seus conhecimentos atuais. Expresse sua opinião da forma mais sincera possível utilizando a seguinte escala: (0) Não sei. Não quero responder. (1) Discordo totalmente. (2) Discordo parcialmente. (3) Concordo parcialmente. (4) Concordo totalmente.					
AFIRMAÇÃO	0	1	2	3	4
1. A absorção de energia quantizada leva o elétron a um estado excitado de energia					
2. A eletrosfera de um átomo é dividida em níveis de energia					
3. A emissão de luz na região do ultravioleta não pode ser vista na forma de cores					
4. Fogos de artifício apresentam cor, pois a pólvora utilizada na sua composição é colorida					
5. Quando um elétron libera energia na forma de luz dizemos que ocorreu a luminescência					
6. A Química é capaz de explicar totalmente a causa das cores nos Fogos de artifício					
7. Substâncias formadas pelo mesmo elemento químico apresentará a mesma cor quando submetido à chama					
8. Os prótons e nêutrons são partículas presentes no núcleo e os elétrons na eletrosfera					
9. Cada nível de energia pode ser dividido em subníveis de energia					
10. De acordo com o modelo de Rutherford-Bôhr, o átomo tem uma parte central chamada próton					
11. A incandescência ocorre quando uma substância é aquecida e emite luz no infravermelho					
12. As substâncias não explosivas recebem o calor gerado na queima dos Fogos de artifício					
13. A quantidade de prótons de um átomo caracteriza o seu respectivo elemento químico					
14. Os níveis de energia são organizados segundo uma ordem energética					
15. Substâncias químicas são formadas por apenas um elemento químico					
16. Fogos de artifício apresentam cor devido ao fenômeno da luminescência					
17. Elétrons podem absorver energia quantizada					
18. A distribuição dos elétrons na eletrosfera obedece à uma ordem energética específica					
19. A radiação eletromagnética na região do visível não pode ser vista na forma de cores					
20. O modelo de Rutherford-Bôhr diz que o átomo tem uma parte periférica chamada núcleo					
21. Os elementos químicos presentes nos Fogos de artifício são responsáveis por suas cores					
22. Os elétrons são partículas com carga positiva e massa desprezível					
23. Os Fogos de artifício apresentam em sua composição substâncias químicas explosivas					
24. Os Fogos de artifício só apresentam cores quando queimados					
25. Os níveis e subníveis de energia da eletrosfera possuem energia quantizada					
26. O número atômico corresponde ao número de prótons de um átomo					
27. As partículas subatômicas são os prótons, nêutrons e elétrons					
28. Fogos de artifício apresentam cor devido ao fenômeno da incandescência					
29. Um elemento químico é constituído por um conjunto de átomos com mesmo número atômico					
Sendo 1 = muito, muito baixo e 7 = muito, muito alto, responda: Qual foi o seu esforço mental para compreender o conteúdo presente no mapa conceitual?					
Usando a mesma escala anterior, responda: Qual foi o seu esforço mental para responder a esse questionário?					
Explique, em poucas palavras: Qual é a diferença entre Fogos de artifício de cor laranja e verde?					

Fonte: a autora.

5.2.3.2 Desenvolvimento dos MCs usados como material de estudo

Utilizando o mesmo conteúdo científico do pré-teste e do pós-teste, eu elaborei um MC inicial sobre a química dos fogos de artifício (APÊNDICE 4). Durante as sessões individuais de validação com as professoras especialistas, também foram discutidas a pertinência, validade e limitações dos conceitos e proposições desse MC. Após as sugestões de melhoria, o conteúdo do MC final aplicado como material instrucional (APÊNDICE 5) apresentou uma estrutura cíclica contendo 30 conceitos e 35 proposições, que responde à pergunta focal: *“Por que os fogos de artifício têm cores?”* declarada acima do MC. Essa estrutura remete a um processo sistêmico (Safayeni, Derbentseva & Cañas, 2005) que explica um fenômeno macroscópico (cor dos fogos de artifício) a partir dos modelos atômicos, da luminescência e incandescência.

A produção dos MCs coloridos (APÊNDICES 6 e 7) considerou a adição da mesma cor às caixinhas considerando a proximidade visual de conceitos²⁰ pertencentes à mesma área de conhecimento, sendo:

- Os componente dos fogos de artifício e processo de queima (**conceitos em azul**).
- O modelo para estrutura atômica descrita por Rutherford-Böhr (**conceitos em verde**).
- A organização da eletrosfera em níveis e subníveis de energia além da possibilidade e absorção de energia quantizada (**conceitos em amarelo**).
- O espectro eletromagnético e os fenômenos de luminescência e incandescência que resultam em fogos de artifício com diferentes cores (**conceitos em rosa**).

Nos MCs com numeração nas proposições (APÊNDICES 7 e 8), a sequência de leitura obedeceu a uma ordem que vai dos conceitos mais simples, gerais e que remetem ao nível macroscópico (e.g., queima), aos conceitos mais complexos, específicos e que remetem ao nível submicroscópico (e.g., espectro eletromagnético).¹⁹ Os MCs preto e branco foram produzidos removendo a cor interna das caixinhas dos conceitos (APÊNDICES 4 e 8). O MC com cor e com número utilizado como material instrucional na condição experimental CCCN pode ser visto na Figura 24.

²⁰ O uso de cores para destacar a proximidade visual de conceitos foi pautado na Teoria Gestalt (Wertheimer, 1938, 1958). Essa teoria estuda os mecanismos da percepção visual e o uso de estímulos sensoriais (e.g., similaridade, proximidade, cores) para auxiliar na seleção de elementos importantes. Essa teoria é amplamente aplicada no *design*, arquitetura, psicologia e educação. A numeração nas proposições obedeceu ao efeito do simples-ao-complexo descrito pela TCC para gestão da CG intrínseca (i.e., partição da complexidade inerente ao conteúdo apresentado).

Figura 24. Estudo I - MC com cor e com número utilizado como material instrucional na condição experimental CCCN. **Fonte:** a autora.

5.2.3.3 Medidas de esforço mental

Desenvolvida, validada e aplicada por Paas (1992) e Paas, van Merriënboër & Adam (1994), a escala psicométrica convida os alunos a declararem o esforço mental subjetivo envolvido em determinada tarefa. Essa escala de classificação baseia-se na ideia de que os alunos podem efetivamente se autoavaliar e reportar quão persistentemente ele teve que “trabalhar” para atingir o seu nível de desempenho na tarefa. Algumas pesquisas mostram (e.g., Gopher & Braune, 1984; Paas & van Merriënboër, 1993; Tindall-Ford, Chadler, & Sweller, 1997) que os alunos podem facilmente atribuir valores numéricos ao seu esforço mental imposto durante a tarefa e que essa medida subjetiva se correlaciona com medidas objetivas de carga mental (e.g., através de medidas fisiológicas, tais como batimento cardíaco, quantidade de suor na palma da mão, dilatação das pupilas e rastreamento do olhar).

No Estudo I, as medidas de esforço mental foram coletadas logo após a tarefa utilizando três perguntas:

- Qual foi o seu esforço mental para responder a esse questionário [pré-teste]?
- Qual foi o seu esforço mental para compreender o conteúdo presente no MC?
- Qual foi o seu esforço mental para responder a esse questionário [pós-teste]?

Os alunos deveriam utilizar uma escala de Likert 7-níveis projetada para traduzir o valor numérico ao esforço mental em cada uma das tarefas, sendo *1 = muito, muito baixo*; *2 = muito baixo*; *3 = baixo*; *4 = nem baixo, nem alto*; *5 = alto*; *6 = muito alto*; *7 = muito, muito alto*.

5.2.4 Procedimento de análise dos dados

5.2.4.1 Conhecimento factual e conceitual dos alunos

O conjunto de declarações do pré-teste e do pós-teste avaliou o conhecimento factual dos alunos. Julgar cada assertiva corretamente exigiu informações apresentadas em uma única área de conhecimento (descritas na seção 5.2.3.2). Para atribuição da nota, foi verificada a qualidade do julgamento dado pelo aluno. Por exemplo, a afirmação *Fogos de artifício apresentam cor devido à presença de corantes em sua composição* está incorreta. Se o aluno marcasse “discordo” (plenamente ou parcialmente) dessa afirmação, ele receberia pontos positivos por

isso. Se ele marcou “discordo plenamente” ele recebeu +2 pontos e se ele marcou discordo parcialmente ele recebeu +1 ponto. Nesse caso, o aluno teria algum tipo de incerteza em seu conhecimento factual que o impediu de declarar com confiança a incorreção nessa assertiva. Essa dúvida faz com que ele deixe de ganhar a pontuação máxima atribuída a essa afirmação.

De modo análogo, se na afirmação correta, *Elétrons podem absorver energia quantizada*, o aluno assinalou “discordo” (parcialmente ou totalmente) ele foi penalizado por esse julgamento, sendo atribuído um valor negativo a essa afirmação. Se ele assinalou “discordo totalmente” ele foi penalizado em -2 pontos, enquanto para o “discordo parcialmente” o valor foi de -1 ponto. A alternativa “não sei ou não quero responder” não foi contabilizada para a nota total do questionário (i.e., foi atribuído um valor zero). A soma dos valores de todos os julgamentos feitos pelo aluno gerou a sua nota no pré e pós-teste, variando na escala original de -15 a +15, transformados em uma escala de nota de 0 a 10.

A pergunta dissertativa *Qual é a diferença entre os fogos de artifício de cor laranja e verde?* avaliou o conhecimento conceitual dos alunos. Responder a esta pergunta corretamente exigiu uma combinação de informações apresentadas em todas as quatro áreas do conhecimento presentes no MC (descritas na seção 5.2.3.2).

As respostas dos alunos foram classificadas em categorias e subcategorias (Tabela 7), revelando um nível progressivo de compreensão sobre o fenômeno dos fogos de artifício, desde as respostas em branco, os erros conceituais, passando pelas respostas mais ingênuas (e.g., por causa da composição dos fogos) até as respostas mais complexas e elaboradas (e.g., por conta da emissão de luz correspondente às radiações no espectro visível). Segundo Wang & Barrow, (2013), quando os alunos migram de um alto nível de conhecimento no tema para um baixo nível de conhecimento, a qualidade do poder explicativo fornecido em suas respostas entra em declínio. Por isso, espera-se que o sistema de categorização adotado para classificação das respostas seja capaz de revelar o nível de entendimento conceitual dos alunos sobre o tema em questão.

Dois pesquisadores independentes classificaram as respostas com uma análise de concordância entre avaliadores, Cohen de Kappa de 0,69 (acordo substancial) para o pré-teste e 0,63 (acordo substancial) para o pós-teste (Landis & Koch, 1977). Conflitos identificados na classificação foram resolvidos antes de se reportar aos resultados obtidos.

Tabela 7. Estudo I - categorias e subcategorias definidas e exemplificadas para análise das respostas dos alunos à questão dissertativa do pré-teste e do pós-teste.

Categoria	Subcategoria	Código	O aluno declara que a causa das cores nos fogos de artifício se deve:	Exemplo
Ausente	Em branco	EB	Resposta em branco.	-
	Não sei	NS	Não sabe a resposta.	“Não tenho a mínima ideia”
Erros Conceituais		EC	A algum fenômeno que não condiz com o conhecimento científico ou referente a uma declaração confusa.	“Fogos de artifício é o mesmo que combustão de átomos químicos”
Composição Química	Composição	CQ	À composição química ou a substância presente nos fogos.	“A substância química que os compõe”
	Elemento químico	EQ	Ao elemento químico presente nos fogos ou em sua composição.	“A diferença está no uso de diferentes tipos de elementos químicos”
Transição eletrônica	Nível de energia	NE	Aos níveis/subníveis de energia ou a diferença entre eles quando absorvem calor.	“Os níveis de energia em que cada elétron estão antes e depois da queima”
	Absorção/emissão de luz	EL	À absorção de energia e/ou emissão de luz, energia ou cor. Pode ou não haver menção sobre elétrons e energia quantizada.	“Depende da energia quantizada liberada”
	Espectro eletromagnético	EE	A algum fenômeno que envolva excitação eletrônica, luz emitida e sua correspondência ao espectro eletromagnético, podendo ou não mencionar o visível. Ao fenômeno da luminescência e/ou incandescência.	“A energia emitida sob a forma de luz visível é diferente, assim a frequência e o comprimento de onda no espectro luminoso correspondem a uma cor diferente”

Fonte: a autora.

5.2.4.2 Ganho de conhecimento factual e medidas de esforço mental

O ganho de conhecimento factual também foi determinado para cada grupo experimental dado pela diferença entre a nota no pós-teste e pré-teste. A média e o desvio-padrão do esforço

mental percebido pelos alunos em cada tarefa também foram calculados e comparados entre os grupos.

5.2.4.3 Eficiência da instrução

Uma análise adicional foi conduzida combinando a média do desempenho (D) dos alunos considerando o ganho de conhecimento factual e a média do esforço mental (EM) para compreender o conteúdo do MC, ambos transformados na escala normalizada Z.²¹ Paas e van Mirrenböer (1993) definem essa abordagem como Eficiência da Instrução (E), sendo calculada conforme a Equação 1 a seguir:

$$E = \frac{D - EM_{MC}}{\sqrt{2}} \quad (\text{Equação 1})$$

Esta abordagem assume uma hipotética condição de base em que cada unidade de esforço mental investido (EM) resulte em uma unidade de desempenho (D). Como pode ser observado a partir da fórmula, o valor de E pode ser positivo ou negativo dependendo da combinação entre D e EM. Se o desempenho for maior do que o esperado, com base nas medidas de esforço mental (i.e., $D > EM$), o valor de E será positivo, o que significa que a condição de instrução avaliada tem uma eficiência relativamente alta. Por outro lado, se o esforço mental investido na tarefa for inferior ao esperado, considerando as medidas de desempenho (i.e., $D < EM$), o valor de E será negativo, o que significa que a condição de instrução tem uma eficiência relativamente baixa. Os valores de E podem ser visualmente espalhados em torno de uma diagonal quadrada (i.e., $\sqrt{2}$), levando em consideração as médias dos valores de D e EM como pontos cartesianos (x e y) em um gráfico 1 x 1.

²¹ Para obter os valores de desempenho e esforço mental em escala Z (ou *Z-score*), procede-se a normalização dos dados, ou seja, cada valor da amostra é subtraído da média da população e dividido pelo desvio-padrão da população. Com isso é obtido um valor normalizado em função do comportamento da população, variando de -1 a +1.

5.2.4.4 Análises quantitativas (estatísticas) e qualitativas (categorias)

Primeiramente, as médias e desvios-padrão foram obtidos para cada grupo experimental considerando as variáveis dependentes em análise. Em seguida, conduziu-se a ANOVA de fator único com repetição de fator, seguida de testes-t independentes, com auxílio do programa SPSS 22.0 (IBM, EUA) e nível de significância 0,05. Foi analisado o impacto da adição de dicas gráficas no desempenho dos alunos no pós-teste (conhecimento factual), no ganho de conhecimento factual, nas medidas de esforço mental e de eficiência da instrução.

Em seguida, uma análise qualitativa foi realizada a partir da classificação às respostas dos alunos à pergunta dissertativa (conhecimento conceitual), tendo sido analisados: (1) os principais erros e dificuldades conceituais dos alunos identificados no pré-teste (conhecimento prévio) e (2) se o nível de compreensão sobre o fenômeno dos fogos de artifício diminuiu, se manteve ou aumentou após o período de estudo com os diferentes tipos de MCs. Uma abordagem similar foi adotada por Benarroch (2000). As respostas de alguns alunos (identificados pela letra A e seu número sequencial dado pela ordem alfabética) são fornecidas para exemplificar os padrões encontrados, mantendo-se o anonimato dos participantes conforme orientações éticas para pesquisas com seres humanos.

5.3 Resultados e discussões

5.3.1 Os resultados de aprendizagem e o esforço mental durante a tarefa

As medidas de desempenho e esforço mental para cada condição experimental estão reunidas na Tabela 8. O teste ANOVA de fator único mostrou que não houve diferença significativa quando se compara as condições experimentais²² tanto no desempenho dos alunos

²²A comparação das médias de duas variáveis independentes (i.e., quando os participantes só estão presentes em apenas uma das condições experimentais) é feita por meio do teste-t independente de *Student*. Quando a média das duas variáveis é comparada para o mesmo grupo de participantes conduz-se o teste-t pareado. A comparação de três ou mais médias independentes é feita por meio da ANOVA um fator, e, na presença de uma covariável que interfira nos resultados medidos requer a comparação por meio da ANCOVA. A ANOVA 2 fatores deve ser realizada quando existem duas (ou mais) variáveis independentes a serem testadas, sendo possível analisar a

no pré-teste $F(3,77) = 1,06$, $p = 0,36$ como no pós-teste $F(3,77) = 0,38$, $p = 0,76$. Em relação ao ganho de conhecimento, a ANOVA mostra uma diferença marginal entre os grupos $F(3,77) = 2,78$, $p = 0,08$.

Tabela 8. Estudo I - médias (desvio-padrão) do desempenho e esforço mental em cada condição experimental. A eficiência da instrução é calculada a partir da combinação do ganho de conhecimento e esforço mental em escala normalizada.

	Sem cor (SC)		Com cor (CC)	
	Sem número (SN)	Com número (CN)	Sem número (SN)	Com número (CN)
Participantes	21	20	22	22
Conhecimento factual				
Pré-teste	7,13 (1,24)	6,45 (1,30)	6,75 (1,28)	6,84 (1,33)
Pós-teste	8,65 (0,26)	8,59 (1,02)	8,87 (0,74)	8,64 (1,08)
Ganho de conhecimento	1,52 (0,98)	2,14 (1,06)	2,13 (1,08)	1,62 (1,36)
Esforço Mental				
Pré-teste	4,00 (1,34)	4,15 (0,67)	4,25 (0,97)	4,41 (0,96)
Pós-teste	3,20 (1,44)	3,75 (1,16)	3,33 (1,39)	3,67 (1,20)
Mapa conceitual	3,62 (1,63)	3,85 (1,49)	3,38 (1,32)	3,84 (1,34)
Eficiência da Instrução				
Desempenho	- 0,26	- 0,48	+ 0,72	- 0,02
Esforço Mental	+ 0,24	- 0,25	- 0,13	+ 0,19
Eficiência	- 0,35	- 0,16	+ 0,60	- 0,12

Fonte: a autora.

Também não houve diferença estatística significativa entre as condições experimentais no que diz respeito ao esforço mental percebido pelos alunos, tanto para responder ao questionário do pré-teste $F(3,77) = 0,61$, $p = 0,61$, como do pós-teste $F(3,77) = 0,83$, *ns* ou mesmo para compreender o conteúdo do MC, $F(3,77) = 0,48$, *ns*. Entretanto, ao realizar o teste-

interferência de uma sobre a outra (análise da interação). Em todas essas análises, o resultado obtido é reportado por meio do valor de *t* ou *F* seguido dos graus de liberdade (que depende do tamanho das amostras comparadas). A interpretação do resultado é feita por meio da análise do valor-*p*. Se o valor-*p* for maior que 0,05 (5% do limite de confiança), isso indica que as médias comparadas são estatisticamente iguais, também indicado por um *ns* (não significativo). Quando o valor-*p* for menor que 0,05, as médias comparadas são estatisticamente diferentes. Os valores de eta parcial quadrado (η^2), obtidos para ANOVA e ANCOVA, complementam essa interpretação fornecendo o efeito do tamanho (*effect size*), ou seja, quão diferente essas médias são. Quanto mais próximo de 1,0 maior o efeito do tamanho.

t pareado para comparação de médias entre variáveis dentro do mesmo grupo experimental, o esforço mental declarado para responder ao pré-teste foi significativamente maior do que para compreender o conteúdo do MC $F(3,77) = 3,31$ $p < 0,001$ e para responder ao pós-teste $F(3,77) = 3,99$, $p < 0,001$. Isso mostra que a etapa de externalização dos conhecimentos prévios, solicitados na tarefa de pré-teste, demanda um esforço cognitivo maior do que ler todo o conteúdo semântico organizado espacialmente (MC) ou mesmo recuperar as informações após um curto prazo de tempo (pós-teste).

Para avaliar o efeito da adição de dicas gráficas ao MC, foram realizados sucessivos testes-t independentes para comparar a média e os desvios-padrão entre os pares de condições experimentais considerando apenas o ganho de conhecimento factual. Quando se compara o MC preto e branco (SCSN) com aquele colorido (CCSN) percebe-se que os alunos apresentam melhor desempenho quando se adiciona ao MC a dica gráfica “cor” $t(41) = 1,95$, $p < 0,05$. De modo análogo, quando comparado o MC sem numeração (SCSN) àquele com a sugestão de sequência de leitura pela numeração (SCCN) é possível inferir que os alunos apresentam melhor desempenho quando se adiciona a dica gráfica “número” $t(39) = 1,94$, $p < 0,05$.

Por outro lado, quando as dicas gráficas “cor” e “número” são adicionadas simultaneamente ao material instrucional, o desempenho dos alunos fica prejudicado. Ao comparar as duas condições com MCs organizados por cor (CCSN x CCCN), os alunos apresentam maior ganho de conhecimento quando só há uma dica gráfica $t(42) = 1,39$, $p < 0,10$. Da mesma forma, ao comparar as duas condições dos MCs com número nas proposições (SCCN x CCCN) novamente os alunos têm melhor desempenho quando o MC só apresenta uma dica gráfica, $t(40) = 1,37$, $p < 0,10$.

Com base em todos os dados apresentados, pode-se afirmar que, em termos de ganho de conhecimento, os piores cenários são aqueles em que se submete o aluno a estudar com um MC sem qualquer dica gráfica (SCSN) ou com as duas dicas gráficas simultaneamente (CCCN), sendo essas condições igualmente ruins, $t(41) = 0,273$, *ns*. Enquanto isso, os melhores cenários são aqueles em que se oferece ao aluno um agrupamento espacial de conceitos similares utilizando cor (CCSN), ou uma sugestão de leitura numerando as proposições (SCCN), sendo esses estatisticamente iguais $t(40) = 0,02$, *ns*.

5.3.2 Análise da eficiência da instrução

A análise da eficiência da instrução (E), visualizada no gráfico da Figura 25, nos permite incluir a segunda variável, esforço mental, à análise de desempenho dos alunos, interpretados segundo uma curva normal reduzida (curva Z), isto é, média 0 e desvio-padrão ± 1 .

Figura 25. Estudo I - gráfico de eficiência da instrução em função das médias normalizadas de desempenho e esforço mental. Apenas o MC com cor e sem número (CCSN) teve uma eficiência positiva, i.e., gerou um alto ganho de conhecimento com baixo esforço mental. **Fonte:** a autora.

Conforme discutido anteriormente, as condições de instrução CCSN e SCCN são igualmente boas. Entretanto, quando calculamos os valores de E, percebemos que a condição CCSN é a única que apresenta alta eficiência ($E > 0$, no caso $E = + 0,60$), ou seja, os alunos apresentam $D \gg EM$ declarado. Já na condição SCCN os alunos também declaram um baixo

EM, porém, não há ganho de conhecimento, ou seja, $EM > D$. Como consequência, a instrução apresentará baixa eficiência ($E < 0$, no caso, $E = -0,16$).

De modo similar, havia sido discutido que as condições SCSN (nenhuma dica gráfica) e CCCN (duas dicas gráficas) eram situações igualmente ruins. Ao incluir o esforço mental nessa análise, fica claro que submeter o aluno a um estudo com MC sem nenhum tipo de dica gráfica é de fato a pior situação dentre àquelas em estudo. A mais baixa eficiência de instrução ($E = -0,35$) é verificada quando o aluno além de perceber um alto *EM* na tarefa ainda apresentará um baixo *D*, ou seja, $EM \gg D$. Já na condição CCCN, o esforço mental é ligeiramente menor e o aluno tem seu desempenho ao redor da média da população, ou seja, $EM > D$, pois $D \approx 0$. Durante a navegação do MC sem qualquer dica aumenta a probabilidade de o aluno sofrer desorientação, levando ao problema de construção de um “caminho” pelas proposições simultaneamente à representação mental desse conteúdo (Cress & Knabel, 2003).

O padrão de interação das duas variáveis sugere que a adição de cor, como forma de agrupar conceitos similares, aumenta a eficiência da instrução com o uso dos MCs. Entretanto, esse aumento é extraordinariamente maior quando não há a superposição com a outra dica gráfica, isto é, a numeração das proposições usada como sugestão de ordem de leitura. Apesar de cor e número serem duas potenciais dicas gráficas de navegação, elas oferecem condições assimétricas para promover ganhos de conhecimento. Levantamos duas possíveis explicações para tal resultado.

A primeira explicação reside na Teoria da Dupla Codificação de Paivio (1990), à qual afirma que informações visuais e verbais são processadas de formas distintas pela MT. O MC apresenta informações verbais, de caráter semântico, em uma organização visual, diagramática. A adição de cor aos conceitos seria processada visualmente, sem comprometer o espaço da MT destinado a processar o conteúdo a ser aprendido. Já os números precisariam ser processados sequencialmente junto com os conceitos e proposições, ocupando um espaço importante da MT, comprometendo a aprendizagem e, portanto, prejudicando o desempenho dos alunos na tarefa.

Estudos com organizadores gráficos similares aos MCs encontraram resultados semelhantes. Hall & Sidio-Hall (1994a, 1994b) identificaram que alunos que estudaram um mapa conceitual com cor para indicar conceitos relacionados lembraram mais informação do que aqueles que estudaram o mapa preto e branco. Wallace et al. (1998) também demonstraram que incorporar princípios Gestalt (como proximidade e cor) durante a elaboração de um mapa conceitual auxiliou os alunos a recuperarem mais informações após o período de aprendizagem.

A segunda explicação reside no efeito do simples-ao-complexo da TCC. O uso da cor permitiu que o aluno pudesse processar as informações de modo seriado, ou seja, há uma visão parcial do conteúdo em uma lógica que vai dos conteúdos mais simples ao mais complexo, sem perder de vista como essas partes estão inter-relacionadas para formar a visão do todo. A possibilidade de fazer uma gestão mais eficiente da CG intrínseca diminuiu a desorientação causada pelo MC, permitindo maior integração do conteúdo. Pollock, Chandler e Sweller (2002) intencionalmente reduziu a complexidade de um material instrucional apresentando seu conteúdo como elementos isolados de informação. Essa pesquisa mostrou que os estudantes aprenderam mais profundamente quando processaram a informação de modo seriado e sequencial do que simultaneamente e de uma só vez.

5.3.3 Análise do conhecimento conceitual dos alunos antes e após o período de estudo

A partir da categorização das respostas dos alunos à questão dissertativa foi possível identificar como o padrão de respostas dos alunos mudou após o estudo com os MCs. Em um primeiro momento o que se percebe é que, independentemente da condição experimental, a frequência de alunos que deixaram respostas em branco (EB) ou que declararam não saber a resposta à pergunta dissertativa (NS) diminuiu de 21% para 7% após a intervenção. Vale ressaltar que dos 18 alunos que passaram a fornecer algum tipo de resposta no pós-teste (i.e., migraram de um EB/NS para outra categoria), nenhum deles se configurou em um erro conceitual (EC).

Os EC que antes somavam 15% caíram para 6% pós-estudo com o MC (independentemente da presença ou não de dicas gráficas). Analisando mais de perto as 13 concepções prévias errôneas dos alunos (EC no pré-teste) é possível inferir que:

- 39% dos alunos utilizam de modo incorreto os aspectos reacionais para explicar as diferentes cores nos fogos de artifício. Isso pode ser visto nas respostas dos alunos quando justificam que a diferença está:

A68: No elemento químico usado como combustível.

A21: Na composição diferente dos fogos que leva às reações de combustão diferentes.

A57: Nos elementos químicos que quando explodem apresentam cor.

- 23% atribuem à presença de corantes as diferenças nas cores. Por exemplo, nas respostas explícitas ou implícitas de, respectivamente:

A28: Os corantes na composição de cada um [dos diferentes tipos de fogos de artifício].

A75: Presumo que a pólvora utilizada contenha cores distintas.

- 23% relacionam erroneamente às diferenças das cores nos fogos de artifício com o nível/subnível de energia, como, por exemplo, se verifica na resposta de:

A47: A diferença está na velocidade com a qual se propaga a energia nos subníveis.

A61: Apresentam diferenças em suas eletrosferas.

- 8% justificam com algo que se relaciona à emissão de luz, porém, ainda de modo incorreto, como é o caso de:

A60: A diferença está na quantidade de luz infravermelha liberada.

- 8% utilizam o modelo incorreto para explicar o fenômeno. No caso desse aluno, há uma confusão entre o modelo de solvatação de cátions metálicos, onde a solução de cobre (contendo íons Cu^{2+}) é azul, e o modelo atômico de Böhr e a excitação eletrônica do cobre, que gerariam cor esverdeada nos fogos de artifício.

A18: O elemento que compõe cada um deles define a sua cor (ex. íons cobre é azul).

De modo geral, pode-se dizer que os EC prévios à intervenção estão diretamente relacionados à aplicação incorreta do modelo atômico cientificamente aceito para explicar o fenômeno macroscópico, ou seja, o modelo de Böhr-quântico. A maioria dos alunos também atribui à substância a coloração e não aos elementos que a compõem em função da excitação eletrônica, corroborando com os resultados encontrados por outros autores já citados no Capítulo 2, tais como Ben-Zvi, Eylon & Silberstein (1986), França, Marcondes & Carmo (2009), Taber (2013) e Melo e Lima Neto (2013).

Segundo Pozo & Crespo, (2006), quando os alunos migram de um baixo nível de conhecimento no tema (i.e., ideias de senso comum) para um alto nível de conhecimento (i.e., conhecimento científico), a qualidade do poder explicativo fornecido em suas respostas entra em ascensão. Por isso, era esperada que a complexidade das respostas dos alunos fosse aumentar após o estudo com MC (devido a um aumento no conhecimento conceitual), fazendo migrar as explicações de concepções de senso comum (CQ), passando pelo conhecimento

químico superficial (EQ) para concepções científicas mais elaboradas (NE), que envolvam a interação entre a luz e a matéria (EL) e sua relação com o espectro eletromagnético (EE). De modo geral, percebe-se que isso ocorre com todos os grupos, com exceção daquele sem dicas gráficas.

- Após o estudo com MCs CCCN, 77% dos alunos tiveram suas respostas categorizadas em um nível explicativo acima. Esse é o caso do aluno 37:

A37 (antes do estudo): A diferença entre os fogos está na composição química destes (CQ).

A37 (depois do estudo): As cores nos fogos de artifício podem ser diferenciadas pelos elementos químicos que geram um fenômeno de luminescência e incandescência (EL).

- No caso dos MCs SCCN, 60% dos alunos tiveram suas respostas categorizadas em pelo menos um nível explicativo acima. Isso pode ser verificado na resposta do aluno 43:

A43 (antes do estudo): A diferença está na quantidade de energia fornecida para a excitação do elétron para que ele mude de nível (NE).

A43 (depois do estudo): A diferença está na energia absorvida pelos elétrons, pois essa energia pode fazer com que eles mudem de nível de energia, e, ao retornar, os elétrons a liberam em forma de luz, que, quando na região do visível, possuem cor (EE).

- Para os MCs CCSN, 36% dos alunos tiveram suas respostas categorizadas em pelo menos um nível explicativo acima, sendo que a maioria dos alunos, 59%, mantiveram o nível explicativo. Isso ocorreu de forma categórica com o aluno já mencionado 75:

A75 (antes do estudo): Presumo que a pólvora utilizada contenha cores distintas (EC).

A75 (depois do estudo): Fogos de cor laranja geram espectros eletromagnéticos na região do visível diferente daqueles que são de cor verde (EE).

- Um padrão diferente foi observado no grupo que estudou com o MC SCSN. A maioria dos alunos manteve seu nível explicativo (57%) ou diminuiu de nível (29%). Esse é o caso do aluno 04:

A04 (antes do estudo): A diferença pode ser explicada pela liberação de energia em forma de luz (EL).

A04 (depois do estudo): A diferença é devido aos elementos químicos presentes em cada um dos fogos de artifício (EQ).

5.4 Conclusões do Estudo I

Com base nos resultados apresentados foi possível concluir que independentemente do tipo de MC utilizado como material de estudo, todos os alunos tiveram um ganho de conhecimento factual e um aumento na capacidade de explicar o fenômeno das cores nos fogos de artifício. Porém, o MC sem nenhuma dica gráfica gerou os menores ganhos de conhecimento com maior esforço mental quando comparada às demais condições experimentais.

A adição de cor aos conceitos do MC como forma de agrupar visualmente a mesma área de conhecimento químico gerou um efeito positivo nos resultados de aprendizagem. Os alunos que estudaram os MCs coloridos tiveram maiores ganhos de conhecimento factual e conceitual do que os alunos que estudaram os MCs preto e branco, confirmando a Hipótese 1a. Porém, em termos absolutos, não houve um efeito no esforço mental declarado pelos alunos, refutando a Hipótese 1b. De forma análoga, a adição de números nas proposições do MC como forma de oferecer uma sequência de leitura gerou um efeito positivo nos resultados de aprendizagem. Os alunos que estudaram os MCs com numeração tiveram maiores ganhos de conhecimento factual e conceitual do que os alunos que estudaram os MCs sem a numeração, confirmando a Hipótese 1c. Porém, em termos absolutos, não houve um efeito no esforço mental declarado pelos alunos, refutando a Hipótese 1d. Assim como já constatado por Beege et al. (2017), o efeito da dica gráfica (*cueing effect*) foi positivo para os resultados de aprendizagem, mas sem efeito para as medidas de carga cognitiva (e.g., esforço mental).

Outras duas informações complementam os resultados obtidos e ajudam a responder à pergunta do Estudo I. Igualmente ruim a não apresentar nenhuma dica gráfica, foi apresentar as duas dicas simultaneamente no MC. Há evidências de que o uso de dicas gráficas (cor ou número) diminui a desorientação causada pelo MC, melhorando os resultados de aprendizagem. Porém, quando uma dica gráfica está presente, a outra se faz desnecessária. Considerando a análise da eficiência da instrução, apenas a cor se mostrou com alta eficiência, ou seja, gerou ganhos de conhecimento combinados ao baixo esforço mental, quando comparada às demais condições. A cor auxiliou os alunos na gestão da CG intrínseca (particionando o conteúdo) sem gerar um aumento de CG extrínseca (devido aos aspectos visuais). Em contrapartida, a numeração diminuiu a CG extrínseca ao oferecer um guia para navegação do conteúdo, mas aumentou a CG intrínseca devido à característica semântica do mesmo.

CAPÍTULO 6. ESTUDO II – O EFEITO DA ESTRUTURA HIERÁRQUICA DO MAPA CONCEITUAL DE QUÍMICA

Ao contrário dos textos, os MCs não possuem um fluxo único de leitura convencionalmente determinado. Isso ocorre devido a uma estrutura não linear e flexível característica desse tipo de organizador gráfico. A princípio, como os alunos podem escolher uma das muitas possibilidades para um caminho de leitura e, conseqüentemente, adaptá-lo às suas necessidades de aprendizagem, seria plausível dizer que haveria um efeito positivo para este baixo grau de orientação de leitura. Entretanto, alguns estudos mostraram resultados exatamente opostos (e.g., Jacobson et al., 1995; Jacobson & Archodidou, 2000). Provavelmente, porque (1) não está totalmente claro como exatamente o MC deve ser estruturado para oferecer a melhor orientação visual e como isso afetará a aprendizagem e a carga cognitiva e (2) os estudantes podem não saber como escolher um caminho de leitura que os ajudará a entender e integrar o conteúdo.

Alguns estudos com rastreamento do olhar nos ajudam a compreender melhor como o aluno navega durante a leitura e estudo do MC. Por exemplo, Bisra (2007) trouxe evidências de que os participantes processaram por mais tempo os conceitos do que os termos de ligação e, na maioria dos casos, não seguiram preferencialmente a direção indicada pela seta. Nesbit, Larios & Adesope (2007) trouxeram evidências de que os alunos começaram a processar o conteúdo do MC a partir de conceitos localizados na metade superior (informações superordenadas), dando atenção precoce às regiões central e superior esquerda. Em Amadiou et al. (2009), os alunos apresentaram um padrão de leitura sistemático (de cima para baixo, da esquerda para a direita) quando estudaram o MC hierárquico, fato que não ocorreu no caso dos MCs em rede (conceitos altamente interligados). Nesses trabalhos, a forma pela qual o aluno navega (i.e., realiza a leitura) pela estrutura e conteúdo do MC está intimamente ligada aos resultados de aprendizagem, ao esforço mental percebido pela tarefa (ou mesmo às medidas subjetivas de desorientação).

Baseado na literatura é possível perceber que a estrutura de organização conceitual com a qual o conhecimento será apresentado aos alunos é crítica para garantir os melhores resultados de aprendizagem. Porém, poucos estudos exploram esse fator quando o MC é apresentado como

material de ensino. Além disso, não encontramos nenhum estudo que combinasse o tipo de estrutura com o uso associado de dicas gráficas.

No Estudo I, mostramos que a cor gerou maiores ganhos de conhecimento com menor esforço mental associado à tarefa de compreensão do conteúdo químico. No Estudo II, essa mesma variável foi testada, porém, associada a três tipos de estrutura hierárquica conceitual: a hierarquia em “árvore”, a hierarquia cíclica e a não hierárquica.

A hierarquia em “árvore” remete ao processamento natural de informação comum à maioria das línguas neolatinas (i.e., da esquerda para a direita e de cima para baixo). Segundo a TCC (Sweller, Ayres & Kalyuga, 2010) e, corroborando com a visão de Ausubel (2000), o processo de aquisição de conhecimento ocorre preferencialmente de modo hierárquico, ou seja, partindo de conceitos mais gerais que se desdobram progressivamente em conceitos mais específicos. O MC pode ser organizado para refletir essa forma de organização, a princípio, auxiliando na orientação de leitura do conteúdo (Derbentseva & Kwantes, 2014). Outras estruturas de MCs também podem ser encontradas na literatura. A estrutura cíclica, por exemplo, descrita por Safayeni, Derbentseva & Cañas (2005) diz respeito a uma representação onde se privilegia as relações de causa e consequência, típica de processos sistêmicos. Já Hay, Kinchin & Lygo-Baker (2008) mencionam que os MCs podem apresentar estruturas em formato linear, radial ou em rede, dependendo do tipo de conhecimento a ser representado. Vale ressaltar que a estrutura em rede (i.e., proveniente de uma alta conexão válida e coerente entre os conceitos), muitas vezes indicativa de um conhecimento especializado, é diferente de uma estrutura não hierárquica onde há ausência de uma organização específica, isto é, onde os conceitos são aleatoriamente dispostos na folha ou na tela, sem qualquer coerência lógica.

6.1 Objetivos, perguntas de pesquisa e hipóteses de trabalho

O objetivo do Estudo II foi avaliar o efeito da (1) organização hierárquica dos conceitos do MC nos resultados de aprendizagem e no esforço mental declarado pelos alunos durante a tarefa de compreensão do conteúdo de Química e (2) da adição da dica gráfica cor quando aliada a essa organização conceitual.

Pergunta de pesquisa do estudo #1

Qual o impacto da organização hierárquica dos conceitos do MC nos resultados de aprendizagem e no esforço mental declarado pelos alunos para compreender o conteúdo químico?

Hipóteses de trabalho associadas à pergunta #1

Se a organização hierárquica conceitual auxiliar os alunos a processar as informações contidas no MC e, portanto, for responsável por diminuir a desorientação causada pelo mesmo, espera-se que os alunos que estudarem os MCs hierárquicos (em “árvore” ou cíclico) tenham melhores resultados de aprendizagem (Hipótese 2a) e menor esforço mental (Hipótese 2b) na tarefa quando comparados aos alunos que estudarem os MCs não hierárquicos. Como o MC organizado em “árvore” remete ao processamento natural de informações pela MT (do mais geral para o mais específico) espera-se que os alunos que estudarem os MCs hierárquicos em “árvore” tenham melhores resultados de aprendizagem (Hipótese 2c) e menor esforço mental (Hipótese 2d) quando comparados aos alunos que estudarem o MC cíclico.

Pergunta de pesquisa do estudo #2

Qual o impacto de se aliar a dica gráfica “cor” aos MCs com diferentes estruturas hierárquicas nos resultados de aprendizagem e no esforço mental declarado pelos alunos para compreender o conteúdo químico?

Hipóteses de trabalho associadas à pergunta #2

Se a dica gráfica “cor” permitir maior processamento de informações pela MT, independentemente da estrutura hierárquica do MC, espera-se que os alunos que estudarem os MCs coloridos tenham melhores resultados de aprendizagem (Hipótese 2e) e menor esforço mental (Hipótese 2f) quando comparados aos seus análogos preto e branco. Se a “cor”, de alguma forma, interferir no processamento de informação que *a priori* já está organizada hierarquicamente, não serão observados incrementos no conhecimento ou diminuição do esforço mental associado à tarefa.

6.2 Materiais e métodos

6.2.1 Contexto, participantes e planejamento experimental

A condução do Estudo II ocorreu no 1º semestre de 2015 e contou com a participação de 92 alunos ingressantes à EACH/USP matriculados na disciplina CN. O delineamento quase-experimental resultou em seis condições experimentais (Figura 26).

Figura 26. Estudo II - planejamento quase-experimental 2 (dica gráfica cor: ausente vs. presente) X 3 (tipo de organização conceitual: hierárquica em “árvore”, cíclica ou não hierárquica), resultando em seis possíveis MCs a serem usados como material de estudo.

Os alunos foram alocados em uma das condições experimentais, tendo acesso aos MCs preto e branco e com hierarquia em “árvore” (SCHA), hierarquia cíclica (SCHC) e sem nenhum tipo de hierarquia conceitual (SCNH) ou, ainda, a um dos seus análogos com cor e hierarquia em “árvore” (CCHA), hierarquia cíclica (CCHC) ou não hierárquicos (CCNH).

6.2.2 Procedimento de coleta de dados

O procedimento de coleta de dados do Estudo II (Figura 27) seguiu o mesmo padrão de sequência e tempo conduzidos no Estudo I (ver seção 5.2.2).

Figura 27. Estudo II - procedimento de coleta de dados com os tempos despendidos em cada etapa.

Em resumo, os alunos assinaram o TCLE, responderam ao pré-teste, declararam o esforço mental relativo ao pré-teste, realizaram o período de estudo com o MC (de acordo com as particularidades da **Figura 27**), responderam ao pós-teste, declararam o esforço mental para compreender o conteúdo do MC e para responder ao pós-teste. Todo o procedimento de coleta de dados foi feito em sala de aula em um tempo total aproximado de 60 minutos.

6.2.3 Materiais

Os materiais utilizados no Estudo II foram os questionários aplicados como pré-teste e pós-teste, os MCs usados como material de estudo e a escala para declaração do esforço mental nas tarefas.

6.2.3.1 Questionários validados usados como pré-teste e pós-teste

Como o conteúdo dos Estudos I e II são iguais, os questionários usados como pré-teste e pós-teste no Estudo II foram os mesmos desenvolvidos, validados e aplicados no Estudo I (ver seção 5.2.3.1).

6.2.3.2 Desenvolvimento dos MCs usados como material de estudo

Para produzir os MCs com diferentes tipos de estrutura conceitual, partiu-se do MC preto e branco com estrutura hierárquica cíclica utilizada no Estudo I (APÊNDICE 5). Em seguida, os conceitos foram organizados hierarquicamente em um formato “em “árvore”” (APÊNDICE 9), ou seja, partindo-se do conceito mais geral e abrangente no topo do MC (e.g., fogos de artifício e queima) e tendo seu detalhamento em níveis hierárquicos subordinados a ele, resultando em conceitos específicos (e.g., espectro visível, incandescência) localizados na base do MC. Para produzir os MCs não hierárquicos (APÊNDICE 10), os conceitos foram embaralhados de modo a remover qualquer tipo de organização hierárquica, porém, mantendo-se o conteúdo (conceitos e proposições) igual aos demais MCs.

A produção dos MCs coloridos foi feita considerando a mesma lógica do Estudo I, ou seja, os conceitos com caixinhas coloridas em azul, verde, amarelo e rosa, remetem a um conteúdo de mesma área de conhecimento conforme descrito em detalhes na seção 5.2.3.2. Os MCs originais coloridos com hierarquia conceitual em “árvore” e não hierárquico podem ser vistos nos APÊNDICES 11 e 12, respectivamente.

6.2.3.3 Medidas de esforço mental

As medidas de esforço mental associadas às tarefas de responder ao pré-teste, pós-teste e compreender o conteúdo do MC foram coletadas utilizando as mesmas perguntas e a mesma escala de 7-níveis (*1 = muito, muito baixo; 7 = muito, muito alto*) descritas e aplicadas no Estudo I (ver seção 5.2.3.3).

6.2.4 Procedimento de análise dos dados

6.2.4.1 Conhecimento factual e conceitual dos alunos

As análises do conhecimento factual e conceitual dos alunos no Estudo II foram conduzidas considerando o mesmo procedimento descrito para o Estudo I (ver seção 5.2.4.1). Dois pesquisadores independentes classificaram as respostas dos alunos às questões dissertativas do pré e pós-teste, sendo verificado uma análise de concordância entre avaliadores, Cohen de Kappa de 0,73 (acordo substancial) para o pré-teste e 0,68 (acordo substancial) para o pós-teste (Landis & Koch, 1977). Conflitos identificados na classificação foram resolvidos antes dos resultados obtidos serem reportados.

6.2.4.2 Ganho de conhecimento factual e medidas de esforço mental

As análises do ganho de conhecimento factual (dado pela diferença entre o desempenho no pós-teste e pré-teste) e das medidas de esforço mental do Estudo II foram conduzidas utilizando o mesmo protocolo adotado no Estudo I, conforme descrito em detalhes na seção 5.2.4.2.

6.2.4.3 Análise da eficiência da instrução

A análise de eficiência da instrução do Estudo II foi conduzida utilizando o mesmo protocolo adotado no Estudo I, conforme descrito em detalhes na seção 5.2.4.3. Em resumo, a média do desempenho (D) dos alunos, dado pelo ganho de conhecimento conceitual e a média do esforço mental (EM) relativo à tarefa, ambas transformadas em escala Z, foram combinadas em uma única medida chamada eficiência da instrução (Equação 1) e usadas como pontos cartesianos x e y distribuídos ao longo da linha diagonal de um quadrado 1×1 .

6.2.4.4 Análises quantitativas (estatísticas) e qualitativas (categorias)

Primeiramente, as médias e desvios-padrão foram obtidos para cada grupo experimental considerando as variáveis dependentes em análise. Em seguida, conduziu-se a ANOVA 2 (adição de dicas gráficas) X 3 (tipo de hierarquia conceitual) com repetição do último fator, seguida de testes-t independentes, com auxílio do programa SPSS 22.0 (IBM, EUA) e nível de significância 0,05. No caso do Estudo II, o nível de conhecimento prévio foi identificado como uma covariável e incluída durante a ANCOVA. Foi analisado o impacto da adição da dica gráfica cor e do tipo de hierarquia conceitual no desempenho dos alunos no pós-teste (conhecimento factual), no ganho de conhecimento factual, nas medidas de esforço mental e de eficiência da instrução.

Em seguida, uma análise qualitativa foi realizada a partir da classificação às respostas dos alunos à pergunta dissertativa (conhecimento conceitual), tendo sido analisados: (1) os principais erros e dificuldades conceituais dos alunos identificados no pré-teste (conhecimento prévio) e (2) se o nível de compreensão sobre o fenômeno dos fogos de artifício diminuiu, se manteve ou aumentou após o período de estudo com os diferentes tipos de MCs. As respostas de alguns alunos (identificados pela letra A e seu número sequencial dado pela ordem alfabética) são fornecidos para exemplificar os padrões encontrados, mantendo-se o anonimato dos participantes conforme orientações éticas para pesquisas com seres humanos

6.3 Resultados e discussões

6.3.1 Os resultados de aprendizagem e o esforço mental durante a tarefa

As medidas de desempenho e esforço mental para cada condição experimental estão reunidos na Tabela 9. O teste ANOVA mostrou que não há diferença significativa quando compara-se as condições experimentais tanto no desempenho dos alunos no pré-teste $F(5,84) = 1,84$ como no pós-teste $F(5,84) = 1,47$. O teste de homogeneidade de Levene $F(5,84) = 0,504$, $p = 0,77$ confirma que os alunos possuem o mesmo conhecimento prévio no tema, podendo ser considerado uma covariável. Conduziu-se, então, o teste ANCOVA controlado para o

desempenho no pré-teste. Os grupos experimentais passaram a diferir marginalmente em relação ao desempenho no pós-teste $F(5,84) = 2,40$, $p = 0,05$, $\eta^2 = 0,13$ (efeito de tamanho médio). Existem evidências da influência do conhecimento prévio no desempenho dos alunos no pós-teste, sendo a correlação entre essas variáveis fortemente positiva, $r = 0,413$, $p < 0,01$.

Ao comparar as condições experimentais, pode-se inferir que, independentemente da presença de cor, os grupos diferem estatisticamente no desempenho do pós-teste quando se altera a estrutura do MC, $F(5,84) = 2,60$, $p < 0,05$. O desempenho do grupo que estudou com MC hierárquico em “árvore” foi maior que o não hierárquico, $t(52) = 2,92$ e igual ao cíclico, $t(62) = 1,32$. Os alunos do grupo MC cíclico e não hierárquico foram estatisticamente iguais, $t(60) = 0,94$. Há evidências de que organizar o MC na forma hierárquica em “árvore” auxilie os alunos na maior compreensão do conteúdo químico. De forma análoga, percebe-se que, independentemente do tipo de hierarquia presente no MC, os grupos apresentam estatisticamente o mesmo desempenho no pós-teste quando se adiciona cor, $t(88) = 1,36$.

Tabela 9. Estudo II - médias (desvio-padrão) do desempenho e esforço mental em cada condição experimental. A eficiência da instrução é calculada a partir da combinação do ganho de conhecimento e esforço mental em escala normalizada.

	Sem cor (SC)			Com cor (CC)		
	Não hierárquico (NH)	Árvore (HA)	Cíclica (HC)	Não hierárquico (NH)	Árvore (HA)	Cíclica (HC)
Participantes	13	11*	18	13	17	18
Conh. factual						
Pré-teste	6,98 (1,18)	6,31 (1,41)	6,30 (1,19)	5,72 (1,24)	6,77 (1,31)	6,06 (1,67)
Pós-teste	7,65 (1,31)	8,65 (0,70)	8,02 (1,72)	8,15 (0,69)	8,60 (0,80)	8,41 (1,21)
Ganho de conhecimento	0,66 (0,93)	2,33 (1,44)	1,73 (1,37)	2,43 (1,59)	1,83 (1,00)	2,35 (1,63)
Esforço Mental						
Pré-teste	4,50 (1,51)	4,36 (1,03)	4,67 (1,75)	4,77 (0,93)	3,94 (1,71)	4,11 (1,37)
Pós-teste	3,62 (1,39)	2,91 (1,92)	4,17 (2,12)	4,23 (1,59)	3,76 (1,82)	3,00 (2,11)
Mapa conceitual	4,08 (1,38)	3,27 (1,42)	4,17 (1,54)	3,92 (1,26)	3,41 (1,28)	2,67 (1,18)
Eficiência da Instrução						
Desempenho	- 0,33	+ 0,17	- 0,03	+ 0,17	- 0,03	+ 0,17
Esforço mental	+ 0,36	- 0,20	+ 0,43	+ 0,25	- 0,10	- 0,63
Eficiência	- 0,33	+ 0,26	- 0,32	- 0,06	+ 0,05	+ 0,56

Fonte: a autora. *um aluno foi descartado da amostra original por ser diagnosticado como um *outlier* (amostra anômala) segundo métodos estatísticos.

Considerando a diferença entre pós e pré-testes, pode-se afirmar que os grupos diferem estatisticamente nos ganhos de conhecimento, $F(5,84) = 3,25$, $p < 0,01$. Não há evidências de que alterar a estrutura dos MCs coloridos gere maiores ganhos de conhecimento, $F(2,45) = 1,58$. Entretanto, dentre os MCs preto e branco essa diferença é evidente, $F(2,39) = 9,01$, $p < 0,01$. Organizar o MC com hierarquia cíclica (SCHC) ou em “árvore” (SCHA) gerou maiores ganhos de conhecimento do que estudar o MC não hierárquico (SCNH), $t(29) = 2,41$ e $t(22) = 3,43$, ambos com $p < 0,01$, respectivamente. Os dois MCs hierárquicos preto e branco (SCHC e SCHA) geraram estatisticamente os mesmos ganhos de conhecimento, $t(27) = 1,14$.

Adicionar cor ao MC faz com que os grupos apresentem diferentes ganhos de conhecimento, $t(88) = 2,12$, $p < 0,05$, sendo que o grupo CCNH quadruplica, em média, esses ganhos quando comparados ao grupo SCNH, $t(24) = 3,46$, $p < 0,001$. Esses resultados evidenciam que quando a cor está presente como dica de navegação, a hierarquia se faz desnecessária. A cor se mostra ainda uma forma crítica de potencializar a aprendizagem quando o MC não apresenta nenhuma hierarquia conceitual.

A análise das medidas de esforço mental mostra que os esforços para responder ao pré-teste como pós-teste foram estatisticamente iguais entre os grupos experimentais, $F(5,84) = 0,77$ e $F(5,84) = 1,31$, respectivamente. Já para compreender o conteúdo do MC, os grupos diferiram estatisticamente entre si, $F(5,84) = 3,02$, $p < 0,05$. Dentre os MCs preto e branco, alterar a sua estrutura não afeta o esforço mental para compreender o conteúdo (todas as médias são estatisticamente iguais quando comparadas em pares). Já nos MCs coloridos, a hierarquia cíclica exigiu menor esforço mental do que o não hierárquico, $t(29) = 2,89$, $p < 0,01$ sendo ambos iguais ao MC em “árvore”. Possivelmente, a organização conceitual cíclica aliada às cores destacou o encadeamento sistêmico do conteúdo, diminuindo a desorientação dos alunos e, conseqüentemente, o esforço mental.

6.3.2 Análise da eficiência da instrução

A análise da eficiência da instrução (E), visualizada no gráfico da Figura 28, permite incluir a segunda variável (esforço mental) à análise de desempenho dos alunos, interpretados segundo uma curva normal reduzida (curva Z), isto é, média 0 e desvio-padrão ± 1 (diagonal $\sqrt{2}$).

A ANOVA de fator único mostrou que os grupos diferem estatisticamente no que diz respeito às suas eficiências de instrução, $F(5,84) = 3,96$, $p < 0,001$. A adição de cor torna a instrução do MC hierárquico cíclico em altamente eficiente, ou seja, há diferença estatística significativa entre as condições SCHC e CCHC, $t(34) = 3,33$, $p < 0,005$. Os MCs não hierárquicos (SCNH e CCNH) apresentam baixa eficiência ($D < 0$) e, ainda que a adição de cor tenha aumentado o ganho de conhecimento, ambas as instruções são estatisticamente iguais em termos de eficiência, $t(24) = 1,52$. De modo oposto, os MCs com hierarquia em “árvore” (SCHA e CCHA) apresentam alta eficiência ($D > 0$) e, ainda que a adição de cor tenha diminuído o esforço mental e o ganho de conhecimento, ambas as instruções são estatisticamente iguais em termos de eficiência, $t(26) = 0,76$.

Figura 28. Estudo II - gráfico de eficiência da instrução em função das médias normalizadas de desempenho e esforço mental. Valores positivos indicam uma eficiência positiva, i.e., que o MC em estudo gerou um alto ganho de conhecimento com baixo esforço mental. **Fonte:** a autora.

Considerando apenas os MCs coloridos, é possível perceber que a organização hierárquica dos conceitos em “árvore” diminuiu o esforço mental ao mesmo tempo que também diminui o desempenho dos alunos quando comparados ao MC não hierárquico. Entretanto, suas eficiências são estatisticamente iguais, $t(28) = 0,43$. Já a organização dos conceitos em uma estrutura cíclica se mostra com a maior eficiência relativa da instrução dentre todas as condições experimentais. Estudar o MC CCHC diminuiu o esforço mental aumentando os ganhos de conhecimento, sendo estatisticamente melhor que o MC em “árvore” (CCHA), $t(33) = 2,22$ e o não hierárquico (CCNH), $t(29) = 2,62$, ambos $p < 0,05$.

Considerando apenas os MCs preto e branco, as condições SCNH e SCHC apresentaram ambas baixas eficiências da instrução, ou seja, geraram alto esforço mental com baixo ganho de conhecimento, sendo estatisticamente iguais, $t(29) = 0,53$. Apesar de a organização hierárquica em “árvore” ter diminuído o esforço mental e aumentado o desempenho dos alunos, as condições SCHA e SCHC apresentam eficiência instrucional estatisticamente iguais, $t(27) = 1,74$. Por fim, a organização hierárquica em “árvore” tem maior eficiência quando comparada ao MC SCNH, $t(22) = 2,38$, $p < 0,05$.

6.3.3 Análise do conhecimento conceitual dos alunos antes e após o período de estudo

A partir da categorização das respostas dos alunos à questão dissertativa foi possível identificar como o padrão de respostas dos alunos mudou após o estudo com os MCs. De modo similar aos resultados encontrados no Estudo I, percebe-se que, independentemente da condição experimental, a frequência de alunos que deixaram respostas em branco (EB) ou que declararam não saber a resposta à pergunta dissertativa (NS) diminuiu de 23% para 16% após a intervenção de estudo com os MCs, ainda que 3% desses alunos se configuraram em um EC no pós-teste. O número de EC que somavam 14% foi mantido após o estudo com o MC (independentemente do tipo de hierarquia conceitual ou presença de dicas gráficas).

No Estudo I foram identificadas cinco áreas problemáticas envolvendo o uso do modelo correto para explicar o fenômeno das cores nos fogos de artifício. Nesse estudo, foi possível perceber que os erros conceituais cometidos pelos alunos no pré-teste (13 alunos ao total) puderam ser categorizados em quatro dessas cinco áreas e, agora, com o aparecimento de uma nova categoria relacionada à quantidade dos elementos químicos presentes. Com essa análise foi possível inferir que:

- 38% atribuem à presença de corantes as diferenças nas cores. Por exemplo, nas respostas explícita ou implícita de, respectivamente:

A81: As substâncias e os elementos químicos que os compõem para que haja diferenças de cores como, por exemplo, corantes.

A33: A composição molecular da mistura de cores na pólvora de cada um.

- 31% atribuem à quantidade do elemento químico para diferenciar os fogos de cor laranja e verde. Isso pode ser visto quando o aluno declara:

A20: A *quantidade de cada elemento* químico na composição.

A10: Nos fogos de cor verde a pólvora queima uma *quantidade do metal boro*, nos fogos laranja o metal é diferente.

- 15% dos alunos utilizam de modo incorreto os aspectos reacionais para explicar as diferentes cores nos fogos de artifício. Isso pode ser visto nas respostas dos alunos:

A82: Pelo fenômeno da *transformação química*, onde as cores são definidas.

A71: A diferença entre eles está nas *substâncias que liberam* quando são queimados.

- 16% relacionam erroneamente às diferenças das cores nos fogos de artifício com o nível/subnível de energia ou emissão de luz, porém, ainda de modo incorreto como é o caso de:

A55: A diferença está no *número de elétrons* que cada fogo de artifício possui que altera a sua cor.

A15: A *luz refletida* que implicará também de acordo com a composição dos fogos de artifício, na sua cor a ser emitida.

Pode-se dizer que os EC prévios à intervenção estão diretamente relacionados à aplicação incorreta do modelo atômico cientificamente aceitos para explicar o fenômeno macroscópico, ou seja, o modelo de Böhr. Era esperada que a complexidade das respostas dos alunos fosse aumentar após o estudo com MC, fazendo migrar as explicações de concepções de senso comum (CQ), passando pelo conhecimento químico superficial (EQ) para concepções científicas mais elaboradas (NE), que envolvam a interação entre a luz e a matéria (EL) e sua relação com o espectro eletromagnético (EE). Segundo Giordan & Vecchi (1996), após instruções formais espera-se que os alunos sejam capazes de transformar seu conhecimento prévio em um conhecimento mais próximo daquele cientificamente aceito. De modo geral,

percebe-se que isso ocorre com todos os grupos, ainda que mais pronunciadamente nos grupos em que a hierarquia conceitual está presente.

- Após o estudo com os MCs organizados em uma hierarquia em “árvore” (CCHA e SCHC), 72% dos alunos tiveram suas respostas categorizadas em um nível explicativo acima ou mantiveram suas respostas. Esse é o caso do aluno 41:

A41 (*antes do estudo*): Em branco (EB).

A41 (*depois do estudo do MC CCHA*): A diferença se dá por conta dos elementos químicos (EQ).

- No caso dos MCs com hierarquia cíclica (CCHA e SCHC), a maioria dos alunos (59%) tiveram suas respostas mantidas no mesmo nível explicativo. O que pode ser verificado na resposta do aluno 58:

A58 (*antes do estudo*): A diferença está nos compostos que geram cor ao entrar em contato com o fogo (CQ).

A58 (*depois do estudo MC CCHC*): A diferença está nas substâncias não explosivas usadas (CQ).

- Para os MCs sem hierarquia (CCNH e SCNH), 38% dos alunos tiveram suas respostas mantidas no mesmo nível explicativo, sendo que a maioria dos alunos (43%) desceram o seu nível explicativo. Isso ocorreu com o aluno 73:

A73 (*antes do estudo*): Fogos de artifício de cor laranja possuem substâncias químicas que no momento da explosão ou queima da pólvora emitem um tipo de luz visível sendo que ambos se diferem dependendo das substâncias existentes (EL).

A73 (*depois do estudo MC SCNH*): A diferença se dá pela substância química que os compõe, dependendo dos elementos químicos, haverá um nível ou subnível de energia diferente que irá diferenciar a cor (NE).

6.4 Conclusões do Estudo II

Com base nos resultados apresentados, foi possível concluir que independentemente do tipo de MC utilizado como material de estudo, todos os alunos tiveram um ganho de conhecimento factual e um aumento na capacidade de explicar o fenômeno das cores nos fogos de artifício. Porém, o MC preto e branco e sem organização hierárquica gerou os menores

ganhos de conhecimento com maior esforço mental quando comparado às demais condições experimentais.

Para responder à primeira pergunta da pesquisa, foi considerado apenas o efeito da organização conceitual entre os MCs preto e branco. Há evidências de um impacto positivo da hierarquia conceitual nos resultados de aprendizagem. Os alunos que estudaram os MC hierárquico em “árvore” e cíclico tiveram maiores ganhos de conhecimento factual em relação aos alunos que estudaram o MC não hierárquico, confirmando a Hipótese 2a. Entretanto, não houve diferença entre os MCs com diferentes tipos de hierarquia, sendo o MC em “árvore” igualmente bom ao MC cíclico, refutando a Hipótese 2c. Não houve evidências de que alterar a estrutura hierárquica dos MCs preto e branco tenha afetado o esforço mental percebido pelos alunos, refutando as hipóteses 2b e 2d.

Possivelmente, oferecer certo grau de orientação durante a leitura do MC diminui a desorientação devido a uma diminuição da CG extrínseca associada ao MC. Com essa diminuição, mais recursos cognitivos da MT ficaram disponíveis para lidar com o conteúdo (CG intrínseca), potencializando o processamento generativo e, consequentemente, a aprendizagem. Com isso, o esforço mental percebido não se alterou, pois os recursos da MT antes utilizados para lidar com um formato de instrução ineficiente agora foram alocados para lidar com o conteúdo e com a própria aquisição de conhecimento.

Para responder à segunda pergunta da pesquisa, foi considerado o efeito da adição de cor aos MCs quando comparados aos seus análogos sem cor. Na média geral, os alunos que estudaram os MCs coloridos tiveram estatisticamente maiores ganhos de conhecimento factual do que os alunos que estudaram os MCs sem cor, confirmando parcialmente a Hipótese 2e. No caso dos MCs não hierárquicos, a adição de cor permitiu quadruplicar os resultados de aprendizagem, mas, entre os MCs hierárquicos, não houve diferença estatística no desempenho dos alunos comparando-se àqueles sem ou com cor. A adição de cor diminui o esforço mental para compreender o conteúdo apenas nos MCs com hierarquia cíclica, confirmando parcialmente a Hipótese 2f.

A análise da eficiência da instrução complementa a discussão dos resultados permitindo compreender melhor o balanço entre o ganho de conhecimento e o esforço mental. De modo geral, fica confirmado que a organização hierárquica dos conceitos em “árvore” (com ou sem cor) é uma estratégia interessante para aumentar a eficiência dos MCs como material instrucional, assim como a falta dessa organização (com ou sem cor) gerou desorientação, alto

esforço mental e baixos ganhos de conhecimento. Já os MCs cíclicos, só se mostraram eficientes quando a cor estava presente.

Quando analisados em conjunto, esses resultados evidenciam um efeito combinado entre a hierarquia e a cor. Possivelmente, ambas as estratégias estejam funcionando como dicas gráficas de navegação: (1) a cor por particionar o conteúdo em áreas de conhecimento, auxiliando na gestão da CG intrínseca e na integração do conteúdo em um todo coerente e (2) a hierarquia por auxiliar no processamento de informação natural pela MT, diminuindo a CG extrínseca. Em ambas as situações mais recursos cognitivos da MT foram destinadas à aprendizagem, resultando em maiores ganhos de conhecimento.

Em suma, quando a hierarquia conceitual é óbvia, a cor se faz desnecessária como dica gráfica. Na falta de uma organização hierárquica, até a adição de cor fez aumentar os ganhos de conhecimento. Por fim, quando a hierarquia não remete ao processamento natural de informação (no caso da cíclica remete a um processo sistêmico de causa e efeito), a cor se mostra uma excelente aliada na navegação do conteúdo, diminuindo o esforço mental e aumentando sobremaneira os ganhos de conhecimento.

CAPÍTULO 7. ESTUDO III – O EFEITO DO CONHECIMENTO PRÉVIO DOS ALUNOS E DA ADIÇÃO DE RECURSOS DIGITAIS AO MAPA CONCEITUAL QUE ORGANIZA UM HIPERTEXTO SOBRE CONCEITOS QUÍMICOS DIFÍCEIS

Para Ausubel (2000), o conhecimento prévio (CP) dos alunos deve ser sempre considerado ao conceber o planejamento de ensino, uma vez que o material instrucional deve ser potencialmente significativo, isto é, deve auxiliar os alunos a estabelecer relações entre o que eles já sabem com a nova informação. Para a TCC (Sweller, Ayres & Kalyuga, 2011), o CP é um fator crítico para garantir a eficácia de um material instrucional capaz de levar à aprendizagem significativa. Isso fica ainda mais evidente com um dos efeitos mais importantes discutidos por essa teoria, o efeito reverso do conhecimento (do inglês, *expertise reversal effect*). Esse efeito é observado quando um método instrucional traz benefícios para alunos novatos no tema, mas que não traz nenhum benefício ou até prejudica a aprendizagem à medida que os alunos ganham mais conhecimento e se tornam especialistas.

A TCC sugere que esse efeito deve ser evitado por meio de estratégias múltiplas em que se regula o andamento da instrução de forma que as atividades variem de acordo com o nível de CP do aluno. Na prática isso significa planejar uma série variável de tarefas que forneça aos alunos considerável orientação (do inglês, *scaffolding*) nas tarefas iniciais, mas que diminua gradualmente até que nenhuma orientação seja fornecida nas tarefas finais. Por exemplo, quando os alunos estiverem aprendendo a manipular transferências de líquidos e pesagens no laboratório, forneça, primeiro, instruções passo a passo, depois comentários seguidos de *feedbacks* e, finalmente, não forneça qualquer orientação.

Conforme já apresentado na introdução (Capítulo 1), Amadiou et al. (2009) reportam que alunos com diferentes níveis de CP navegam de modo diferente pelo hipertexto organizado na forma de MC. Alunos com baixo CP ganharam maior conhecimento factual com menor esforço mental quando estudaram o hipertexto organizado com hierarquia em “árvore”. Já os alunos com alto CP ganharam conhecimento com estrutura hierárquica e em rede igualmente, apresentando alta tolerância à desorientação provocada pelos MCs. Resultados semelhantes já

tenham sido reportados por outros autores, como Shapiro (1999), Salmerón, Kintsch, & Cañas (2006) e Madrid & Cañas (2009).

Considerando os resultados combinados dos Estudos I e II, o ganho de conhecimento pode ser potencializado quando o MC apresenta uma estrutura hierárquica cíclica aliada à dica gráfica cor como forma de reunir visualmente conceitos de mesma área de conhecimento. Em resumo, a cor possibilita a gestão da CG intrínseca particionando o conteúdo e auxiliando na integração do conteúdo, enquanto a hierarquia diminui a desorientação via redução da CG extrínseca. Nesses Estudos, o conteúdo abordado foi referente a química dos fogos de artifícios sendo que os alunos demonstraram, em linhas gerais, um nível de CP razoável sobre esse assunto ($n = 176$, $M = 6,53$, $DP = 1,31$, mínimo: 4,33, máximo: 9,75).

No Estudo III, um conteúdo químico mais difícil foi escolhido: a condutividade elétrica de diferentes materiais. Esta mudança se justifica pois era necessária uma representatividade amostral tanto de alunos com baixo como alto nível de CP. A explicação submicroscópica para o evento macroscópico de condução elétrica em sólidos requer do aluno a manipulação de conceitos abstratos que extrapolam, em parte, o conhecimento abordado no âmbito do Ensino Médio. Ainda que o conteúdo químico sobre ligações metálicas e estrutura reticular cristalina sejam componentes curriculares do ensino básico, a Teoria do Orbital Molecular e a Teoria de Bandas só são abordados no Ensino Superior ou Técnico/Tecnológico (e.g., metalurgia e edificações).

Além disso, no Estudo III, o uso de recursos digitais adicionados ao MC é proposto como forma de otimizar os recursos cognitivos disponíveis na MT, potencializando ainda mais os resultados de aprendizagem. Com a adição dos recursos ao MC, ele se tornará um hipertexto. De acordo com a TAM, os alunos aprendem mais quando as informações verbais e visuais são colocadas em conjunto no material de ensino. A adição de múltiplas fontes de informação potencializa o processamento de informação (Tindall-Ford, Chandler, & Sweller, 1997), levando a maiores ganhos de aprendizagem (e.g., Kalyuga, Chandler, & Sweller, 1998). Ao mesmo tempo, a adição de mais informações a serem processadas pode causar um aumento da CG intrínseca a ponto de os alunos não conseguirem lidar sem que haja um prejuízo na aprendizagem, sendo essa situação ainda mais crítica no caso dos alunos com baixo CP. Ainda há espaço para pesquisas que explorem o uso dos MCs como um organizador de conteúdo semântico e imagético em um hipertexto e seu efeito para alunos com diferentes níveis de CP.

7.1 Objetivo, perguntas de pesquisa e hipóteses de trabalho

O objetivo do Estudo III foi avaliar o efeito do uso de recursos digitais adicionados ao MC (i.e., um hipertexto) e do nível de CP dos alunos (baixo ou alto) na carga cognitiva e na compreensão de conceitos químicos difíceis.

Pergunta de pesquisa #1

Qual o impacto da adição de recursos digitais aos MCs nos resultados de aprendizagem, na carga cognitiva e no tempo associados à tarefa de compreender um conteúdo químico difícil?

Hipóteses de trabalho associadas à pergunta #1

Se os recursos digitais forem estratégias que direcionam a atenção do aluno para um princípio, regra ou definição particularmente importante para compreender o conteúdo químico espera-se que os alunos que estudarem os MCs com recursos digitais tenham melhores resultados de aprendizagem (Hipótese 3a) em relação aos alunos que estudarem apenas os MCs sozinhos. Em contrapartida, espera-se que tanto a carga cognitiva associada à tarefa de compreensão do conteúdo (Hipótese 3b) como o tempo de estudo (Hipótese 3c) sejam maiores para os alunos que tiverem acesso aos recursos digitais em comparação aos alunos que estudarem apenas os MCs, uma vez que há um aumento da quantidade de informação a ser processada.

Pergunta de pesquisa #2

Qual o impacto do nível de CP no ganho de conhecimento, na carga cognitiva e no tempo associados à tarefa de compreender um conteúdo químico difícil organizado na forma de um MC sem recursos digitais?

Hipóteses de trabalho associadas à pergunta #2

Quanto maior o nível de CP, menor a desorientação causada pelo MC, pois mais recursos da MT estão disponíveis para lidar com o conteúdo de alta complexidade e com o formato da tarefa. Entretanto, durante a interação com o material de estudo, o aluno deve ser exposto a um esforço mental necessário para compreender esse conteúdo. Caso contrário, os esquemas

mentais presentes em sua estrutura cognitiva permanecerão inalterados e, conseqüentemente, pouco ou nenhum ganho de conhecimento será observado. Sendo assim, espera-se que os alunos com baixo nível de CP no tema tenham maiores ganhos de conhecimento (Hipótese 3d) e maior carga cognitiva (Hipótese 3e) para compreender o conteúdo químico do que os alunos com alto nível de CP no tema.

Pergunta de pesquisa #3

De que modo a adição de recursos digitais ao MC afeta os alunos com diferentes níveis de CP?

Hipóteses de trabalho associadas à pergunta #3

Ao adicionar recursos digitais ao MC, há um aumento da quantidade de informação a ser processada pelo aluno. Alunos com menor nível de CP serão mais afetados pela informação adicional, justificada por um aumento de CG intrínseca. Entretanto, como os recursos digitais estão associados ao MC, que oferecem uma maneira de se guiar durante a navegação do conteúdo, possivelmente, alunos com menor nível de CP serão mais beneficiados por essa organização holística e visuoespacial de um conteúdo difícil, justificada por uma diminuição de CG extrínseca. Sendo assim, se o balanço entre o aumento de carga intrínseca e a diminuição da carga extrínseca potencializar o processamento de informação relevante contido no MC, é de se esperar que ao estudar os MCs com recursos digitais, os alunos com baixo nível de CP tenham maior ganho de conhecimento (Hipótese 3f) e maior carga cognitiva (Hipótese 3g) quando comparados aos alunos com alto nível de CP.

7.2 Materiais e métodos

7.2.1 Contexto, participantes e planejamento experimental

A condução do Estudo III ocorreu no 1º semestre de 2017 e contou com a participação de 75 alunos ingressantes à EACH/USP matriculados na disciplina CN. O delineamento quase-experimental 2 (nível de conhecimento prévio no tema: baixo ou alto) X 2 (uso de recursos

digitais associados ao MC: ausente ou presente) resultou em quatro condições experimentais esquematizadas na Figura 29.

Figura 29. Estudo III - planejamento quase-experimental 2 (nível de conhecimento prévio dos alunos: baixo vs. alto) X 2 (uso de recursos digitais associados ao MC: ausente vs. presente), resultando em quatro possíveis condições experimentais. **Fonte:** a autora.

Primeiramente, os alunos foram separados em dois grupos de acordo com seu nível de conhecimento prévio (CP), dado pelo desempenho no teste de classificação. Em seguida, os alunos foram aleatoriamente distribuídos em dois grupos, mantendo-se a mesma proporção de alunos com baixo e alto nível de CP. A cada um dos grupos foi atribuído um MC para estudo, sem recursos digitais (SR) ou com recursos digitais (CR). Os recursos digitais são *hyperlinks* alocados em conceitos-chave do MC que ao serem clicados abrem uma janela *pop-up* com uma imagem. Por fim, as quatro condições experimentais do Estudo III foram: alunos com baixo

nível de CP receberem um MC sem recursos (BCSR) ou com recursos (BCCR) e, de modo análogo, os alunos com alto nível de CP receberem um MC sem recursos (ACSR) ou com recursos (ACCR).

7.2.3 Procedimento de coleta de dados

A coleta de dados ocorreu conforme procedimento esquematizado na Figura 30. Toda sequência de atividades foi organizada com o auxílio da plataforma *Moodle STOA-USP*. Essa coleta de dados foi facilitada por dois motivos: (1) todos os alunos matriculados na disciplina de CN já possuíam seu *login* e senha de acesso à plataforma e (2) os alunos estavam familiarizados com o uso das funcionalidades do sistema, uma vez que o professor da disciplina fazia uso recorrente da plataforma.

Figura 30. Estudo III – procedimento de coleta de dados com os tempos despendidos em cada etapa. O TCLE e o teste de classificação foram aplicados na primeira aula e as demais etapas na segunda aula. A coleta de dados ocorreu no laboratório de informática com o auxílio da plataforma *Moodle/STOA-USP*. **Fonte:** a autora.

Duas aulas de CN foram necessárias para a condução do Estudo III. Nos primeiros 15 minutos da primeira aula, os alunos assinaram o TCLE (no papel) e realizaram o teste de classificação (ver seção 7.2.4.1) *online*, utilizando os computadores do laboratório de informática. Durante a semana, foi feito o tratamento dos dados referente ao desempenho dos alunos nesse teste. Os alunos com baixo nível de conhecimento prévio (BCP) foram separados dos alunos classificados com alto nível (ACP). Dois grupos foram criados na plataforma *Moodle*, um deles teria acesso apenas ao MC sem recursos digitais (SR) enquanto o outro teria acesso apenas ao MC com recursos (CR). Aleatoriamente, os alunos com diferentes níveis de CP foram alocados em um dos dois grupos, SR ou CR.

Na aula seguinte, os alunos acessaram a plataforma *Moodle* utilizando os computadores do laboratório de informática, em turnos de 15 alunos por vez. Na tela inicial, eles receberam exatamente a mesma instrução. Foi orientado verbalmente que eles não poderiam consultar a Internet durante as atividades, mas, se desejassem, poderiam realizar anotações durante o estudo do MC para consultas futuras. Em seguida, foi dada a instrução de realizar, individualmente, a sequência de coleta de dados indicada nas caixinhas brancas da Figura 30, em um tempo total aproximado de 70 minutos:

- **Pré-teste:** 15 minutos para que os alunos respondessem a 10 questões na tela do computador (ver seção 7.2.4.2), sendo seis de múltipla escolha (com cinco alternativas cada) e quatro dissertativas. As questões foram apresentadas uma de cada vez (i.e., em páginas separadas), sendo possível voltar às questões anteriores já respondidas. Porém, uma vez enviado o questionário completo não era possível revê-lo ou refazê-lo.

Estudo do MC: 30 minutos para estudar o conteúdo do MC e, se houvesse, explorar os recursos digitais associados a ele (ver seção 7.2.4.3). Não foi feito um controle de tempo rigoroso a essa tarefa, ou seja, os alunos poderiam ficar mais de 30 minutos se achassem necessário. Atingido o tempo de 30 minutos, a pesquisadora comunicou aos alunos esse fato.

- **Pós-teste:** 15 minutos para que os alunos respondessem a 10 questões na tela do computador, sendo seis de múltipla escolha (com cinco alternativas cada) e quatro dissertativas. Das 10 questões do pós-teste, cinco delas eram iguais às do pré-teste e cinco eram inéditas (ver seção 7.2.4.2). Novamente, as questões foram apresentadas uma de cada vez (i.e., em páginas separadas), sendo possível voltar às questões anteriores já respondidas. Porém, uma vez enviado o questionário completo não era possível revê-lo ou refazê-lo.
- **Carga cognitiva:** 5 minutos para que os alunos respondessem ao questionário NASA-TLX (ver seção 7.2.4.4). Esse questionário fornece uma pontuação em uma escala de 0-100 que representa a carga cognitiva associada à tarefa a partir da soma ponderada de seis subescalas psicométricas subjetivas. O questionário foi traduzido do inglês para o português e cada participante relatou a sua percepção logo após a execução de toda a tarefa.

É importante ressaltar que a dinâmica pela qual os alunos migraram de uma atividade para outra foi controlada exclusivamente por eles e não definido pelo sistema ou instrutor. Ao final do tempo atribuído para aquela tarefa, a pesquisadora fez um aviso verbal para toda a turma. O sistema *Moodle* fornece os horários de início e término de cada atividade (ou tarefa) no sistema. Porém, como o acesso ao MC não era uma atividade em si, mas apenas um *hyperlink*

que levava a uma página da web, o registro de tempo referente à tarefa de estudo do MC não foi registrado. Foi considerada como uma medida aproximada desse tempo a diferença entre o horário em que o aluno finalizou o pré-teste e iniciou o pós-teste (linha pontilhada, Figura 30).

7.2.4 Materiais

7.2.4.1 Desenvolvimento e validação do teste de classificação

O teste de classificação foi composto inicialmente por 30 afirmações sobre a condutividade elétrica de diferentes materiais, que poderiam estar corretas ou incorretas (conteúdo descrito na seção 3.2). Essas afirmações deveriam ser julgadas pelos alunos utilizando uma escala binária “Certa-Errada”. A opção “não sei” foi adicionada como forma de evitar respostas aleatórias.

Em seguida, foram conduzidas duas sessões individuais de validação com especialistas, sendo: (1) um professor de Ciências e Química do Ensino Superior e (2) um professor de Física do Ensino Médio, mestre em Ensino de Física. Durante as sessões, que duraram em média 1h cada, discutiu-se cada uma das afirmações, em função das:

- **Pertinência:** quão apropriada e relevante em relação ao conteúdo científico.
- **Validade:** quão útil e fiel ao conteúdo científico.
- **Limitações:** quão dúbias, imprecisas ou incoerentes.

Com base nas sugestões dos professores especialistas, apenas 25 afirmações (alteradas) permaneceram ao final do questionário aplicado para avaliar o nível de conhecimento dos alunos (Tabela 10). A análise de consistência interna dos itens revelou resultados satisfatórios para o alfa de Cronbach, no valor de 0,762.

Tabela 10. Estudo III - questionário validado e aplicado para a classificação dos alunos de acordo com seu nível de conhecimento prévio. As afirmações grifadas em amarelo estão incorretas do ponto de vista científico.

Nome:	Idade:	Curso:	
INSTRUÇÕES			
Julgue as afirmações a seguir em CERTA ou ERRADA. Se não souber ou não quiser responder, marque a opção NÃO SEI.			
AFIRMAÇÃO	NÃO SEI	CERTA	ERRADA
1. Em metais, não existe de fato uma ligação química apenas uma fraca interação			
2. Já que os metais são bons condutores de eletricidade, seus átomos são capazes de transmitir corrente elétrica devido à vibração dos elétrons			
3. Os metais possuem átomos espacialmente organizados na forma de um retículo cristalino			
4. Condutividade elétrica é uma medida empírica relacionada à mobilidade eletrônica			
5. Já que a luz não passa pelo metal é possível assumir que suas moléculas estão muito próximas umas das outras			
6. A condutividade elétrica varia em função da temperatura de um determinado material			
7. A banda de condução é totalmente preenchida pelos elétrons de valência			
8. Os orbitais atômicos apresentam valores discretos de energia quantizada			
9. Nos metais, os íons são livres para circularem na rede, facilitando a condução de corrente elétrica			
10. A condução de eletricidade em semicondutores pode ser facilitada pela dopagem das bandas			
11. Nos metais, os cátions sofrem repulsão eletrônica compensada pela atração com seus elétrons			
12. Os compostos metálicos podem ser representados como grandes moléculas			
13. Orbital atômico é a região no espaço em que há alta probabilidade de encontrar um elétron			
14. Os metais apresentam átomos eletricamente neutros			
15. Os metais conduzem eletricidade por terem elétrons que circulam livremente			
16. A união de vários orbitais atômicos forma um orbital molecular			
17. O comportamento ondulatório de um elétron pode ser representado por uma função de onda			
18. Nos metais, a atração eletrostática ocorre entre cátions e ânions			
19. As redes metálicas são formadas por átomos iguais fortemente unidos por ligação covalente			
20. Grafite, diamante, vidro e borracha são exemplos de isolantes elétricos			
21. No magnésio, por exemplo, os cátions Mg^{2+} são atraídos pelos seus elétrons de valência			
22. Semicondutores são condutores metálicos misturados a elementos não metálicos			
23. Todos os metais conduzem eletricidade			
24. Compostos iônicos só conduzem eletricidade quando em meio aquoso			
25. Sódio e cloreto de sódio são ambos compostos metálicos			

Fonte: a autora.

7.2.4.2 Desenvolvimento dos questionários usados como pré-teste e pós-teste

Dez questões foram elaboradas para compor o pré-teste, sendo seis questões de múltipla escolha e quatro questões dissertativas. As questões de múltipla escolha (Quadro 1) tinham o objetivo de avaliar o conhecimento dos alunos sobre:

- A estrutura cristalina dos metais (Questão 1).
- As interações que caracterizam uma ligação metálica (Questão 2).
- O efeito da temperatura na condutividade elétrica (Questão 3).

- A característica dual dos elétrons (Questão 4).
- A formação e característica das bandas de condução e de valência (Questão 5).
- A definição do nível de Fermi (Questão 6).

Cada questão apresentou cinco possíveis alternativas, sendo apenas uma delas a correta. As demais alternativas (também conhecidas como **distratores**) foram elaboradas com base nas principais dificuldades que os alunos apresentam a respeito do tema. Por exemplo, ao responder à questão 2 do Quadro 1, os alunos deveriam ser capazes de reconhecer as características da ligação metálica como sendo uma interação eletrostática que ocorre entre os cátions metálicos positivos e os elétrons deslocalizados de valência negativos. Uma das principais confusões ao estudar esse tópico é a incapacidade do aluno em distinguir a ligação metálica de outros tipos de ligações (e.g., Butts & Smith, 1987; Robinson, 1998). A alternativa (a) dessa questão reflete um modelo baseado na ligação iônica, enquanto a alternativa (e) reflete um modelo de ligação covalente ou mesmo um outro modelo no qual não se concebe interações de natureza elétrica.

Alguns alunos apresentam confusão entre o modelo atômico, refletido na alternativa (b), e o modelo de interação entre átomos para formar uma substância. A alternativa (d) representa um modelo menos comum, mas que poderia aparecer como uma possibilidade (incorreta!) de interação eletrostática, uma vez que os prótons são positivos e os ânions negativos

As questões dissertativas (Quadro 2) tinham o objetivo de avaliar a capacidade do aluno em:

- Explicar as razões da condutividade elétrica dos metais (Questão 7).
- Comparar e explicar os diferentes comportamentos de condutibilidade elétrica dos compostos iônicos e metálicos quando no estado sólido (Questão 8).
- Explicar a exceção para condutividade elétrica observada em um composto covalente não metálico (Questão 9).
- Explicar o procedimento macroscópico para medição de condutividade elétrica dos materiais (Questão 10).

Quadro 1. Estudo III - seis questões de múltipla escolha que compuseram o pré-teste. As alternativas grifadas em azul estão corretas.

Questão 1. Normalmente, os átomos de um metal no estado sólido estão espacialmente organizados:

- (A) Em uma forma cúbica
- (B) Em uma forma hexagonal
- (C) Um do lado do outro
- (D) Em uma rede cristalina (CORRETA)**
- (E) Um em cima do outro

Questão 2. Em um metal, a interação eletrostática ocorre entre:

- (A) Cátions e ânions
- (B) Prótons e elétrons
- (C) Cátions e elétrons (CORRETA)**
- (D) Prótons e ânions
- (E) Átomos neutros

Questão 3. Nos materiais condutores, um aumento de temperatura diminui a condutividade elétrica, pois:

- (A) Aumenta a repulsão entre os elétrons
- (B) Aumenta a colisão entre os elétrons (CORRETA)**
- (C) Aumenta a mobilidade dos elétrons
- (D) Aumenta a atração entre os elétrons
- (E) Diminui a energia cinética dos elétrons

Questão 4. A respeito dos elétrons, estão todas corretas, com EXCEÇÃO:

- (A) Possuem massa
- (B) Possuem carga elétrica negativa
- (C) Têm seu comportamento descrito pelas funções de onda
- (D) São encontrados com maior probabilidade nos orbitais
- (E) São encontrados emparelhados (CORRETA)**

Questão 5. Nos metais, os orbitais moleculares ligantes totalmente preenchidos com elétrons formam:

- (A) A banda de valência (CORRETA)**
- (B) A banda de condução
- (C) A banda de energia
- (D) O HOMO
- (E) O LUMO

Questão 6. A diferença de energia entre a banda de valência e a banda de condução é definida como:

- (A) Condutividade elétrica
- (B) Nível de Fermi (CORRETA)**
- (C) Resistividade elétrica
- (D) Energia quantizada
- (E) Banda de energia

Fonte: a autora.

Quadro 2. Estudo III - quatro questões dissertativas que compuseram o pré-teste. São oferecidos exemplos de respostas incorretas, parcialmente corretas e corretas do ponto de vista científico.

Questão 7. Por que os metais são bons condutores de eletricidade?

R: Por causa dos íons que o formam (Incorreta)

R: Em virtude dos elétrons (Parcialmente correta)

R: *Devido à alta mobilidade dos elétrons de valência na rede cristalina do metal (Correta)*

Questão 8. Como você explica que, no estado sólido, cloreto de sódio não conduz eletricidade, mas o sódio sim?

R: Porque o cloreto de sódio tem o átomo de cloro junto a ele (Incorreta)

R: O cloreto de sódio é um composto iônico enquanto o sódio é um metal (Parcialmente correta)

R: *O cloreto de sódio não apresenta íons livres quando no estado sólido e, portanto, não permite mobilidade eletrônica. Já o sódio por ser um metal apresenta elétrons livres que permite condução elétrica. (Correta)*

Questão 9. Por que o grafite, apesar de ser um composto covalente, conduz eletricidade?

R: O grafite não conduz corrente elétrica (Incorreta)

R: Devido a sua estrutura cristalina em camadas (Parcialmente correta)

R: *Devido a presença de elétrons que não participam de nenhuma ligação, ficando livres para se moverem acima e abaixo de sua estrutura em camadas (Correta)*

Questão 10. Na prática, como você faria para diferenciar um isolante elétrico de um semicondutor?

R: O isolante não conduz eletricidade e o semicondutor conduz um pouco (Incorreta)

R: Faria passar corrente elétrica por eles (Parcialmente correta)

R: *Mediria a condutividade elétrica dos materiais usando corrente elétrica e um condutivímetro. Consultaria o valor encontrado a um padrão que define isolantes e semicondutores (Correta)*

Fonte: a autora.

Cada questão foi respondida pelo aluno usando um breve texto com no máximo 400 caracteres com espaços (aproximadamente 5 linhas no computador). O Quadro 2 oferece as quatro questões utilizadas no pré-teste e três exemplos de respostas categorizadas como incorretas (ou confusas), parcialmente corretas ou corretas.

O questionário elaborado como pós-teste foi composto por seis questões de múltipla escolha e quatro questões dissertativas. Três questões de múltipla escolha do pós-teste foram retiradas do pré-teste (ver Questões 2, 4 e 6, no Quadro 1). As três questões de múltipla escolha inéditas do pós-teste, dispostas no Quadro 3, pretendiam avaliar a capacidade do aluno em:

- Compreender a formação e característica da banda de condução (Questão 2).
- Distinguir o comportamento macroscópico referente à condutividade elétrica de diferentes materiais ou soluções aquosas (Questão 4).
- Analisar a influência da temperatura sobre a condutividade elétrica (Questão 5).

Duas questões dissertativas do pós-teste foram retiradas do pré-teste (ver Questões 7 e 10, no Quadro 2). As duas questões dissertativas inéditas do pós-teste, dispostas no Quadro 3, buscavam avaliar a capacidade do aluno em:

- Reconhecer a dopagem de semicondutores como forma de aumentar sua condutividade elétrica (Questão 8).
- Explicar a diferença entre isolantes e condutores elétricos segundo o nível de Fermi (Questão 9).

Quadro 3. Estudo III – Cinco questões inéditas que compuseram o pós-teste. As demais questões foram retiradas do pré-teste (ver questões 2, 4, 6, 7 e 8 nos Quadros 1 e 2). Alternativas grifadas em azul estão corretas.

Questão 2. Nos metais, a banda de condução é formada predominantemente por:

- (A) Orbitais moleculares ligantes preenchidos de elétrons
- (B) Orbitais moleculares antiligantes parcialmente preenchidos ou vazios (CORRETA)**
- (C) Orbitais atômicos com elétrons de valência
- (D) Orbitais moleculares ligantes vazios
- (E) Orbitais moleculares antiligantes totalmente preenchidos

Questão 4. Em um laboratório foi testada a condutividade elétrica de cinco substâncias:

- I. Cloreto de sódio sólido
- II. Cloreto de sódio dissolvido em água
- III. Cobre
- IV. Vidro
- V. Grafite

Qual deles conduzirá eletricidade?

- (A) I e II
- (B) III e V
- (C) IV e V
- (D) II, III e V (CORRETA)**
- (E) I, II e III

Questão 5. A respeito da influência da temperatura na condutividade elétrica, pode-se afirmar que:

- (A) Um aumento ou diminuição de temperatura não influencia a condutividade elétrica
- (B) Um aumento de temperatura provocará um aumento na condutividade elétrica
- (C) Um aumento de temperatura provocará uma diminuição na condutividade elétrica
- (D) A temperatura afeta de modo diferente condutores e semicondutores (CORRETA)**
- (E) A temperatura influencia apenas a condutividade elétrica de metais

Questão 8. O que poderia ser feito para aumentar a condutividade elétrica em um semicondutor?

R: Colocar mais compostos metálicos (Incorreta)

R: Aumentar a temperatura (Parcialmente correta)

R: *Dopar o semicondutor com compostos que gerem lacunas ou doem elétrons extras (Correta)*

Questão 9. Considerando apenas o nível de Fermi, qual a diferença entre um isolante e um condutor?

R: O isolante não conduz eletricidade então seu nível de Fermi é zero (Incorreta)

R: Condutor tem nível de Fermi menor que um isolante (Parcialmente correta)

R: *Isolante elétrico apresenta um altíssimo nível de Fermi enquanto um condutor apresenta nível de Fermi igual ou próximo de zero (Correta)*

Fonte: a autora.

7.2.4.3 Desenvolvimento dos MCs e dos recursos digitais

Com base nos resultados dos Estudos I e II, o MC com maior eficiência da instrução possui uma organização hierárquica cíclica aliada ao uso de cores como forma de agrupar conceitos de mesma área de conhecimento. Essa otimização foi considerada para a elaboração do MC do Estudo III. Utilizando o mesmo conteúdo científico do pré-teste e do pós-teste, elaborou-se um MC inicial sobre a condutividade elétrica de diferentes materiais. Durante as sessões individuais de validação com os professores especialistas, também foram discutidas a pertinência, validade e limitações dos conceitos e proposições desse MC.

Após as sugestões de melhoria, o conteúdo do MC final aplicado como material instrucional contém 22 conceitos e 32 proposições, que responde à pergunta focal: “*Por que os metais conduzem eletricidade?*” declarada acima do MC (Figura 31). A estrutura cíclica remete a um processo sistêmico (Safayeni, Derbentseva & Cañas, 2005) que explica um fenômeno macroscópico (condução elétrica) a partir da organização estrutural dos compostos e suas ligações químicas, tendo como suportes a teoria do orbital molecular e a teoria de bandas. A adição da mesma cor interna às caixinhas considerou a proximidade visual de conceitos pertencentes à mesma área de conhecimento, sendo:

- Os tipos de materiais (isolantes, semicondutores e condutores) e os aspectos macroscópicos da condução elétrica, e.g., efeito da temperatura (**conceitos em azul**).
- O modelo reticular para estrutura cristalina dos metais (**conceitos em verde**).
- A Teoria dos Orbitais Moleculares - formação do HOMO e do LUMO a partir dos orbitais atômicos (**conceitos em amarelo**).
- A Teoria das Bandas e o nível de Fermi, que explicam os diferentes comportamentos de condução elétrica dos materiais (**conceitos em rosa**).

O MC sem recursos digitais foi apresentado em uma página web e não continha áreas clicáveis. A criação dos recursos digitais considerou, primeiramente, a escolha de conceitos-chave na qual seriam fornecidas informações complementares ao fenômeno da condutividade elétrica. Cada conceito recebeu um *hiperlink* que ficou disponível abaixo da caixinha (veja os ícones na Figura 31). Ao clicar nesse *link* uma janela *pop-up* se abria na lateral da página web do MC, sem fechá-lo. Essa janela podia ser manipulada pelo aluno (i.e., aumentada, diminuída, minimizada e fechada).

Figura 31. Estudo III - MC utilizado como material instrucional. Alguns conceitos possuem ícones abaixo deles. Quando clicados, eles abrem os recursos digitais associados ao mapa. **Fonte:** a autora.

Seis recursos digitais foram elaborados e associados ao MC (APÊNDICES 13 a 18) criando, assim um hipertexto. Todos os recursos eram estáticos,²³ ou seja, apresentavam ilustrações e um texto. As ilustrações poderiam ser tabelas, gráficos, desenhos, esquemas ou modelos, sempre acompanhadas de um breve texto explicativo e a(s) fonte(s) de informações.²⁴ Os conceitos e as informações complementares de cada recurso digital associado a eles foram:

- **Condutividade elétrica:** tabela comparando os valores de condutividade elétrica de compostos metálicos, covalentes e iônicos. O texto fornece o critério que faz com que diferentes materiais sejam classificados como condutores ou isolantes elétricos (APÊNDICE 13).
- **Temperatura:** comparação de dois gráficos de resistividade elétrica variando em função da temperatura. O texto explica porque o efeito do aumento da temperatura em condutores e semicondutores é diferenciado. (APÊNDICE 14).
- **Semicondutores:** dois esquemas que ilustram em nível submicroscópico a dopagem do tipo-p e tipo-n. Em cada esquema há duas imagens, uma mostra a adição de buracos ou elétrons extra pelos átomos de impureza e a outra indica o efeito dessa adição na diferença energética entre as bandas de valência e condução (APÊNDICE 15).
- **Retículo cristalino:** são três imagens do metal magnésio, a primeira em nível macroscópico, a segunda indicando o arranjo tridimensional dos átomos e a terceira indicando os cátions e elétrons que estabilizam a rede. O texto traz uma breve explicação do que está sendo visto em cada imagem (APÊNDICE 16).
- **Orbitais moleculares:** representação de como ocorre a formação das bandas de valência e condução a partir da união de OA e OM. O texto explica os passos dessa evolução considerando um, dois, três e n átomos de lítio (APÊNDICE 17).
- **Nível de Fermi:** esquema que representa o nível de Fermi variando em função do tipo de material (condutor, semicondutor e isolante). O texto explica como a diferença energética entre as bandas de valência e condução varia para esses materiais (APÊNDICE 18).

²³ A adição de recursos digitais contendo vídeos, áudios, simulações, esquemas interativos, moléculas 3D ou 2D com movimento é uma possibilidade. Entretanto, para os propósitos desta tese e, particularmente do Estudo III, a adição de informações auditórias e/ou que requeiram habilidades espaciais poderia também demandar recursos cognitivos dos alunos, interferindo nos resultados de aprendizagem.

²⁴ Os recursos digitais foram elaborados de forma integrada, ou seja, com o texto explicativo visualmente o mais próximo da parte da imagem onde se faz referência ao conteúdo. Com isso evita-se o efeito da atenção dividida conforme exemplificado na seção 2.1.3.

7.2.4.4 Medida de carga cognitiva

A carga cognitiva foi determinada utilizando o questionário NASA-TLX (do inglês, *National Aeronautics and Space Administration – Task Load Index*), que é uma ferramenta de avaliação multidimensional e subjetiva que retorna um índice de carga cognitiva associada à tarefa percebida por um sujeito para condução de uma tarefa. O NASA-TLX é composto por seis subescalas onde o sujeito, para expressar sua subjetividade, indica um número (magnitude) em uma escala qualitativa (Hart & Staveland, 1988). As subescalas podem estar relacionadas à tarefa, ao comportamento ou ao sujeito (Tabela 11).

O questionário NASA-TLX é dividido em duas etapas. O valor atribuído na primeira etapa é denominado como o valor absoluto da subescala. Na segunda etapa, o sistema fornece uma sequência de 15 pares de comparações entre as escalas. O participante precisa então escolher qual delas foi mais decisiva/importante para completar a tarefa (e.g., par 1: esforço ou frustração; par 2: desempenho ou esforço). O Apêndice 19 traz exemplos de como as duas etapas do NASA-TLX foram visualizadas na tela do computador e respondidas pelo aluno.

1.1.5 Procedimento de análise dos dados

7.2.5.1 Classificação dos alunos segundo o nível de conhecimento prévio no tema

A nota no teste de classificação considerou que para cada julgamento correto à assertiva, houve a atribuição de 1 ponto e para cada julgamento incorreto, houve a penalização de -1 ponto. Por exemplo, a afirmação *Todas as substâncias não metálicas são isolantes elétricos*, está incorreta.²⁵ O aluno recebeu +1 se assinalou a opção “Errada” e perdeu -1 ponto se assinalou “Certa”. Ao assinalar a opção “não sei”, o aluno não perdeu nem ganhou pontos. A nota no teste de classificação para cada aluno foi feita somando-se as pontuações relativas do julgamento de cada uma das 25 assertivas, na escala original de -25 e +25 pontos, transformada em uma escala de 0 a 10 pontos.

²⁵ A grafita é um composto covalente (não metálico) capaz de conduzir eletricidade (ver seção 3.2).

Com base na nota de todos os participantes construiu-se um *box-plot* ou gráfico de caixa e bigodes (Field, 2013). Analisando as medianas e os quartis superior e inferior, foi definida a nota que separou e classificou os participantes quanto ao seu nível de conhecimento prévio (baixo ou alto) em função do comportamento da população. A diferença estatística entre os grupos foi confirmada pela comparação de médias via teste-t independente (Field, 2013).

Tabela 11. Descrição das subescalas que compõem o questionário NASA-TLX.

SUBJETIVIDADE	MAGNITUDE
Subescalas relacionadas à tarefa	
Usadas para medir a magnitude subjetiva de demandas objetivas durante a tarefa	
[1] Demanda física Atividades físicas requeridas na tarefa.	Muito baixo (e.g., apertar um botão) ou muito alto (e.g., carregar uma máquina)
[2] Demanda mental Demanda cognitiva relacionada aos processos mentais exigidos durante a tarefa.	Muito baixo (e.g., cálculo simples) ou muito alto (e.g., pilotar um avião).
[3] Demanda temporal Efeito da pressão ou restrição do tempo para completar a tarefa.	Muito baixo (e.g., escrever no diário pessoal) ou muito alto (e.g., fazer uma cirurgia de emergência).
Subescalas relacionadas ao comportamento	
Usadas para refletir a avaliação subjetiva individual da tarefa	
[4] Desempenho Autopercepção de como o sujeito acha que foi para atingir seus objetivos e/ou quão satisfeito ele ficou com o seu desempenho.	Muito bem (i.e., conseguiu cumprir todos os objetivos perfeitamente) ou muito mal (i.e., não conseguiu concluir nenhuma etapa da tarefa).
[5] Esforço Quão duro o sujeito teve que trabalhar para atingir o seu nível de desempenho na tarefa – combina esforço mental e físico.	Muito baixo (i.e., foi fácil e tranquilo) ou muito alto (i.e., foi difícil e árduo).
Subescala relacionada ao sujeito	
Usada para incluir o impacto psicológico da tarefa sobre o sujeito	
[6] Frustração Capacidade de completar a tarefa e quão confortável o sujeito estava durante sua realização. Tem alto impacto sobre as capacidades do sujeito em manipular informações, realizar pensamento crítico, resolver problemas.	Muito baixo (i.e., se sentiu confortável, confiante e relaxado) ou muito alto (i.e., se sentiu inseguro, irritado, estressado, desencorajado).

Fonte: adaptada de NASA Ames Research Center (1986). Questionário disponível em inglês no site www.nasatlx.com [jan. 18].

7.2.5.2 Conhecimento factual, conceitual e o ganho de conhecimento

Os seis testes de múltipla escolha do pré-teste e do pós-teste avaliaram o conhecimento factual dos alunos, uma vez que exigiu que o aluno soubesse as informações contidas em apenas uma área de conhecimento por questão. Cada teste de múltipla escolha apresentou cinco possíveis alternativas sendo apenas uma delas a correta. Assinalando a alternativa correta, o aluno ganharia 1 ponto, caso contrário, zero. A nota total nesse questionário variou de 0,0 a 6,0 pontos.

As quatro questões dissertativas do pré-teste e do pós-teste avaliaram o conhecimento conceitual dos alunos, uma vez que exigiu que o aluno fosse capaz de articular as informações contidas em todas as áreas de conhecimento. Nessas questões, foram analisadas as respostas escritas a determinada pergunta, sendo atribuído um ponto para o acerto total, meio ponto (0,5) para um acerto parcial e zero para uma resposta incorreta ou confusa (veja exemplos nos Quadros 2 e 3). As respostas foram avaliadas por dois analisadores independentes sendo o Kappa de Cohen, isto é, grau de concordância entre avaliadores (Field, 2013), calculado igual a 0,88 (boa congruência). A nota total nesse questionário variou de 0,0 a 4,0 pontos.

A nota total dos alunos no pré-teste e no pós-teste foi composta pela soma das notas parciais atribuídas aos testes de múltipla escolha mais as quatro questões dissertativas, variando de 0 a 10 pontos. A diferença entre as notas totais do pré e pós-teste é considerada aqui como sendo o ganho de conhecimento (factual e conceitual) que o aluno adquiriu durante a fase de estudo com o MC.

7.2.5.3 Análise da carga cognitiva e do tempo da tarefa

Conforme descrito anteriormente, o questionário NASA-TLX apresenta duas etapas. Da primeira, se extrai o valor absoluto (escala de 0 a 100 pontos) atribuído pelo aluno a cada uma das seis subescalas que compõem o questionário (veja Tabela 11). Da segunda etapa, se extrai o peso atribuído a cada subescala considerando quantas vezes o aluno a escolheu entre os 15 pares de comparação, calculado conforme a Equação 2:

$$\text{Peso atribuído à subescala}_i = \frac{\text{número de vezes em que } i \text{ foi escolhida}}{15} \quad (\text{Equação 2})$$

O cálculo do índice que representa a carga cognitiva associada a cada subescala é dado pela multiplicação entre o valor absoluto da subescala e o seu peso atribuído. Por exemplo, se na primeira etapa do questionário um aluno atribuiu um valor absoluto de 60 à frustração e, na segunda etapa, ele escolheu “frustração” em 3 vezes das 15 comparações, então, a carga cognitiva relativa a essa subescala será de $60 \times (3/15) = 12$.

A soma dos valores obtidos para cada subescala gera um índice que representa a carga cognitiva total na tarefa (Paas, van Merriënboer & Adam, 1994), em um máximo de 100 pontos, conforme Equação 3 a seguir:

$$Carga\ Cognitiva = \sum_{i=1}^6 Valor\ absoluto_i \times peso\ atribuído_i \quad (\text{Equação 3})$$

7.2.5.4 Análise da eficiência da instrução

A análise da eficiência da instrução do Estudo III foi conduzida utilizando o mesmo protocolo adotado no Estudo I, conforme descrito em detalhes na seção 5.2.4.3. Em resumo, duas medidas são necessárias para o cálculo da eficiência da instrução, o desempenho (D) e o esforço mental (EM). No caso do Estudo III, o desempenho foi dado pelo ganho de conhecimento (factual mais o conceitual), dado pela diferença entre as notas do pós e pré-teste. Já as medidas de esforço mental foram obtidas considerando o índice relativo à essa subescala na análise do questionário de carga cognitiva (NASA-TLX). A opção por considerar apenas essa subescala e não a carga total, se deve ao fato de que apenas os valores de esforço mental apresentaram diferença estatística significativa entre os grupos experimentais comparados. Os valores de D e EM transformados em escala Z, foram usados como pontos cartesianos x e y distribuídos ao longo da linha diagonal de um quadrado 1×1 .

7.2.5.5 Análises quantitativas (estatísticas) e qualitativas (categorias)

Primeiramente, as médias e desvios-padrão foram obtidos para cada grupo experimental considerando as variáveis dependentes em análise. Em seguida, conduziu-se a ANOVA 2 (uso de recursos digitais ao MC) $\times$ 2 (nível de CP) com repetição do último fator, seguida de testes-

t independentes, com auxílio do programa SPSS 22.0 (IBM, EUA) e nível de significância 0,05. Foi analisado o impacto da adição de recursos digitais ao MC no desempenho dos alunos com diferentes níveis de conhecimento prévio no que diz respeito ao conhecimento factual, no ganho de conhecimento geral, nas medidas de carga cognitiva (e as subescalas que a compõe), do tempo na tarefa e de eficiência da instrução.

Em seguida, uma análise qualitativa foi realizada a partir da classificação às respostas dos alunos às perguntas dissertativas (conhecimento conceitual), considerando: (1) os distratores mais escolhidos nos testes de múltipla escolha do pré-teste e (2) os principais erros e dificuldades conceituais dos alunos identificados nas respostas às questões dissertativas do pré-teste. As respostas de alguns alunos (identificados pela letra A e seu número sequencial dado pela ordem alfabética) são fornecidas para exemplificar os padrões encontrados, mantendo-se o anonimato dos participantes conforme orientações éticas para pesquisas com seres humanos.

7.3 Resultados e Discussões

As medidas de desempenho e esforço mental para cada condição experimental estão reunidas na Tabela 12.

Os alunos que participaram deste estudo foram divididos em dois grupos conforme seus desempenhos no teste de classificação. A média e a mediana da população foram 2,00, portanto, alunos com nota superior a 2,00 foram classificados como de alto conhecimento prévio no assunto (ACP, $n = 37$), enquanto os alunos com nota inferior a 2,00 foram classificados como baixo conhecimento prévio (BCP, $n = 40$). O teste ANOVA mostrou que os alunos com ACP apresentam médias no teste de classificação ($M = 4,97$, $DP = 2,13$) estatisticamente superior que os alunos com BCP ($M = -0,60$, $DP = 2,29$), $F(1, 75) = 122,01$, $p < 0,001$. O mesmo padrão foi observado para o desempenho no pré-teste. Os alunos com BCP tiveram um pior desempenho no pré-teste ($M = 2,15$, $DP = 1,35$) quando comparados aos alunos com ACP ($M = 3,20$, $DP = 1,68$), $F(1,75) = 9,24$, $p = 0,003$.

Independentemente da presença de recursos digitais no MC, não houve efeito do conhecimento prévio (todos com $ps > 0,05$) no desempenho do pós-teste $F(1,75) = 0,23$, no ganho de conhecimento, $F(1,75) = 1,70$, no tempo de execução da tarefa, $F(1,75) = 1,70$ e na carga cognitiva total associada à tarefa $F(1,75) = 0,08$. Porém, analisando as subescalas que

compõem a carga cognitiva, foi possível confirmar que alunos com BCP perceberam um esforço mental relativo à tarefa maior que os alunos com ACP, $F(1,75) = 6,51$, $p = 0,01$. Há evidência de que um baixo CP no tema aumente o esforço mental percebido na tarefa sem que para isso seja gasto um maior tempo na tarefa ou haja uma melhoria nos resultados de aprendizagem.

Tabela 12. Estudo III - médias (desvio-padrão) do desempenho, carga cognitiva e tempo gasto na tarefa em cada condição experimental. A eficiência da instrução é calculada a partir da combinação do ganho de conhecimento e esforço mental em escala normalizada.

	Baixo Conhecimento Prévio (BC)		Alto Conhecimento Prévio (AC)	
	Sem recursos digitais (SR)	Com recursos digitais (CR)	Sem recursos digitais (SR)	Com recursos digitais (CR)
Participantes	16	24	18	19
Desempenho				
Teste de classificação	-0,12 (2,12)	-0,92 (2,38)	5,00 (2,37)	4,95 (1,93)
Pré-teste	2,44 (1,54)	1,96 (1,22)	3,61 (1,94)	2,82 (1,33)
Pós-teste	4,13 (1,94)	4,29 (1,70)	5,06 (1,64)	5,00 (1,97)
Ganho de conhecimento	1,69 (1,65)	2,33 (1,90)	1,44 (1,76)	2,18 (1,78)
Tempo na tarefa	0:27 (0:09)	0:34 (0:09)	0:26 (0:05)	0:30 (0:07)
Carga cognitiva*				
Ex. mental	16,04 (4,20)	14,97 (4,12)	15,26 (3,82)	13,75 (5,36)
Ex. física	5,79 (4,37)	6,81 (4,38)	5,11 (3,26)	5,44 (3,47)
Ex. temporal	8,58 (4,24)	8,75 (3,77)	7,48 (3,76)	8,28 (4,18)
Desempenho	8,25 (2,92)	7,92 (3,22)	7,74 (2,87)	7,61 (3,22)
Esforço mental	6,29 (3,13)	4,67 (2,41)	5,37 (3,21)	5,58 (3,45)
Frustração	4,92 (2,65)	3,72 (2,61)	5,48 (2,51)	4,25 (3,02)
Total	49,88 (13,71)	46,83 (14,31)	46,44 (11,56)	44,91 (13,13)
Eficiência da Instrução				
Desempenho	- 0,15	+ 0,21	- 0,28	+ 0,13
Esforço mental	+ 0,21	- 0,11	+ 0,20	- 0,23
Eficiência	- 0,26	+ 0,23	- 0,34	+ 0,25

Fonte: a autora. *Cada subescala varia de 0 a 16,67 e a carga cognitiva total varia de 0 a 100.

De forma análoga, a ANOVA comprovou que, independentemente do nível de conhecimento prévio dos alunos, há um efeito dos recursos digitais apenas no ganho de

conhecimento, $F(1,75) = 3,82$, $p = 0,05$. Nas demais variáveis, não foi constatado que o uso dos RD afetasse o desempenho do pós-teste $F(1,75) = 0,02$, e na carga cognitiva total associada à tarefa $F(1,75) = 2,71$, (todos com $ps > 0,05$). Porém, foi possível confirmar que os alunos que receberam o MC com recursos digitais (RD) gastaram um tempo estatisticamente maior para completar a tarefa do que os alunos que estudaram o MC sem recursos (SR), $F(1,75) = 7,82$, $p = 0,007$. Há evidência de que a adição de recursos digitais ao MC aumente o tempo consumido para execução da tarefa sem que haja um incremento na carga cognitiva ou mesmo uma melhoria nos resultados de aprendizagem.

Esperava-se que os alunos fossem diferentemente afetados pela presença dos RD, então foi realizado um contraste planejado (SR x CR) considerando os grupos de alunos com mesmo nível de CP. Os resultados da ANOVA mostraram que tanto os alunos com BCP como os alunos com ACP que estudaram o MC SR tiveram menores ganhos de conhecimento do que os alunos que estudaram CR, $F(1,75) = 1,02$ e $F(1,75) = -0,23$, $ps > 0,05$. Isso comprova que, de fato, os alunos foram igualmente afetados pelo uso dos RD, independentemente do seu nível de CP.

Houve um efeito combinado entre o nível de CP e o uso de RD no nível de esforço mental associado à tarefa, $F(1,75) = 3,81$, $p < 0,05$, sendo que os alunos no grupo BCSR foram os que declararam maior esforço mental. Esse resultado evidencia que quando os alunos precisam estudar um conteúdo difícil na forma de MC sem a presença de recursos digitais e sem um nível de conhecimento prévio adequado para lidar com o conteúdo, há um incremento do esforço mental relativo à tarefa. Entretanto, esse esforço extra parece não afetar os ganhos de conhecimento.

7.3.1 Análise da eficiência da instrução

A análise da eficiência da instrução (E), visualizada nos gráficos da Figura 32, permitiu incluir a segunda variável (esforço mental) à análise de desempenho dos alunos, interpretados segundo uma curva normal reduzida (curva Z), isto é, média 0 e desvio-padrão ± 1 (diagonal $\sqrt{2}$).

A ANOVA de fator único mostrou que o nível de conhecimento prévio não influencia a eficiência da instrução; o grupo de alunos com BCP ($M = 0,036$) teve uma combinação de desempenho e esforço mental estatisticamente igual aos alunos com ACP ($M = -0,038$), $F(1, 75) = 0,09$, $p > 0,05$. Por outro lado, foi comprovado um efeito do uso de recursos digitais,

onde a adição desses recursos ao MC (grupos CR) fez aumentar a eficiência da instrução quando comparado aos alunos que estudaram o MC sem a presença desses recursos (grupos SR), $F(1,75) = 4,86$, $p = 0,03$. Esses resultados evidenciam que a adição de recursos digitais aos MCs aumenta o desempenho dos alunos ao mesmo tempo que diminui o esforço mental relativo à tarefa, sendo que tanto os alunos com baixo ou alto conhecimento no tema são igualmente beneficiados nesse processo.

Figura 32. Estudo III - gráfico da eficiência da instrução em função das médias normalizadas de desempenho e esforço mental. Apenas os MCs com recursos digitais tiveram uma eficiência positiva, i.e., gerou um alto ganho de conhecimento com baixo esforço mental. **Fonte:** a autora.

7.3.2 Análise qualitativa do desempenho dos alunos durante o pré-teste

7.3.2.1 Análise das concepções prévias dos alunos considerando os testes de múltipla escolha

A análise do desempenho dos alunos nos testes de múltipla escolha do pré-teste foi resumida no gráfico da Figura 33 (porcentagem de alunos que escolheu a alternativa correta está grafada em preto nesta figura). Para cada questão analisada, foi determinado um ou dois distratores preferidos dos alunos (considerando um limite de 20% de escolha). Segundo Haladyna, Downing, & Rodriguez (2002) um “distrator” é a alternativa selecionada pelos estudantes menos capazes e aquela ignorada pelos mais capazes. O mesmo autor afirma que o número médio de distrator funcional por item, em testes padrões bem elaborados, é um ou dois.

Figura 33. Estudo III – frequência das alternativas escolhidas pelos alunos nas seis questões de múltipla escolha do pré-teste (ver Quadro 1). A porcentagem escrita em preto se refere à alternativa correta. **Fonte:** a autora.

É possível perceber que as questões 3, 4 e 5 foram as mais fáceis para os alunos, uma vez que aproximadamente 50% deles escolheram a alternativa correta. Já as questões 2 e 6 foram as mais difíceis uma vez que menos de 10% dos alunos escolheram a alternativa correta. A questão 1 avaliou a capacidade dos alunos em representar mentalmente o modelo tridimensional submicroscópico concebido para metais no estado sólido. Ainda que 32% dos alunos tenham

escolhido corretamente o modelo do retículo cristalino metálico, 29% deles escolheram o arranjo espacial em que os átomos estão um do lado do outro. A escolha desse distrator reflete o modelo bidimensional adotado em boa parte dos livros didáticos e da escolha dos professores ao representar os compostos metálicos.

A questão 2 buscou avaliar como os alunos reconhecem o tipo de interação eletrostática que ocorre na rede cristalina metálica. Apenas 9% dos alunos escolheram a correta interação a qual ocorre entre cátions e seus elétrons de valência. A grande maioria (49%) escolheu a interação que ocorre entre cátions e ânions (alternativa a), remetendo à confusão conceitual que existe entre ligação iônica e metálica. Na concepção do aluno, se um determinado átomo metálico “perde” seus elétrons de valência ele se tornará um cátion e, portanto, deveria existir um ânion negativo que “recebe” esses elétrons. Porém, no retículo cristalino metálico só existem átomos de determinado elemento químico e, devido à grande mobilidade dos elétrons de valência, formam-se alguns cátions tornando toda a estrutura estável eletricamente. O segundo distrator preferencial dos alunos foi a interação entre prótons e elétrons (alternativa b, 38%), evidenciando a confusão que existe entre a estabilidade atômica *versus* a estabilidade de um composto, neste caso, metálico.

A questão 6 avaliou um conhecimento geral sobre a teoria de bandas e a definição de nível de Fermi. Era de se esperar que os alunos tivessem pouco conhecimento sobre esse assunto uma vez que raramente é um assunto abordado em nível médio. Na dificuldade conceitual, o aluno tende a se desviar para assuntos de senso comum, sendo confirmado quando os alunos escolhem preferencialmente a alternativa que remete à condutividade elétrica (alternativa a, 33%). Outros 44% dos alunos se dividiram igualmente entre outros dois distratores que remetiam à resistividade elétrica e a banda de energia. Esse último pode ter sido devido à pergunta incluir a palavra “banda” o que poderia ter trazido uma “dica” para a resposta, que, no caso, estava incorreta.

Em relação às questões consideradas de maior nível de facilidade, foi possível observar algumas informações interessantes. Por exemplo, o principal distrator escolhido por 16% dos alunos da questão 4 remete à falta de conhecimento sobre o caráter ondulatório dos elétrons. Já na questão 3, ambos os distratores escolhidos por 23% dos alunos indicam a falta de entendimento sobre a teoria das colisões, bem como o efeito da temperatura sobre os materiais elétricos. Por fim, ainda que 56% dos alunos tenham acertado a alternativa na questão 5, a teoria do OM é raramente abordada em nível médio. O que pode explicar este índice de acerto relativamente alto é a associação entre o conceito de elétrons de valência, que sendo os mais

externos, preenchem a banda de valência. Percebe-se que não há total clareza nessa questão uma vez que 29% dos alunos escolheram o distrator relativo à banda de condução como resposta.

7.3.2.2 Análise das concepções prévias dos alunos considerando as questões dissertativas

A análise das questões dissertativas do pré-teste gerou grande quantidade de informação a respeito das concepções errôneas que os alunos possuem sobre o fenômeno macroscópico da condução elétrica e os modelos submicroscópicos necessários para explicar tal fenômeno. Por exemplo, a questão 7 (Por que os metais são bons condutores de eletricidade?) tinha o objetivo de levantar o conhecimento prévio dos alunos sobre a condutividade elétrica nos metais e, para isso, os alunos deveriam compreender e expor que a eletricidade é proveniente das cargas elétricas negativas dos elétrons que circulam livremente pela rede cristalina. Mais da metade de todos os alunos avaliados (57%, $n = 42$) cometeu incorreções ao responder à essa questão. Dentre as principais dificuldades observadas é possível citar:

- Confusão entre os diferentes tipos de ligações químicas, como é o caso das respostas dos alunos 9 e 52, que apresentam dificuldade em distinguir ligação iônica de metálica ou dos alunos 28 e 57, que confundem ligação covalente e metálica.

A9: Por causa dos *íons*.

A52: Por serem compostos por *cátions e ânions* que, ao interagirem entre si, conduzem eletricidade.

A28: Suas *ligações covalentes*, no qual alguns elétrons sobram na sua valência, fazem com que a última camada de elétrons se mova livremente.

A57: Porque é um conjunto de *moléculas* neutras.

- Característica, quantidade ou posição dos elétrons nos níveis/subníveis de energia, como pode ser vista nas respostas dos alunos a seguir.

A6: Eu acho que é pela *instabilidade* dos elétrons.

A32: Os metais são bons condutores de eletricidade porque possuem *maior número de elétrons*.

A70: Porque possuem *poucos elétrons* na camada de valência.

A73: Porque os metais possuem *grandes quantidades de massa* e tem carga elétrica negativa.

A questão 8 do pré-teste (Como você explica que no estado sólido o cloreto de sódio não conduz eletricidade, mas o sódio sim?) avaliou o conhecimento dos alunos sobre as características dos compostos iônicos e metálicos quando em estado sólido. Esperava-se que o aluno fosse capaz de explicar que o cloreto de sódio é um composto iônico que, em meio sólido, não apresenta íons – apenas quando em meio aquoso. Já o sódio é um composto metálico, que no estado sólido apresenta os cátions metálicos e os elétrons livres na rede cristalina e, que essa mobilidade eletrônica, permite a condução de eletricidade. Com base nas respostas dos alunos foi possível identificar que, novamente, mais da metade dos alunos (56%, $n = 41$) apresentou algum tipo de incorreção em suas respostas. As dificuldades mais predominantes são aquelas em que os alunos atribuem às diferenças macroscópicas de condução elétrica:

- Em função da composição das substâncias, particularmente a presença do átomo de cloro.

A51: Porque o *sódio* só conduz eletricidade quando *está sozinho*.

A56: Essa diferença se explica, pois uma das substâncias *possui cloro* e a outra não.

A72: A diferença ocorre por causa da presença dos *átomos de cloro* no cloreto de sódio.

- Em função de outras características que não se relacionam ao fenômeno da condutividade elétrica. Foi possível identificar a adoção incorreta de modelos relativos à solvatação, diluição, estados físicos, energia/calor, massa, volume e densidade.

A8: O cloreto deixa o estado sólido mais *denso*, dificultando a passagem da eletricidade.

A24: Porque está menos *diluído*.

A34: No estado sólido a *energia cinética* é menor entre as moléculas.

A65: Imagino que pode ter algo a ver com maior *volume de água* no sódio.

A73: As *massas* são diferentes.

A questão 9 (Por que o grafite, apesar de ser um composto covalente, conduz eletricidade?) buscou avaliar a capacidade dos alunos em explicar essa exceção dentre os compostos covalentes. O grafite (ou grafita) apresenta uma rede cristalina lamelar onde as

ligações duplas conjugadas (ligações *pi*) permitem a mobilidade dos elétrons não compartilhados. O número de alunos que forneceu respostas incorretas foi de 38% ($n = 28$), sendo que a maioria das respostas:

- Apenas confirmava ou refutava a própria questão.
 - A32: Porque o grafite *possui propriedades condutoras* mesmo sendo um composto covalente.
 - A62: O grafite mesmo sendo um composto covalente *conduz eletricidade*, ele é um ametal.
 - A38: Grafite *não* é um condutor.
 - A78: Acredito que o grafite seja um *isolante* elétrico.
- Apresentou confusão entre os diferentes tipos de ligações e interações químicas ou ligação com outros átomos.
 - A11: Porque ele tem uma *interação molecular* baixa.
 - A20: Porque a forma de sua estrutura e *seus íons* permitem que haja corrente elétrica.
 - A24: Por apresentar em sua composição *moléculas de metal*.
 - A61: Porque em determinadas situações, suas *moléculas se agitam* proporcionando tal fato.
 - A65: Imagino que deve ter muitas *moléculas de ferro*, que é um condutor.
- Atribuiu incorretamente à organização, mobilidade, quantidade, posição e atração dos elétrons na estrutura do grafite. Isso pode ser visto nas respostas dos alunos abaixo.
 - A43: Porque há *elétrons ligados nas extremidades* do mesmo.
 - A29: Por conta das *ondas dos elétrons*.
 - A61: Porque ele é feito só de carbono, e possui uma organização atômica em que a *quantidade de elétrons* na camada de valência não permite a fácil interação com outras substâncias.

Por fim, a questão 10 (Na prática, como você faria para diferenciar um isolante elétrico de um semicondutor?), tinha o objetivo de avaliar o conhecimento dos alunos sobre as medidas empíricas de condutividade elétrica, mais especificamente, o uso do condutivímetro ou multímetro. Dos alunos avaliados, 41% ($n = 30$) apresentaram respostas incorretas do ponto de vista científico, sendo que a maioria dos alunos fornece respostas:

- Ingênuas e superficiais, com base nas informações da própria questão. Esse é o caso das respostas dadas pelos alunos a seguir.

A12: Isolante é aquele que *neutraliza* a rede elétrica. Semicondutor é meio metal e meio não metal. Condutor elétrico é aquele que possui propriedades para condução de eletricidade.

A29: Um isolante *inibe* as ligações elétricas, um semicondutor apresenta afinidade com elétrons e um condutor apresenta afinidade completa.

A63: Os que podem ou não conduzir eletricidade através dos corpos.

A64: Deve-se verificar a *quantidade de material* condutor existente.

A77: Em um isolante não ocorre corrente elétrica. Em um condutor elétrico ocorre.

- Utilizando outros modelos que não se relacionam diretamente com a condutividade elétrica, como, por exemplo, aspectos puramente macroscópicos (rigidez, reatividade, textura e formato do material) ou modelos energéticos (temperatura, calor).

A6: Porque os isolantes tendem a ser *isolantes térmicos* também, logo, eles apresentam temperaturas menos variáveis com o ambiente.

A31: Aquecendo-o e vendo se ocorre alteração na *cor do objeto*. Isto é, se ele começa a desviar sua cor para o vermelho.

A32: É possível distinguir com a observação das *reações* causadas em cada um desses.

A48: Pela sua composição *resistente e adaptável*.

A44: Pela interação da *troca de energia*.

A79: Pela *rigidez* do material.

7.4 Conclusões do Estudo III

Com base nos resultados obtidos, foi possível concluir (para a primeira pergunta deste estudo) que, independentemente do nível de conhecimento prévio dos alunos, houve um efeito do uso de RD no ganho de conhecimento e no tempo para completar a tarefa. O estudo do hipertexto organizado na forma de MC levou a um maior ganho de conhecimento factual e conceitual associado a maior tempo consumido na tarefa, confirmando as Hipóteses 3a e 3c. Em contrapartida, a Hipótese 3b foi refutada, pois, o aumento da quantidade de informação a ser processada não causou um aumento da carga cognitiva total declarada pelos alunos para

condução da tarefa. Esse resultado evidencia que o hipertexto organizado na forma de um MC otimizado com dicas gráficas de navegação potencializa a aprendizagem sem gerar uma demanda cognitiva adicional, sendo eficiente até para os alunos com BCP no tema.

Respondendo à segunda pergunta deste estudo, foi possível concluir que o nível de conhecimento prévio dos alunos não surtiu efeito em nenhuma das variáveis em teste (desempenho no pós-teste, ganho de conhecimento, tempo na tarefa e carga cognitiva), refutando as Hipóteses 3d e 3e. Era de se esperar que os alunos com ACP fossem recuperar esquemas já disponíveis em sua estrutura cognitiva sobre o tema e manipulá-los na MT de modo a integrar novas informações, levando à retenção. Já os alunos com BCP iriam construir os esquemas na MT, codificando-os e transferindo-os à MLP. O primeiro processo descrito acarretaria em menor carga cognitiva imposta ao aluno durante a tarefa quando comparado ao segundo, gerando diferenças em seus desempenhos. Se todas as variáveis analisadas se mostraram estatisticamente iguais para ambos os grupos, é possível concluir que mesmo os alunos classificados com ACP neste estudo, na verdade, não tinham esquemas construídos sobre o tema, tendo, portanto, que realizar essa aquisição de esquemas durante a tarefa. Vale notar que essa aquisição de informação de fato ocorreu, uma vez que todos os grupos de alunos tiveram um incremento no ganho de conhecimento.

Além disso, foi constatado um efeito combinado do uso dos RD com o nível de CP na subescala esforço mental associado à tarefa, indicando que quando os alunos precisam estudar um conteúdo difícil na forma de MC sem a presença de RD para complementar as informações e sem um nível de CP adequado para lidar com o conteúdo, há um incremento das atividades cognitivas relativas à tarefa, ainda que esse esforço extra não tenha diminuído os ganhos de conhecimento. Segundo de Jong (2010) e Moreno (2010), a aglutinação de subescalas psicométricas que avaliam diferentes aspectos subjetivos durante a tarefa pode acarretar em erros nas medidas de carga cognitiva e, conseqüentemente, levar a interpretações incorretas a respeito das CGs associadas ao material instrucional.

Para responder à terceira e última pergunta deste estudo, foram considerados os resultados do contraste planejado e da eficiência da instrução. Esperava-se que os alunos com diferentes níveis de CP fossem ser assimetricamente afetados pela presença dos RD. Porém, o que ficou comprovado é que o hipertexto é mais eficiente do que o MC sozinho, levando a maiores ganhos de conhecimento com menor esforço mental, beneficiando igualmente alunos com baixo e alto CP. Com isso, refutamos as Hipóteses 3f e 3g. Dois pontos nos chamam a atenção para explicar tais resultados. Primeiramente, se considerarmos o resultado já discutido para a pergunta

anterior, não havia de fato dois grupos de alunos com diferentes níveis de CP, portanto, os resultados aqui obtidos só corroboram e confirmam nossas suspeitas. Em segundo lugar, foi possível confirmar um efeito positivo do uso do hipertexto organizado na forma de um MC otimizado para potencializar a aprendizagem de conceitos químicos difíceis. Com isso, ficou comprovado o Princípio Multimídia, no qual a apresentação de materiais combinando imagem e texto potencializa o processamento generativo ou a manutenção representacional, levando a uma maior construção de esquemas na MT e, consequentemente, maior aprendizagem.

CAPÍTULO 8. CONCLUSÕES DA TESE

O objetivo desta tese foi avaliar o impacto da adição de dicas gráficas, da hierarquia conceitual, do uso de recursos digitais e do conhecimento prévio dos alunos para minimizar a desorientação causada por MCs utilizados como materiais instrucionais de Química e, consequentemente, potencializar a aprendizagem de conceitos químicos. Para isso, três estudos foram conduzidos com alunos ingressantes à universidade ao longo dos quatro anos destinados ao doutoramento. Nos Capítulos 5, 6 e 7 foram apresentadas em detalhes as principais conclusões de cada estudo. Neste capítulo final, é feita uma apreciação conjunta desses resultados, apresentado, em linhas gerais, algumas: implicações educacionais, limitações teóricas e metodológicas da pesquisa, possibilidades de estudos futuros.

8.1 Implicações educacionais

A compreensão das cores nos fogos de artifício e da condução elétrica em diferentes materiais só é possível por meio da adoção de modelos atômicos que concebem a interação matéria-energia (sob os postulados da mecânica quântica). Aprender esses conteúdos pode levar a concepções alternativas ou errôneas, uma vez que é exigido do aluno um alto nível de abstração e explicações em nível submicroscópico de um fenômeno macroscópico. Muitas dessas concepções são relatadas na literatura como obstáculos à aprendizagem, as quais devem ser devidamente identificadas pelo professor e mediadas por uma instrução eficiente.

Ao contrário da maioria dos estudos descritos na literatura, nesta tese, propusemos a representação desses conteúdos químicos na forma de um MC elaborado pelo professor (e não pelo aluno). O professor, como especialista no tema, tem em sua estrutura cognitiva uma rede de conhecimento altamente interligada. Ao representar esse conhecimento na forma de um MC, ele torna visível aos alunos os conceitos mais importantes e suas relações sobre um determinado tema, permitindo um ponto de partida para instrução e mediação do conhecimento conceitual.

O uso dos MCs elaborados pelo professor como material de ensino requer a atenção para dois pontos importantes. Primeiro, como esse MC deve ser elaborado para garantir os melhores

resultados de aprendizagem durante a instrução e segundo, como essa instrução deve ser planejada para operacionalizar o uso dos MCs em sala de aula. Ambos os problemas requerem, do professor, um planejamento instrucional eficiente.

De acordo com os pressupostos das TCC e TAM, materiais instrucionais devem ser elaborados de modo que as demandas cognitivas impostas ao aluno não excedam a limitada capacidade da MT, caso contrário, não sobram recursos cognitivos suficientes para processar e adquirir novas informações, isto é, aprender. Para isso, devemos levar em conta, durante a preparação do material de ensino, a dificuldade ou complexidade do conteúdo a ser representado (i.e., CG intrínseca) e o formato da instrução (i.e., CG extrínseca).

No caso específico dos nossos estudos, um planejamento instrucional eficiente implicou em adotar estratégias capazes de minimizar ao máximo a desorientação causada pelo MC, ou seja, em representar o conhecimento científico por meio de seus conceitos e relações de modo que o processamento e aquisição de novas de informações pudessem ser facilitados. Consequentemente, maiores ganhos de conhecimento com baixo esforço mental seriam observados como resultado da liberação de recursos cognitivos da MT alocados, agora, para aprender. As estratégias manipuladas nesta tese foram: o uso de dicas gráficas (cor e número), o tipo de organização conceituais (hierárquica em “árvore”, hierárquica cíclica ou não hierárquica), o uso de recursos digitais associados ao MC (hipertexto) e o nível de conhecimento prévio dos alunos (baixo ou alto).

Com base nos resultados, foi possível concluir que, independentemente do tipo de MC utilizado como material instrucional, todos os alunos foram capazes de aumentar o seu nível de conhecimento factual sobre a química dos fogos de artifício e a condução elétrica de diferentes materiais. Isso nos trouxe evidências de que os MCs são uma potencial ferramenta de ensino mesmo quando os alunos não os elaboram. Porém, também foi possível perceber que os resultados de aprendizagem são ainda melhores quando o MC apresenta certas características.

Respondendo à pergunta da tese é possível afirmar que o uso da cor e da hierarquia conceitual como dicas gráficas de navegação foram capazes de minimizar a desorientação provocada pelos MCs via gestão de CG intrínseca e redução da CG extrínseca, respectivamente. O processamento generativo (i.e., recursos da MT alocados para a aprendizagem) pôde ser potencializado pelo uso de um hipertexto organizado na forma de um MC otimizado e associado a recursos digitais.

Os alunos que estudaram os MCs coloridos, com uma estrutura conceitual hierárquica e com recursos digitais, tiveram maiores ganhos de conhecimento factual e/ou conceitual quando

comparados aos alunos que não tiveram acesso a essas estratégias, confirmando a Hipótese A da tese. Porém, na maioria das comparações realizadas, não houve diferença no esforço mental ou carga cognitiva para compreender os conceitos químicos, refutando a Hipótese B. Possivelmente, a diminuição no esforço mental, conseguida pela diminuição da desorientação, foi compensada pela dedicação à compreensão do conteúdo científico, evidenciado pelos maiores ganhos de conhecimento. Por fim, a Hipótese C da tese não pôde ser confirmada nem refutada, uma vez que não foi possível encontrar alunos, dentre aqueles que participaram da pesquisa, com alto nível de CP a respeito da condução elétrica de materiais. Para finalizar, reunimos algumas orientações aos professores que desejarem utilizar os MCs como material instrucional de Química (e outras disciplinas):

- **O professor precisa estar treinado na técnica:** a elaboração do MC pelo professor deve ser precedida de uma etapa de treinamento na técnica de mapeamento conceitual. O professor precisa garantir a elaboração de um MC com a mais alta qualidade de estrutura visual e conteúdo semântico, refletindo suas representações mentais de modo mais fidedigno. A falta do treinamento implica na elaboração de um MC de baixa qualidade, que ao ser utilizada em sala de aula como material de ensino, pode prejudicar o processo de aprendizagem.
- **A hierarquia conceitual é uma dica gráfica de navegação:** a organização hierárquica dos conceitos, partindo daqueles mais gerais no topo do MC que se desdobram em conceitos mais específicos na base do MC (i.e., hierarquia em “árvore”), foi uma excelente aliada à navegação do conteúdo. Esse tipo de hierarquia oferece ao aluno um guia para leitura do conteúdo remetendo ao processamento natural de aquisição de informação.
- **A cor também é uma dica gráfica de navegação:** o uso de cores, como forma de agrupar visualmente conceitos de mesma área de conhecimento, permitiu uma melhor gestão e integração do conteúdo. Porém, esta dica gráfica só foi necessária quando a hierarquia conceitual em “árvore” não está presente já auxiliando na navegação do conteúdo. O uso de cores é uma boa estratégia para “setorizar” o MC em áreas distintas, alertando para conceitos e relações entre assuntos, teorias, capítulos, temas, conteúdos diferentes dentro de um mesmo contexto.
- **Outras organizações hierárquicas conceituais existem, mas devem ser adotadas com cautela:** para conteúdos sistêmicos (i.e., de causa e consequência), o uso da hierarquia cíclica aliada à dica gráfica cor apresentou a mais alta eficiência da instrução, ou seja, gerou relativamente o maior ganho de conhecimento com o menor esforço mental associado à compreensão do conteúdo de Química. Diferente da hierarquia em “árvore”, aquela cíclica não remete a um processamento natural de

informações sendo, portanto, menos óbvia para o aluno durante a navegação do conteúdo. A desorientação provocada por um formato menos usual foi drasticamente diminuída pela partição do conteúdo (com o uso de cores), permitindo uma maior integração do conhecimento químico. O uso de diferentes tipos de hierarquia (e.g., cíclica, em rede, radial ou centro-periferia, linear) é possível, mas deve ser adotada com cautela. Considere antecipadamente, o tipo de conhecimento que está sendo representado e a possibilidade de uso conjunto à outras dicas gráficas de navegação.

- **Hipertextos organizados na forma de MCs associados a recursos digitais são eficientes:** o uso de hipertextos na educação vem sendo cada vez mais explorado como um ambiente dinâmico no qual o aluno adota a sua sequência de navegação e estudo. A utilização de um MC de alta qualidade visual e semântica permitiu oferecer ao aluno um suporte à navegação do conteúdo ditado pelo especialista. De modo geral, o uso da hierarquia cíclica aliada à cor como dica gráfica diminuiu a desorientação provocada pelo MC, liberando recursos da MT destinadas à aprendizagem. A presença de recursos digitais associados a esse MC permitiu a produção de um hipertexto que potencializou processamentos generativos, levando os alunos a maiores ganhos de conhecimento factual e conceitual, mesmo com um conteúdo químico de elevado nível de complexidade.
- **A instrução deve considerar o nível de conhecimento prévio dos alunos:** uma instrução eficiente para alunos com baixo nível de CP pode ser desmotivadora para alunos com alto CP. Já uma instrução eficiente para alunos com alto CP pode levar à sobrecarga cognitiva alunos com baixo CP. O professor, ao identificar as concepções alternativas e o nível de CP dos alunos, pode elaborar o MC de acordo com as características da turma. É possível, em um mesmo MC, oferecer conceitos já vistos anteriormente permitindo seu resgate no momento da instrução, assim como os novos conceitos a serem aprendidos. As muitas possibilidades de adaptar a instrução por meio do uso dos MCs como material de ensino considerando o nível de CP da turma, amplia a potencialidade desse organizador gráfico para propósitos educacionais.
- **O MC do professor não deve ser usado como “gabarito”:** o MC elaborado pelo professor não deve ser apresentado aos alunos como a única possibilidade de representação do conhecimento mapeado. Caso contrário, há a possibilidade dos alunos tenderem à memorização dos conceitos do MC do professor durante a instrução em vez da construção do significado a partir dessa rede conceitual. Para evitar esse tipo de situação, é necessário explicar aos alunos as características de um MC e, pouco a pouco, permitir que eles construam as suas próprias representações. Por exemplo, permita que eles sugiram novos termos de ligação para os mesmos conceitos ou ainda que eles adicionem novos conceitos e relações ao MC feito pelo professor. Por fim, associe diferentes ferramentas de ensino de modo a compor estratégias em que o MC esteja presente mas não seja a única metodologia adotada para mediação do conhecimento.

8.2 Limitações da pesquisa e estudos futuros

Algumas limitações teóricas e metodológicas foram identificadas nesta pesquisa. Essas limitações nos permitem conceber a continuidade das pesquisas sobre o uso de MCs como material instrucional de Química em possíveis estudos futuros.

Primeiramente, quando se fala em ensinar e aprender Ciências (e Química), deve-se ter em mente os processos de: aprender Ciências, isto é, compreender o conhecimento científico conceitual; aprender sobre Ciências, isto é, compreender aspectos de história, filosofia e metodologias inerentes à prática científica; e, aprender a fazer Ciências, isto é, se tornar capaz de participar de atividades práticas ou experimentais que objetivam a aquisição de conhecimento científico (Hodson, 1992). Por terem um caráter essencialmente conceitual, os MCs são limitados quanto à organização e representação de conhecimentos procedimentais. Por exemplo, a representação das etapas de uma prática experimental sobre equilíbrio químico seria melhor organizada em um fluxograma do que na forma de um MC, ainda que o conhecimento conceitual por trás dos pressupostos, princípios e leis que regem o equilíbrio químico possa ser representado na forma de MCs. Além disso, sem a adição de recursos visuais (ilustrações, vídeos, simulações), os MCs se restringem a utilizar rótulos para descrever eventos, tendo, portanto, uma limitação no que diz respeito às representações de processos químicos nos níveis conceituais submicroscópicos e simbólicos. Por exemplo, descrever o funcionamento da pilha de Daniell por meio de conceitos e proposições é diferente de ver a pilha funcionando na prática, das representações submicroscópicas de fluxo de carga elétrica (por meio do fio) e de íons (por meio da ponte salina) ou mesmo do equacionamento das semirreações de redução e oxidação e do cálculo da diferença de potencial da pilha. Ao mesmo tempo, uma parte necessária à explicação do funcionamento dessa pilha requer domínio, articulação e conexão entre diferentes conceitos, tais como elétrons, eletrodo, cátodo, ânodo, ponte salina, oxidorredução, semicela, corrosão, solução etc. Essa rede de conceitos pode facilmente ser organizada e representada na forma de um MC, ainda que a dinâmica de funcionamento da pilha não.

Por isso, acreditamos que o MC deva ser usado como uma ferramenta pedagógica em sala de aula que, aliada a outros materiais de ensino, é capaz de potencializar a aquisição de conhecimento conceitual por meio da negociação de significados dos conceitos e relações tão particulares às Ciências e à Química. O uso de recursos digitais associados ao MC, que articule

e complemente os demais níveis representacionais da Química, pode ser uma boa alternativa para solucionar essa limitação.

Em segundo lugar, as teorias cognitivistas adotadas como fundamentação teórica da tese explicam o processo de aprendizagem por meio do processamento, aquisição e recuperação de informações. Ainda que amparado em uma perspectiva construtivista, na qual o aluno como participante ativo desse processo, age intencionalmente para estabelecer relações entre o que ele já sabe e as novas informações, essas teorias são limitadas a enxergar a aprendizagem como um balanço entre o ganho de conhecimento e as cargas cognitivas impostas ao aluno durante a tarefa. As componentes motora, afetiva e social, fatores preponderantes para ocorrência da aprendizagem, são desconsideradas na adoção dessas teorias.

Para fins de pesquisa, é preciso ter consciência de que o reducionismo imposto pela fundamentação teórica e pela pergunta de tese gerou impactos na forma como a pesquisa foi conduzida, prevalecendo o caráter pragmático, a metodologia quantitativa e o desenho experimental. Porém, como professores, devemos ter consciência de que (1) não é apenas o caráter cognitivo que está em jogo durante o processo de aprendizagem e (2) não é a diferença entre notas antes e depois de uma única intervenção de estudo com o MC que revela a ocorrência da aprendizagem significativa em sala de aula. Esses apontamentos são corroborados por um dos resultados obtidos nesta tese – alguns alunos não foram capazes de alterar suas concepções alternativas ou errôneas após o período de estudo com o MC. Além do fato de que algumas concepções são de fato robustas e mais difíceis de serem sanadas pela instrução (Chi, 2005), ficou claro que, para alguns alunos, apenas uma intervenção de estudo com um MC (e sem a mediação do professor) não foi suficiente para fazer com que eles revessem seus esquemas mentais. Além disso, mesmo para os alunos que alteraram suas respostas no pós-teste, oferecendo uma visão mais adequada do ponto de vista científico, o fez em um momento logo após a intervenção. Talvez tivesse sido interessante realizar outra etapa de avaliação desse conhecimento passado alguns meses da intervenção ou então, avaliar a capacidade de o aluno articular o conhecimento adquirido em outro contexto que diferisse da intervenção. Em outras palavras, a utilização de um desenho experimental do tipo pré-teste-pós-teste pode não ter sido suficiente para avaliar a ocorrência dos processos de transferência do conhecimento.

Ainda há espaço na literatura para estudos que explorem o uso de MCs como material instrucional de Química em diferentes contextos e metodologias de pesquisa. Estudos futuros podem explorar, por exemplo,

- Outros assuntos igualmente difíceis ao ensino da Química, tais como eletroquímica, equilíbrio químico, radioatividade, reações químicas.
- O uso de outros tipos de dicas gráficas de navegação ou recursos digitais, tais como vídeos, explicações em áudio, animações, ilustrações.
- A validade dos MCs em outros níveis educacionais, tais como o Ensino Fundamental II e o Ensino Médio.
- O uso combinado do MC com outras ferramentas pedagógicas.
- O uso de outras metodologias de coleta e análise de dados, tais como os protocolos *think-aloud*, entrevistas semi-estruturadas e análises qualitativas.
- A aplicação de pós-testes tardios (após alguns meses) e testes de transferências (situações em um contexto diferente daquele em que ocorreu a intervenção).

REFERÊNCIAS

- Aguiar, J. G. (2012). *Desenvolvimento e validação de um questionário para avaliar o nível de proficiência de alunos em mapeamento conceitual*. Dissertação de Mestrado, Instituto de Física, Química, Biociências e Faculdade de Educação, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.
- Aguiar, J. G., & Correia, P. R. M. (2013). Como fazer bons mapas conceituais? Estabelecendo parâmetros de referências e propondo atividades de treinamento. *Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências*, 13(2), 141-157.
- Aguiar, J. G., & Correia, P. R. M. (2014). Is a concept mapping with errors useful to evaluate learning outcomes? A study on declarative knowledge and reading strategy using eye-tracking. In P. R. M. Correia, M. E. Infante-Malachias, A. J. Cañas, & Novak, J. D. (Eds.). *Concept Mapping for Learning and Innovation. Proc. of the Sixth Intl. Conference on Concept Mapping*, São Paulo: USP, Vol. 2, pp. 290-297.
- Aguiar, J. G., & Correia, P. R. M. (2015). Por que os fogos de artifícios têm cores? Um estudo sobre o uso de mapas conceituais para potencializar a aprendizagem de conceitos químicos. In *Anais do X Encontro Nacional de Pesquisas de Educação em Ciências*, Águas de Lindoia: Abrapec.
- Aguiar, J. G., & Correia, P. R. M. (2016). Using concept maps as instructional materials to foster the understanding of the atomic model and matter–energy interaction. *Chemistry Education Research & Practice*, 17(4), 756-765.
- Aguiar, J. G., & Correia, P. R. M. (2017). From representing to modelling knowledge: Proposing a two-step training for excellence in concept mapping. *Knowledge Management & E-Learning*, 9(3), 366–379.
- Aguiar, J. G., Cicuto, C.A.T., & Correia, P.R.M. (2014). How can we prepare effective concept maps? Training procedures and assessment tools to evaluate mappers proficiency. *Revista de Educacion de las Ciencias*, 15(1), 12-19.

- Aguiar, J. G., Correia, P. R. M., & Kinchin, I. M. (2017). Mapping pedagogic frailty in science education: a comparison of academics' espoused values. In *Proceedings of 17th European Association for Research on Learning and Instruction Biennial Conference*, Tampere: University of Tampere.
- Ainsworth S. (2006). A conceptual framework for considering learning with multiple representations. *Learning and Instruction*, 16(3), 183–198.
- Amadiou, F., van Gog, T., Paas, F., Tricot, A., & Mariné, C. (2009). Effects of prior knowledge and concept-map structure on disorientation, cognitive load, and learning. *Learning and Instruction*, 19(5), 376-386.
- Atkins, P., & Jones, L. (2011). *Princípios de Química: questionando a vida moderna e o meio ambiente* (5 Ed.) São Paulo: Bookman.
- Ausubel, D. P. (2000). *The acquisition and retention of knowledge: a cognitive view*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Baddeley, A. (1998). *Human memory*. Boston: Allyn & Bacon.
- Bartlett, F. (1932). *Remembering: a study in experimental and social psychology*. New York: Cambridge University Press.
- Beege, M., Schneider S., Nebel, S. & Günther, D. R. (2017). A meta-analytic review of signaling effects on cognition and learning. In *Proceedings of 17th European Association for Research on Learning and Instruction Biennial Conference*, Tampere: University of Tampere.
- Benarroch, A. (2000). El desarrollo cognoscitivo de los estudiantes en el área de la naturaleza corpuscular de la materia. *Enseñanza de las Ciencias*, 18(2), 235-246.
- Ben-Zvi R., Eylon B.-S., & Silberstein J. (1986). Is an atom of copper malleable? *Journal of Chemical Education*, 63(1), 64–66.
- Bisra, K. (2010). How learners visually navigate concept maps: an analysis of eye movements. Dissertação de Mestrado, Simon Fraser University, Vancouver, Canadá.
- Blunt, J. R., & Karpicke, J. D. (2014). Learning with retrieval-based concept mapping. *Journal of Educational Psychology*, 106(3), 849–858.
- Böhr, N. (1913). On the constitution of atoms and molecules. *Philosophical Magazine*, Series 6, 26(153), 1-25.
- Briggs, G., Shamma, D., Cañas, A. J., Carff, R., Scargle, J., & Novak, J. D. (2004). Concept maps applied to mars exploration public outreach. In A. J. Cañas & J. D. Novak & F. González (Eds.), *Concept Maps: Theory, Methodology, Technology*, *Proc. of the First*

- Intl Conference on Concept Mapping*, Pamplona, Spain: Universidad Pública de Navarra.
- Butts, B., & Smith, R. (1987). HSC chemistry students' understanding of the structure and properties of molecular and ionic compounds. *Research in Science Education*, 17(1), 192–201.
- Bybee, R. W., & Fuchs, B. (2006). Preparing the 21st century workforce: a new reform in science and technology education. *Journal of Research in Science Teaching*, 43(4), 349–352.
- Callister, W. D. (2002). *Ciência e Engenharia de Materiais – uma introdução*, Rio de Janeiro: LTC.
- Cañas, A. J., & Novak, J. D. (2006). Re-examining the foundations for effective use of concept maps. In A. J. Cañas & J. D. Novak, *Proc of the Second Intl Conference on Concept Mapping*, Vol. 1, pp. 494–502. San Jose, Costa Rica: Universidad de Costa Rica.
- Cañas, A. J., Ford, K. M., & Coffey, J. W. (1994). Concept maps as a hypermedia navigational tool. In *Proc. Of Seventh Florida Artificial Intelligence Research Symposium (FLAIRS)*, Pensacola, FL.
- Cañas, A. J., Hill, G., Carff, R., Suri, N., Lott, J., Gómez, G.,...& Carvajal, R. (2004). Cmaptools: a knowledge modeling and sharing environment. In A. J. Cañas & J. D. Novak, & F. González (Eds.), *Concept Maps: Theory, Methodology, Technology, Proc. of the First Int. Conference on Concept Mapping*, Pamplona, Spain: Universidad Pública de Navarra.
- Cañas, A. J., Novak, J. D., & Reiska, P. (2015). How good is my concept map? Am I a good Cmapper? *Knowledge Management & E-Learning*, 7(1), 6–19.
- Cangoz, B., & Altun, A. (2012). The effects of hypertext structure, presentation, and instruction types on perceived disorientation and recall performances. *Contemporary Educational Technology*, 3(2), 81–98.
- Caramazza, A., McCloskey M., & Green B. (1981). Naive beliefs in “sophisticated” subjects: misconceptions about trajectories of objects. *Cognition*; 9(2), 117–23.
- Carlson, R., Chandler, P., & Sweller, J. (2003). Learning and understanding science instructional material. *Journal of Educational Psychology*, 95(3), 629–640.
- Chassot, A. (2016). *Alfabetização científica: questões e desafios para a educação* (7 Ed.) Porto Alegre: Unijuí.

- Chi, M. T. H. (2005). Common sense conceptions of emergent processes: Why some misconceptions are robust. *Journal of Learning Science*, 14(2), 161–199.
- Cho, H.-H., Kahle, J. B., & Nordland, F. H. (1985). An investigation of high school biology textbooks as sources of misconceptions and difficulties in genetics and some suggestions for teaching genetics. *Science Education*, 69(5), 707–719.
- Coll, R. K., & Taylor, N. (2001). Alternative conceptions of chemical bonding held by upper secondary and tertiary students. *Research in Science and Technological Education*, 19(2), 171–191.
- Conklin, J. (1987). Hypertext: an introduction and survey. *Computer*, 20(9), 17-41.
- Correia, P. R. M., & Aguiar, J. G. (2014). Concept mapping informed by Cognitive Load Theory: implications for tasks involving learner-generated Cmaps. In Correia, P. R. M., Infante-Malachias, M. E., Cañas, A. J., & Novak, J. D. (Eds.) *Concept Mapping for Learning and Innovation, Proc. of the Sixth Intl. Conference on Concept Mapping*, São Paulo: USP, Vol. 2, pp. 150-157.
- Correia, P. R. M., & Aguiar, J. G. (2015). Assessment task based on concept map with errors to foster pedagogic resonance in higher education. In *Proc. of 16th European Association for Research on Learning and Instruction Biennial Conference*, Limassol, Chipre.
- Correia, P. R. M., & Aguiar, J. G. (2017). Profiling pedagogic frailty using concept maps. . In Kinchin, I. M. & Winstone, N. E. (Eds.). *Pedagogic frailty and resilience in the university*. (pp. 195–210) Rotterdam: Sense Publishers.
- Correia, P. R. M., Cicuto, C. A. T. & Aguiar, J. G. (2014). Using novakian concept maps to foster peer collaboration in higher education. In: Ifenthaler, D., & R. Hanewald (Orgs.). *Digital knowledge maps in education*. (pp. 195 – 217). New York: Springer.
- Correia, P. R. M.; Aguiar, J. G.; Viana, A. D.; Cabral, G. C. P. (2016). Por que vale a pena usar mapas conceituais no Ensino Superior. *Revista de Graduação da USP - Grad+*, 1(1), 41-51.
- Correia, P. R. M.; Vale, B. X.; Dazzani, M.; Infante-malachias, M. E. (2010). The importance of scientific literacy in fostering education for sustainability: Theoretical considerations and preliminary findings from a Brazilian experience. *Journal of Cleaner Production*, 18(7), 678-685.
- Correia, P., Cabral, G., & Aguiar J. (2016). Cmaps with Errors: Why not? Comparing Two Cmap-Based Assessment Tasks to Evaluate Conceptual Understanding. In: Cañas, A.

- J., Reiska, P.; Novak, J. D. (Eds). *Innovating with Concept Mapping* (Vol. 1, pp. 1-15) Dordrecht: Springer.
- Cress, U., & Knabel, O. B. (2003). Previews in hypertexts: effects on navigation and knowledge acquisition. *Journal of Computer Assisted Learning*, 19(4), 517–527.
- Creswell, J. W. (2013). *Research design: qualitative, quantitative and mixed methods approaches*. Londres: Sage.
- Cros, D., Chastrette, M., & Fayol, M. (1988). Conceptions of second year university students of some fundamental notions in chemistry *International Journal of Science Education*, 10(3), 331-336.
- Davies, M. (2011). Concept mapping, mind mapping and argument mapping: What are the differences and do they matter? *Higher Education*, 62(3), 279–301.
- de Jong, T. (2010). Cognitive load theory, educational research, and instructional design: some food for thought. *Instructional Science*, 38(2), 105-134.
- de Posada, J. M. (1997). Conceptions of high school students concerning the internal structure of metals and their electric conduction: Structure and evolution. *Science Education*, 81(4), 445-467.
- Dehaan, R. L. (2005). The impending revolution in undergraduate science education. *Journal of Science Education and Technology*, 14(2), 253-269.
- Derbentseva, N., & Kwantes, P. Cmap readability: propositional parsimony, map layout and semantic clarity and flow. In: P. R. M. Correia, M. E. Infante-Malachias, A. J. Canas, & J. D. Novak. *Concept Mapping to Learn and Innovate. Proc. of the Sixth Intl Conference on Concept Mapping*. São Paulo: USP, Vol. 3, pp. 86-93.
- Dias, P., & Sousa, A. P. (1997). Understanding Navigation and Disorientation in Hypermedia Learning Environments. *Journal of Educational Multimedia and Hypermedia*, 6(2), 173-185.
- Dillon, A., & Gabbard, R. (1998). Hypermedia as an educational technology: a review of the quantitative research literature on learner comprehension, control, and style. *Review of Educational Research*, 68(3), 322-349.
- Driver, R., & Easley, J. (1978). Pupils and paradigms: a review of literature related to concept development in adolescent science students. *Studies in Science Education*, 5(1), 61-84.
- Driver, R., Asoki, H., Leach, J., Scott, P., & Mortimer, E. F. (1994). Constructing scientific knowledge in the classroom. *Educational Researcher*, 23(7), 5-12.
- Field, A. (2013). *Descobrimos a Estatística Utilizando o SPSS* (3 Ed.) São Paulo: Artmed.

- Folker, S., Ritter, H., & Sichelschmidt, L. (2005) Processing and integrating multimodal material – The influence of color-coding. In B. G. Bucciarelli & G. Salvendy (Eds.), *Proc. of the 27th Annual Conference of the Cognitive Science Society*, pp. 690-695.
- França, A. C. G., Marcondes, M. E. R., & Carmo, M. P. (2009). Estrutura atômica e Formação de íons: uma análise das ideias dos alunos do 3º ano do Ensino Médio. *Química Nova na Escola*, 31(4), 275-282.
- Gabel, D. (1999). Improving Teaching and Learning through Chemistry Education Research: A Look to the Future, *Journal of Chemical Education*, 76(4), 548-554.
- Gabel, D. L., Samuel, K. V., & Hunn, D. (1987). Understanding the particulate nature of matter. *Journal of Chemical Education*, 64(8), 695-697.
- Gilbert, J. K. (1997). *Exploring models and modeling in science and technology education*. The University of Reading: The new Bulmershe papers.
- Giordan, A., & Vecchi, G. (1996). *As origens do saber: das concepções dos aprendentes aos conceitos científicos*. Trad. Bruno Charles Magne. Porto Alegre: Artes Médicas.
- Gomes, C. B. (2005). *USP Leste: a expansão da universidade do oeste para leste*. São Paulo: EDUSP.
- Gomes, H. J. P., & Oliveira, O. B. (2007). Obstáculos epistemológicos no ensino de ciências: um estudo sobre suas influências nas concepções de átomo. *Ciências & Cognição*, 12, 96-109.
- Gopher, D., & Braune, R. (1984). On the psychophysics of workload: why bother with subjective measures? *Human Factors*, 26(5), 519–532.
- Griffiths, A. K. & Preston, K. R. (1992). Grade 12 Students' misconceptions relating to fundamental characteristics of atoms and Molecules. *Journal of Research in Science Teaching*, 29(6), 611-628.
- Griffiths, A. K., & Grant, B. A. C. (1985). High school students' understanding of food webs: Identification of a learning hierarchy and related misconceptions. *Journal of Research in Science Teaching*, 22(5), 421–436.
- Grimaldi, P. J., Poston, L., & Karpicke, J. D. (2015) How Does Creating a Concept Map Affect Item-Specific Encoding? *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 41(4), 1049–1061.
- Hagemans, M. G., van der Meij, H. & de Jong, T. (2013). The effects of a concept map-based support tool on simulation-based inquiry learning. *Journal of Educational Psychology*, 105(1), 1–24.

- Haladyna, T. M., Downing, S. M., & Rodriguez, M. C. (2002). A review of multiple-choice item-writing guidelines for classroom assessment. *Applied Measurement in Education*, 15(3), 309-333.
- Hall, R. H., & Sidio-Hall, M. A. (1994a). The effect of color enhancement on knowledge map processing. *Journal of Experimental Education*, 62(3), 209-217.
- Hall, R. H., & Sidio-Hall, M.A. (1994b). The effect of student color coding of knowledge maps and test anxiety on student learning. *Journal of Experimental Education*, 62(4), 291-302.
- Harrison A. G., & Treagust D. F. (2000). Learning about atoms, molecules, and chemical bonds: a case study of multiplemodel use in grade 11 chemistry, *Science Education*, 84(3), 352–381.
- Harrison, A. G., & Treagust, D. F. (1996). Secondary students mental models of atoms and molecules: implications for teaching science. *Science Education*, 80(5), 509–534.
- Harrison, A. G., & Treagust, D. F. (2002). The particulate nature of matter: chalenges in understanding the submicroscopic world. In: J. K Gilbert, O. de Jong, R. Justi, D. F. Treagust, & J. van Driel, J. (Eds.). *Chemical Education: towards research-based practice* (pp. 189-212). Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Hart, S. G., & Staveland, L. E. (1988). Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of empirical and theoretical research. In P. A. Hancock & Najmedin, M. *Human mental workload: advances in psychology*. Amsterdam: North Holland. pp. 139–183.
- Hauser, S., Nückles, M., & Renkl, A. (2006). Enhancing computer-supported writing of learning protocols by adaptive prompts. *Computers in Human Behavior*, 22(1), 77-92.
- Hay, D., Kinchin I., & Lygo-Baker, S. (2008). Making learning visible: the role of concept mapping in higher education. *Studies in Higher Education*, 33(3), 295–311.
- Hegarty, M.,& Just, M. A. (1989). Understanding machines from text and diagrams. In H. Mandl & J. R. Levin (Eds.), *Knowledge acquisition from text and pictures* (pp. 171–194). Amsterdam: Elsevier.
- Hilbert, T. S., & Renkl, A. (2009). Learning how to use a computer-based concept-mapping tool: Self-explaining examples helps. *Computers in Human Behavior*, 25(2), 267–274
- Hodson, D. (1992). In search of a meaningful relationship: an exploration of some issues relating to integration in science and science education. *International Journal of Science Education*, 14(5), 541-562.

- Holbrook, J., & Rannikmae, M. (2007). The nature of science education for enhancing scientific literacy. *International Journal of Science Education*, 29(11), 1347-1362.
- Horton, P. B., McConney, A. A., Gallo, M., Woods, A. L., Senn, G. J., & Hamelin, D. (1993). An investigation of the effectiveness of concept mapping as an instructional tool. *Science Education*, 77(1), 95-111.
- Huang, H. S., Chiou, C. C., Chiang, H. K., Lai, S. H., Huang, C. Y., & Chou, Y. Y. (2012). Effects of multidimensional concept maps on fourth graders' learning in web-based computer course. *Computers & Education*, 58(3), 863-873.
- Hwang, G., Kuo, F., Chen, N. & Ho, H. (2004). Effects of an integrated concept mapping and web-based problem solving approach on students' learning achievements, perceptions and cognitive loads. *Computers & Education*, 71, 77-86.
- Jacobson, M. J., & Archodidou, A. (2000). The design of hypermedia tools for learning: fostering conceptual change and transfer of complex scientific knowledge. *The Journal of the Learning Sciences*, 9(2), 149-199.
- Jacobson, M. J., Maouri, C., Mishra, P., & Kolar, C. (1995). Learning with hypertext learning environments: theory, design, and research. *Journal of Educational Multimedia and Hypermedia*, 4(4), 321-364.
- Jamet, E. (2014). An eye-tracking study of cueing effects in multimedia learning. *Computers in Human Behavior*, 32, 47-53.
- Jeung, H. J., Chandler, P., & Sweller, J. (1997). The role of visual indicators in dual sensory mode instruction. *Educational Psychologist*, 17(3), 329-343.
- Johnstone, A. H. (1982). Macro-and micro chemistry, *School Science Review*, 64(227), 377-379.
- Johnstone, A. H. (1991). Why is science difficult to learn? Things are seldom what they seem. *Journal of Computer Assisted Learning*, 7(2), 75 - 83.
- Johnstone, A. H. (1993). The development of chemistry teaching. *Journal of Chemical Education*, 70(9), 701-705.
- Johnstone, A. H. (2000). Teaching of chemistry – logical or psychological? *Chemistry Education Research and Practice European*, 1(1), 9-15.
- Johnstone, A. H., & Otis, K. H. (2006). Concept mapping in problem based learning: a cautionary tale. *Chemistry Education Research and Practice*, 7(2), 84-95.

- Justi R., & Gilbert J. (2000). History and philosophy of science through models: some challenges in the case of “the atom”. *International Journal of Science Education*, 22(9), 993–1009.
- Justi, R., & Gilbert, J. (2003). Models and modelling in chemical education. In: J. K Gilbert, O. de Jong, R. Justi, D. F. Treagust, & J. van Driel, J. (Eds.). *Chemical education: towards research-based practice*. (pp. 47-68) Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Kalyuga, S., Ayres, P., Chandler, P., & Sweller, J. (2003). The expertise reversal effect. *Educational Psychologist*, 38(1), 23–31.
- Kalyuga, S., Chandler, P., & Sweller, J. (1998). Levels of expertise and instructional design. *Human Factors*, 40(1), 1–17.
- Kalyuga, S., Chandler, P., & Sweller, J. (1999). Managing split-attention and redundancy in multimedia instruction. *Applied Cognitive Psychology*, 13(4), 351-371.
- Kerlinger, F. N. (1979). *Metodologia da Pesquisa em Ciências Sociais*. São Paulo: EDUSP.
- Kinchin, I. M. (2016) *Visualising powerful knowledge to develop the expert student: A knowledge structures perspective on teaching and learning at university*, (pp. 1 - 134). Rotterdam, Sense Publishers.
- Kinchin, I. M., Lygo-Baker, S., & Hay, D. B. (2008). Universities as centres of non-learning. *Studies in Higher Education*, 33(1), 89-103.
- Kleinberg, J., & Kaufman, H. (1971). Constancy in short-term memory: Bits and chunks. *Journal of Experimental Psychology*, 90(2), 326-33.
- Kotz, J. C., Treichel, P. M., & Weaver, G. C. (2006). *Chemistry and Chemical Reactivity*, Thomson Learning.
- Kutbay, E. (2016). An investigation of modality, redundancy and signaling effects in multimedia learning with abstract and concrete representation. Dissertação de Mestrado, Boğaziçi University, Istanbul, Turquia.
- Landis J. R., & Koch G. G. (1977). The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*, 33(1), 159-174.
- Levine, I. N. (2014). *Quantum chemistry*. Boston: Pearson.
- Lima, A. A., & Núñez, I. B. (2011). Reflexões acerca da natureza do conhecimento químico: uma investigação na formação inicial de professores de química. *Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências*, 11(3), 209-229.
- Lin, L., & Atkinson, R. K. (2011). Using animations and visual cueing to support learning of scientific concepts and processes. *Computers & Education*, 56(3), 650–658.

- Linsingen, I. (2007). Perspectiva educacional CTS: aspectos de um campo em consolidação na América Latina. *Ciência & Ensino*, 1, 1-16.
- Liu, P. (2014). Using eye tracking to understand learners' reading process through the concept-mapping learning strategy. *Computers & Education*, 78, 237-249.
- Madrid, R. I., & Cañas, J. J. (2009). The effect of reading strategies and prior knowledge on cognitive load and learning with hypertext. *The Ergonomics Open Journal*, 2, 124-132.
- Mayer, R. E. & Moreno, R. (2003). Nine ways to reduce cognitive load in multimedia learning, *Educational Psychologist*, 38(1), 43–52.
- Mayer, R. E. (2002). Rote versus meaningful learning. *Theory into Practice*, 41(4), 226-232.
- Mayer, R. E. (2004). Should there be a three-strikes rule against pure discovery learning? The case for guided methods of instruction. *American Psychologist*, 59(1), 14–19.
- Mayer, R. E. (2009). *Multimedia Learning* (2a Ed) New York: Cambridge University Press.
- Mayer, R. E. (2010). Seeking a science of instruction. *Instructional Science*, 38(2), 143-145.
- Mayer, R. E., & Chandler, P. (2001). When learning is just a click away: does simple user interaction foster deeper understanding of multimedia messages? *Journal of Educational Psychology*, 93(2), 390–397.
- Mayer, R. E., & Moreno, R. (2003). Nine ways to reduce cognitive load in multimedia learning. *Educational Psychologist*, 38(1), 43–52.
- Mayer, R. E., & Sims, V. K. (1994). For whom is a picture worth a thousand words? Extensions of a dual-coding theory of multimedia learning. *Journal of Educational Psychology*, 86(3), 389–401.
- Mayer, R. E., Mathias, A., & Wetzell, K. (2002). Fostering understanding of multimedia messages through pre-training: evidence for a two-stage theory of mental model construction. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 8(3), 147–154.
- Mayer, R. E., Moreno, R., Boire, M., & Vagge, S. (1999). Maximizing constructivist learning from multimedia communications by minimizing cognitive load. *Journal of Educational Psychology*, 91(4), 638–643.
- McDonald, S., & Stevenson, R. (1996). Disorientation in hypertext: the effects of three text structures on navigation performance. *Applied Ergonomics*, 27(1), 61-68.
- Melo, M. R. (2002). *Estrutura atômica e ligações química – uma abordagem para o ensino médio*. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brasil.

- Melo, M. R., & Lima Neto, E. G. (2013). Dificuldades de Ensino e Aprendizagem dos Modelos Atômicos. *Química Nova na Escola*, 35(2), 112-122.
- Miller, G. A. (1956). The magical number seven, plus or minus two: Some limits on our capacity for processing information. *Psychological Review*, 63(2), 81-97.
- Mora, N. D., Lucas, J. F. R., & Maran, M. A. (2010) *Apostila de materiais elétricos*. Centro de engenharia e ciências exatas. Unioeste.
- Moreira, M. A. (1998). *Aprendizagem significativa*. Brasília: Editora da UnB.
- Moreira, M. A. (2006). *A Teoria da Aprendizagem Significativa e sua implementação em sala de aula*. Brasília: UnB.
- Moreno, R. (2010). Cognitive load theory: more food for thought. *Instructional Science*, 38(2), 135–141.
- Moreno, R., & Mayer, R. E. (1999). Cognitive principles of multimedia learning: the role of modality and contiguity. *Journal of Educational Psychology*, 91(2), 358–368.
- Moreno, R., Mayer, R. E., Spire, H. A., & Lester, J. C. (2001). The case for social agency in computer-based teaching: do students learn more deeply when they interact with animated pedagogical agents? *Cognition and Instruction*, 19(2), 177–213.
- Mueller-Kalthoff, T., & Moeller, J. (2003). The effects of graphical overviews, prior knowledge, and self-concept on hypertext disorientation and learning achievement. *Journal of Educational Multimedia and Hypermedia*, 12(2), 117–134.
- Mulford, D. R., & Robinson, W. R. (2002). An inventory for alternate conceptions among first-semester general chemistry students. *Journal of Chemical Education*, 79(6), 739-44.
- Nahum, T. M., Mamlok-Naaman, R., Hofstein, A. & Taber, K. S. (2010). Teaching and learning the concept of chemical bonding. *Studies in Science Education*, 46(2), 179-207.
- NASA Ames Research Center (1986). *Manual do NASA-TLX v.10* (paper and pencil), California, CA: Moffet Field. Recuperado em <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/200000021488.pdf> [fev. 18].
- Nascimento, T. S., Aguiar, J. G., & Correia, P. R. M. (2015). Estudo sobre a desorientação causada pela estrutura de mapas conceituais digitais: implicações para a aprendizagem de conceitos químicos. In *Anais do Simpósio Internacional de Iniciação Científica da Universidade de São Paulo*, São Paulo, USP.
- Nesbit, J. C., & Adesope, O. O. (2006). Learning with concept and knowledge maps: a meta-analysis. *Review of Educational Research*, 76(3), 413–448.

- Nesbit, J. C.; Larios, H.; & Adesope, O. O. (2007). How students read concept maps: a study of eye movements. In J. Montgomerie, C. & Seale (Ed.), *Proc. of World Conference on Educational Multimedia, Hypermedia and Telecommunications* (pp. 961–3970). Vancouver, Canada: Association for the Advancement of Computing in Education (AACE).
- Nicoll G., Francisco J. S. & Nakhleh M. (2001). An investigation of the value of using concept maps in general chemistry. *Journal of Chemical Education*, 78(8), 1111-1123.
- Novak, J. D. (1977). An alternative to piagetian psychology for science and mathematics education. *Science Education*, 61(4), 453–477.
- Novak, J. D. (1984). Application of advances in learning theory and the philosophy of science to the improvement of chemistry teaching. *Journal of Chemical Education*, 61(7), 607–612.
- Novak, J. D. (2002). Meaningful learning: the essential factor for conceptual change in limited or inappropriate propositional hierarchies leading to empowerment of learners. *Science Education*, 86, 548-571.
- Novak, J. D., & Musonda, D. (1991). A 12-year longitudinal study of science concept-learning. *American Educational Research Journal*, 28(1), 117-153.
- Novak, J.D. (2010). *Learning, creating and using knowledge: concept maps as facilitative tools in schools and corporations* (2. Ed.) New York: Routledge.
- Novick, S., & Nussbaum, J. (1978). Junior high school pupils' understanding of the particulate nature of matter: an interview study. *Science Education*, 62(3), 273-281.
- Ozcelik, E., Karakus, T., Kursun, E., & Cagiltay, K. (2009). An eye-tracking study of how color coding affects multimedia learning. *Computers & Education*, 53(2), 445–453.
- Paas, F. G. W. C. (1992). Training strategies for attaining transfer of problem-solving skill in statistics: A cognitive-load approach. *Journal of Educational Psychology*, 84(4), 429-434.
- Paas, F. G. W. C., & van Merriënboer, J. J. G. (1993). The efficiency of instructional conditions: an approach to combine mental effort and performance measures. *Human Factors*, 35(4), 737–743.
- Paas, F., Renkl, A., & Sweller, J. (2004). Cognitive load theory: instructional implications of the interaction between information structures and cognitive architecture. *Instructional Science*, 32, 1-8.

- Paas, F., van Merriënboer, J. J. G., & Adam, J. J. (1994). Measurement of cognitive load in instructional research. *Perceptual and Motor Skills*, 79, 419–430.
- Paivio, A. (1990). *Mental representations: a dual coding approach*. Oxford: Oxford University Press.
- Pereira, A. O., Rocha, R. L., Aguiar, J. G., & Correia, P. R. M. (2014). Using worked example to teach the role of focus question: Building conceptual understanding about concept mapping. In P. R. M. Correia, M. E. Infante-Malachias, A. J. Cañas, & Novak, J. D. (Eds.) *Concept Mapping to Learn and Innovate. Proc. of the Sixth Intl Conference on Concept Mapping*. São Paulo: USP, 2014. Vol. 3, pp. 794-799.
- Peterson, R. F., Treagust, D. F., & Garnett, P. (1989). Development and application of a diagnostic instrument to evaluate grade 11 and 12 students' concepts of covalent bonding and structure following a course of instruction. *Journal of Research in Science Teaching*, 26(4), 301–314.
- Piaget, J. (1928). *Judgement and reasoning in the child*. New York: Harcourt.
- Plass, J. L., Moreno, R., & Brünken, R. (2010). *Cognitive load theory*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Pollock, E., Chandler, P. & Sweller, J. (2002). Assimilating complex information, *Learning and Instruction*, 12(1), 61–86.
- Pozo, J. I., & Crespo, M. A. G. (2006). *A aprendizagem e o ensino de ciências: do conhecimento cotidiano ao conhecimento científico* (5. ed.) Porto Alegre: Artmed.
- Redford, J. S., Thiede, K. W., Wiley, J., & Griffin, T. D. (2012). Concept mapping improves metacomprehension accuracy among 7th graders. *Learning and Instruction*, 22(4), 262-270.
- Rocha, R. L., Pereira, A. O., Aguiar de, J. G., & Correia, P. R. M. (2014). How to teach the concept of propositions? A worked-example approach to highlight the need of propositional semantic meaning in concept maps. . In P P. R. M. Correia, M. E. Infante-Malachias, A. J. Cañas, & Novak, J. D. (Eds.) *Concept Mapping to Learn and Innovate. Proc. of the Sixth Intl Conference on Concept Mapping*, São Paulo: USP. Vol. 2, pp. 277-282.
- Russell, M. S. (2008). *The Chemistry of Fireworks*, Royal Society of Chemistry.
- Rutherford, E. (1911). The scattering of α and β particles by matter and the structure of the atom. *Philosophical Magazine*, Series 6, 21(125), 669–688.

- Rutherford, E. (1914). The structure of the atom. *Philosophical Magazine*, Series 6, 27(159), 488–498.
- Safayeni, F., Derbentseva, N., & Cañas, A. J. (2005). A theoretical note on concept maps and the need for cyclic concept maps. *Journal of Research in Science Teaching*, 42(7), 741–766.
- Safdar, M., Hussain A., Shah I., & Rifat, Q. (2012). Concept Maps: An Instructional Tool to Facilitate Meaningful Learning. *European Journal of Educational Research*, 1(1), 55–64.
- Salmerón, L., Baccino, T., Cañas, J. J., Madrid, R. I., & Fajardo, I. (2009). Do graphical overviews facilitate or hinder comprehension in hypertext? *Computers & Education*, 53(4), 1308–1319.
- Salmerón, L., Kintsch, W., & Cañas, J. J. (2006). Reading strategies and prior knowledge in learning from hypertext. *Memory & Cognition*, 34(5), 1157–1171.
- Santos Filho, P. F. (2007). *Estrutura Atômica e Ligação Química*. 2. ed. Campinas: autor-editor.
- São Paulo (Estado), Secretaria da Educação. (2009). *Proposta curricular do Estado de São Paulo para o ensino de química para o ensino médio*. São Paulo: SE.
- Schneider, R. (2005) Hypertext narrative and the reader: a view from cognitive theory. *European Journal of English Studies*, 9(2), 197–208.
- Schubert, E. F. (2006). *Light-emitting diodes*. (2 Ed) Cambridge: Cambridge University Press.
- Shapiro, A. M. (1999). The relationship between prior knowledge and interactive overviews during hypermedia-aided learning. *Journal of Educational Computing Research*, 20(2), 143–167.
- Shapiro, A., & Niederhauser, D. (2004). Learning from Hypertext: Research Issues and Findings. In D. H. Jonassen, (Ed.), *Handbook of Research for Educational Communications and Technology* (2. Ed, pp. 605–620). Mahwah: Lawrence Erlbaum Associates.
- Shavelson, R. J., Ruiz-Primo, M. A., & Wiley, E. W. (2005). Windows into the mind. *Higher Education*, 49(4), 413–430.
- Smith, P. L., & Ragan, T. J. (1999). *Instructional design*. New York: John Wiley & Sons.
- Souza, V. C. A., Justi, R. E., & Ferreira, P. F. M. (2006). Analogias utilizadas no ensino dos modelos atômicos de Thomson e Böhr: uma análise crítica sobre o que os alunos pensam a partir delas. *Revista Investigações em Ensino de Ciências*, 2(1), 7–28.

- Stensvold, M. S., & Wilson, J. T. (1990). The interaction of verbal ability with concept mapping in learning from a chemistry laboratory activity. *Science Education*, 74(4), 473–480.
- Stevenson, M. P. Hartmeyer, R., & Bentsen, P. (2017). Systematically reviewing the potential of concept mapping technologies to promote self-regulated learning in primary and secondary science education. *Educational Research Review*, 21, 1-16
- Stull, A. T., & Mayer, R. E. (2007). Learning by doing versus learning by viewing: three experimental comparisons of learner-generated versus author-provided graphic organizers. *Journal of Educational Psychology*, 99(4), 808-820.
- Sunawan, & Xiong, J. (2017). The impact of control belief and learning disorientation on cognitive load: the mediating effect of academic emotions in two types of hypermedia learning environments. *The Turkish Online Journal of Educational Technology*, 16(1), 177-189.
- Sweller, J. (1988). Cognitive load during problem solving: effects on learning. *Cognitive Science*, 12, 257–285.
- Sweller, J. (1989). Cognitive technology: some procedures for facilitating learning and problem solving in mathematics and science. *Journal of Educational Psychology*, 81(4), 457–466.
- Sweller, J. (1994). Cognitive Load Theory, learning difficulty, and instructional design. *Learning and Instruction*, 4(4), 295–312.
- Sweller, J. (1999). *Instructional design in technical areas*. Camberwell: ACER Press.
- Sweller, J., Ayres, P., & Kalyuga, S. (2011). *Cognitive Load Theory*. New York: Springer.
- Taber, K. S. (1997). Student understanding of ionic bonding: Molecular versus electrostatic thinking? *School Science Review*, 78(285), 85–95.
- Taber, K. S. (1998). An alternative conceptual framework from chemistry education. *International Journal of Science Education*, 20(5), 597-608.
- Taber, K. S. (2013). Upper secondary students' understanding of the basic physical interactions in analogous atomic and solar systems. *Research in Science Education*, 43(4), 1377–1406.
- Taber, K. S., & Adbo, K. (2013). Developing chemical understanding in the explanatory vacuum: Swedish high school students' use of an anthropomorphic conceptual framework to make sense of chemical phenomena. In G. Tsapalis & H. Sevian (Eds.), *Concepts of Matter in Science Education* (pp. 347-370). Dordrecht: Springer.

- Taber, K. S., & Watts, M. (1996). The secret life of the chemical bond: students' anthropomorphic and animistic references to bonding. *International Journal of Science Education*, 18(5), 557-568.
- Talanquer, V. (2011). Macro, submicro, and symbolic? The many faces of the chemistry triplet. *International Journal of Science Education*, 33(2), 179-195
- Thomson, J. J. (1897). Cathode rays. *Philosophical Magazine*, Series 5, 44(269): 293-316.
- Tindall-Ford, S., Chandler, P., & Sweller, J. (1997). When two sensory modes are better than one. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 3(4), 257-287.
- Torres, P. L., & Marriott, R. C. V. (2010). *Handbook of research on collaborative learning using concept mapping*. Hershey: IGI Global.
- Treagust, D. F., & Chittleborough, G. (2001). Chemistry: a matter of understanding representations. In J. Brophy (Ed.) *Subject-specific instructional methods and activities* (Advances in Research on Teaching, Vol. 8., pp. 239-267). United Kindom: Emerald Group Publishing Limited.
- Treagust, D. F., Chittleborough, G. & Mamiala, T. L. (2003). The role of submicroscopic and symbolic representations in chemical explanations, *International Journal of Science Education*, 25(11), 1353-1368.
- Underwood G, & Foulsham T. (2006). Visual saliency and semantic incongruency influence eye movements when inspecting pictures. *Quarterly Journal of Experimental Psychology* (Hove), 59(11), 1931-49.
- Unz, D. C., & Hesse, F. W. (1999). The use of hypertext for learning. *Journal of Educational Computing Research*, 20(3), 279-295.
- Usberco, J. & Salvador, E. (2002) *Química* (Vol. único, 5. Ed.) São Paulo: Saraiva.
- Vitiello, G. C., Aguiar, J. G., & Correia, P. R. M. (2015). A hierarquia como fator crítico para a elaboração de bons mapas conceituais. In *Anais do I Congresso de Graduação da Universidade de São Paulo*, São Paulo: USP.
- Wallace, D. S., West, S. W. C., Ware, A., & Dansereau, D. F. (1998). The effect of knowledge maps that incorporate Gestalt principles of learning. *Journal of Experimental Education*, 67(1), 5-16.
- Wang C., & Barrow, L. H. (2013). Exploring conceptual frameworks of models of atomic structures and periodic variations, chemical bonding, and molecular shape and polarity: a comparison of undergraduate general chemistry students with high and low levels of content knowledge. *Chemistry Education Research and Practice*, 14, 130-146.

- Wertheimer, M. (1938). Laws of organization in perceptual forms. In W. Ellis. *A source book of Gestalt psychology* (pp. 71-88). London: Routledge & Kegan Paul.
- Wertheimer, M. (1958). Principles of perceptual organization. In D. C. Beardslee & M. Wertheimer (Eds.), *Readings in perception* (pp. 115-135). Princeton: Van Nostrand.
- Wu, H. K., Krajcik, J. S., & Soloway, E. (2001). Promoting conceptual understanding of chemical representations: students' use of a visualization tool in the classroom. *Journal of Research in Science Teaching*, 38(7), 821 - 842.
- Zumdahl, S. S., & Zumdahl, S. A. (2014). *Chemistry* (9 Ed.) Boston: Cengage Learning.

APÊNDICES

A1 – Termo de Consentimento Livre e Esclarecido usado no Estudo I

Termo de Consentimento Livre e Esclarecido – Resolução CNS 196/96

Eu, Joana Guílares de Aguiar, doutoranda do Programa de Pós-Graduação Interunidades em Ensino de Ciências da Universidade de São Paulo, realizo uma pesquisa intitulada "Estudos sobre a desorientação causada por mapas conceituais que organizam materiais instrucionais: implicações para o Ensino de Química" sob orientação do Prof. Dr. Paulo Rogério Miranda Correia. Nessa etapa do projeto, objetiva-se avaliar a influência de dicas gráficas, na compreensão de conceitos relacionados à estrutura da matéria, apresentados em mapas conceituais impressos.

Para tanto, gostaria que o(a) senhor(a) participasse desta pesquisa, na qual me comprometo a seguir a portaria do Conselho Nacional de Saúde CNS/96 relacionada à Pesquisa com Seres Humanos, respeitando o seu direito de:

- Ter liberdade de participar ou deixar de participar do estudo, sem que isso lhe traga algum prejuízo ou risco,
- Manter o seu nome em sigilo absoluto, sendo que o que disser não lhe resultará em qualquer dano à sua integralidade,
- Interromper a participação na pesquisa caso se sinta incomodado(a) com a mesma,
- Responder às questões levantadas pela pesquisadora durante a intervenção, caso seja solicitado(a),
- Garantia de receber uma resposta a alguma dúvida durante ou após a entrevista.

Essa pesquisa é de baixo risco psicológico, voluntária e sem qualquer tipo de remuneração para a mesma.

Contatos para eventuais dúvidas ou informações: 11-980816040 (Joana).

Agradecemos desde já pela atenção e participação,

Joana Guílares de Aguiar (joanaguilaes@usp.br)
Paulo Rogério Miranda Correia (prmc@usp.br)

Declaro que, após esclarecido pelo pesquisador e ter entendido o que me foi explicado, consinto em participar do presente Projeto de Pesquisa. Estou ciente que uma cópia desse documento ficará comigo e a outra com o pesquisador.

Nome do participante

Assinatura do participante

São Paulo, 01 de julho de 2014.

A2 – Termo de Consentimento Livre e Esclarecido usado no Estudo II

grupo de pesquisa
mapas conceituais

Termo de Consentimento Livre e Esclarecido – Resolução CNS 466/2012

O estudo a ser desenvolvido nessa oportunidade faz parte do projeto “Análise dos mapas conceituais como materiais de estudo sobre temas científicos”, coordenado pelo Prof. Dr. Paulo Rogério Miranda Correia (EACH/USP Leste). Eu, Joana Guílares de Aguiar, aluna do Programa de Pós-Graduação Interunidades em Ensino de Ciências da Universidade de São Paulo, faço doutorado na área de Ensino de Química e pretendo avaliar a influência da estrutura na compreensão de conceitos sobre estrutura da matéria. Para isso, um mapa conceitual a respeito desse assunto foi elaborado e impresso em folha de papel. O procedimento de coleta de dados contempla um questionário inicial, a leitura do mapa conceitual impresso e um questionário final. As respostas aos questionários e a leitura do mapa conceitual deverão ser feitas individualmente, sem qualquer auxílio desta pesquisadora, de colegas ou de material didático.

Gostaria que o(a) senhor(a) participasse desta pesquisa, comprometendo-me desde já a seguir a portaria do Conselho Nacional de Saúde CNS/2012 relacionada à Pesquisa com Seres Humanos, respeitando o seu direito de:

- *Ter liberdade de participar ou deixar de participar do estudo, sem que isso lhe traga algum prejuízo ou risco.*
- *Manter o seu nome em sigilo absoluto, sendo que o que disser não lhe resultará em qualquer dano à sua integridade.*
- *Interromper a participação na pesquisa caso se sinta incomodado(a) com a mesma.*
- *Responder às questões levantadas pela pesquisadora durante a intervenção, caso seja solicitado(a).*
- *Receber respostas a alguma dúvida durante ou após a entrevista.*

Essa pesquisa é de baixo risco psicológico, voluntária e sem qualquer tipo de remuneração para a mesma.

Contatos para eventuais dúvidas ou informações: 9-8081-6040 (Joana Aguiar), 9-7133-2004 (Paulo Correia) e 3091-1046 (Comitê de Ética e Pesquisa da EACH).

Joana Guílares de Aguiar
joanaguilaes@usp.br

Paulo Rogério Miranda Correia
EACH/USP Leste, Bloco II, 3º Andar, 320/D
prmc@usp.br

Declaro que, após esclarecido pelo pesquisador e ter entendido o que me foi explicado, consinto em participar do presente projeto de pesquisa. Estou ciente que uma cópia desse documento ficará comigo e a outra com o pesquisador.

Nome do participante

Assinatura do participante

A3 – Termo de Consentimento Livre e Esclarecido usado no Estudo III

Termo de Consentimento Livre e Esclarecido – Resolução CNS 466/2012

O estudo a ser desenvolvido nessa oportunidade faz parte do projeto “Mapas conceituais para ensino, aprendizagem e desenvolvimento docente”, coordenado pelo Prof. Dr. Paulo Rogério Miranda Correia (EACH/USP Leste). Eu, Joana Guilaes de Aguiar, aluna do Programa de Pós-Graduação Interunidades em Ensino de Ciências da Universidade de São Paulo, faço doutorado na área de Ensino de Química e pretendo avaliar a influência do conhecimento prévio e do uso de recursos digitais na compreensão de conceitos químicos. Para isso, um mapa conceitual foi elaborado e será projetado na tela do computador. O procedimento de coleta de dados contempla um questionário inicial, um pré-teste, o estudo do mapa conceitual, um pós-teste e a declaração da carga cognitiva associada à tarefa. As respostas aos questionários e a leitura do mapa conceitual deverão ser feitas individualmente, sem qualquer auxílio da pesquisadora, colegas, internet ou material didático. Gostaria que o(a) senhor(a) participasse desta pesquisa, comprometendo-me desde já a seguir a portaria do Conselho Nacional de Saúde CNS/2012 relacionada à Pesquisa com Seres Humanos, respeitando o seu direito de:

- *Ter liberdade de participar ou deixar de participar do estudo, sem que isso lhe traga algum prejuízo ou risco.*
- *Manter o seu nome em sigilo absoluto, sendo que o que disser não lhe resultará em qualquer dano à sua integridade.*
- *Interromper a participação na pesquisa caso se sinta incomodado(a) com a mesma.*
- *Responder às questões levantadas pela pesquisadora durante a intervenção, caso seja solicitado(a).*
- *Receber respostas a alguma dúvida durante ou após a entrevista.*

Essa pesquisa é de baixo risco psicológico, voluntária e sem qualquer tipo de remuneração para a mesma. Registro do projeto sob número CAAE 40104314.7.0000.5390.

Contatos para eventuais dúvidas ou informações: 9-8081-6040 (Joana Aguiar), 9-7133-2004 (Paulo Correia) e 3091-1046 (Comitê de Ética e Pesquisa da EACH).

Joana Guilaes de Aguiar

Joana Guilaes de Aguiar
joanaguilaes@usp.br

Paulo Rogério Miranda Correia

Paulo Rogério Miranda Correia
EACH/USP Leste, Bloco II, 3º Andar, 320/D
prmc@usp.br

Declaro que, após esclarecido pelo pesquisador e ter entendido o que me foi explicado, consinto em participar do presente projeto de pesquisa. Estou ciente que uma cópia desse documento ficará comigo e a outra com o pesquisador.

Nome do participante

Assinatura do participante

A4 – Mapa conceitual sobre a química dos fogos de artifício antes da validação com especialistas

A5 – Mapa conceitual sobre fogos de artifício com hierarquia cíclica, preto e branco e sem numeração nas proposições

A6 – Mapa conceitual sobre fogos de artifício com hierarquia cíclica, colorido e sem numeração nas proposições

A7 – Mapa conceitual sobre fogos de artifício colorido e com numeração nas proposições

A8 – Mapa conceitual sobre fogos de artifício preto e branco e com numeração nas proposições

A9 – Mapa conceitual sobre fogos de artifício preto e branco e com hierarquia em “árvore”

A11 – Mapa conceitual sobre fogos de artifício colorido e com hierarquia em “árvore”

A13 – Recurso digital associado ao conceito “condutividade elétrica” do mapa conceitual sobre condução elétrica usado como hipertexto no Estudo III

Condutividade elétrica de substâncias com diferentes tipos de ligações químicas

Substância	Tipo de ligação	Condutividade (ohm/cm)
prata	metálica	$6,3 \times 10^5$
cobre	metálica	$6,0 \times 10^5$
sódio	metálica	$2,4 \times 10^5$
zinco	metálica	$1,7 \times 10^5$
cloreto de sódio	iônica	10^{-7}
diamante	molécula gigante covalente	10^{-14}
quartzo	molécula gigante covalente	10^{-14}

Metais, formados por ligação metálica, são definidos como **condutores**, pois, apresentam condutividade na grandeza de 10^4 ohm/cm ou superior.

Compostos iônicos e covalentes são definidos como **isolantes**, pois, apresentam condutividade na grandeza de 10^{-6} ohm/cm ou inferior. (Exceção: grafite).

Fonte: MORA, N. D.; LUCAS, J. F. R.; MARAN, M. A. Apostila de materiais elétricos. Centro de engenharia e ciências exatas. Unioeste: 2010.

A14 – Recurso digital associado ao conceito “temperatura” do mapa conceitual sobre condução elétrica usado como hipertexto no Estudo III

Influência da temperatura

Condutores

Fonte: MACDONALD, D.; MACDONALD, K. *Proc. Roy. Soc.*, A202, 103, 1950.

O gráfico acima mostra a resistividade elétrica em função da temperatura para três amostras de sódio. Em condutores, quanto maior a temperatura, maior a energia cinética dos elétrons, maior a probabilidade de colisões na banda de valência. Consequentemente, maior a resistividade e menor a condutividade elétrica. Os valores diferem ligeiramente conforme o teor de impurezas presentes no metal.

Semicondutores

Fonte: KUMAR, N. et al. *Am. J. Mat. Sci.*, 2(1), 41-45, 2012.

O gráfico acima mostra a resistividade elétrica em função da temperatura para uma amostra de estanho dopado com selênio. Em semicondutores, quanto maior a temperatura, maior a probabilidade de um elétron absorver a energia necessária para se promover para a banda de condução. Consequentemente, menor a resistividade e maior a condutividade elétrica.

A15 – Recurso digital associado ao conceito “semicondutores” do mapa conceitual sobre condução elétrica usado como hipertexto no Estudo III

Dopagem de semicondutores (caso do Silício)

A16 – Recurso digital associado ao conceito “retículos cristalinos” do mapa conceitual sobre condução elétrica usado como hipertexto no Estudo III

RETÍCULO CRISTALINO METÁLICO (Exemplo do Magnésio)

Magnésio metálico por uma visão macroscópica.

O arranjo tridimensional do magnésio é formado pela união de cátions Mg^{2+} (em verde) e seus elétrons de valência (em preto), os quais circulam livremente pela estrutura.

A repulsão que ocorre entre os cátions (positivos) é minimizada pela atração com os elétrons (negativos). O resultado é uma estrutura muito estável.

Fontes: http://www.rima.com.br/htmls/div_magnesio.html | <http://alunosonline.uol.com.br/quimica/ligacao-metalica.html>
<http://www.infoescola.com/quimica/ligacao-metalica/>

A17 – Recurso digital associado ao conceito “orbitais moleculares” do mapa conceitual sobre condução elétrica usado como hipertexto no Estudo III

EVOLUÇÃO DOS ORBITAIS ATÔMICOS PARA OS ORBITAIS MOLECULARES ATÉ A FORMAÇÃO DAS BANDAS (Exemplo do lítio)

A configuração eletrônica do Lítio ($1s^2 2s^1$) indica que cada átomo de lítio apresenta 1 elétron de valência no orbital $2s$. O esquema a seguir mostra o que acontece se unirmos vários átomos de lítio até a formação do metal

A união de dois orbitais atômicos de lítio (Li_2) forma um orbital molecular ligante com dois elétrons de valência emparelhados.

A junção de mais um átomo de lítio (Li_3) faz com que um elétron fique desemparelhado, na sua posição não-ligante.

Já o Li_4 terá 4 elétrons emparelhados em seus orbitais moleculares ligantes.

A união de muitos átomos de lítio (Li_n) formará uma banda contínua de orbitais moleculares com energia muito próximas entre si. O resultado é o metal de lítio.

A banda preenchida de elétrons é chamada de **BANDA DE VALÊNCIA**, enquanto as vazias são chamadas **BANDA DE CONDUÇÃO**.

Fonte: MORA, N. D.; LUCAS, J. F. R.; MARAN, M. A. Apostila de materiais elétricos. Centro de engenharia e ciências exatas. Unioeste: 2010.

A18 – Recurso digital associado ao conceito “nível de Fermi” do mapa conceitual sobre condução elétrica usado como hipertexto no Estudo III

Relação entre o nível de Fermi e a condutividade elétrica para diferentes materiais

Fonte: www.ocw.unicamp.br/fileadmin/user_upload/cursos/F_888_IAB_1s2010_P3_cap8.pdf

Nos isolantes não há condutividade elétrica, pois, a quantidade de energia necessária para migrar os elétrons da banda de valência para a de condução é muito alta (Nível de Fermi alto).

Nos semicondutores o nível de Fermi é menor, sendo possível a mobilidade de elétrons entre as bandas de valência e condução. Uma prática muito comum é a dopagem de semicondutores para diminuir ainda mais essa lacuna entre as bandas.

Nos condutores, o nível de Fermi é inexistente, ou seja, os elétrons migram livremente entre as bandas de valência e condução. Todos os metais apresentam essa alta mobilidade eletrônica.

A19 – Exemplo de como as duas etapas do questionário de carga cognitiva NASA-TLX foram visualizadas e respondidas pelos alunos durante o Estudo III

ETAPA 1

Em cada escala, clique no local que melhor representa a sua experiência durante a tarefa.

DEMANDA MENTAL MUITO BAIXO MUITO ALTO	Quanta atividade mental foi requerida para a tarefa (p.ex. pensar, decidir, calcular, lembrar, olhar, procurar)? A tarefa foi fácil ou difícil, simples ou complexa, tolerante ou exigente?
DEMANDA FÍSICA MUITO BAIXO MUITO ALTO	Quanta atividade física foi requerida para a tarefa (p.ex. puxar, empurrar, girar, controlar, apertar)? A tarefa foi devagar ou ativa, livre ou extenuante, tranquila ou trabalhosa?
DEMANDA TEMPORAL MUITO BAIXO MUITO ALTO	Quanta pressão de tempo você sentiu devido ao ritmo pela qual a tarefa aconteceu? O ritmo foi lento e vagaroso ou rápido e frenético?
DESEMPENHO MUITO BEM MUITO MAL	Quão bem-sucedido você acha que foi na realização da tarefa? Qual foi o grau de satisfação com o seu desempenho para atingir os objetivos da tarefa?
ESFORÇO MUITO BAIXO MUITO ALTO	Quão duro você teve que trabalhar (mentalmente e fisicamente) para atingir o seu nível de desempenho?
FRUSTRAÇÃO MUITO BAIXO MUITO ALTO	Quão inseguro, desencorajado, irritado, estressado, descontente e desconfortável você se sentiu durante a tarefa?

Continue >>

ETAPA 2

A seguir, você verá 15 telas sequenciais. Clique na escala que mais contribuiu para a carga mental imposta durante a tarefa.

Demanda Temporal	Pressão de tempo sentida devido ao ritmo pela qual a tarefa aconteceu
OU	
Frustração	Quão inseguro, desencorajado, irritado, estressado, descontente você se sentiu durante a tarefa

Continue >>

ANEXO

Breve relato do projeto desenvolvido no Doutorado Sanduíche – bolsa CAPES (Processo #88881.135605 / 2016-01)

Localidade: University of Surrey – Department of Higher Education

Orientador no exterior: Prof. Ian M. Kinchin

Período: 01/08/17 a 15/12/17

Desenvolvimento de atividades mediadoras para elaboração de mapas conceituais: caracterizando a fragilidade pedagógica de docentes do Ensino Superior

1. Introdução

Os desafios contemporâneos enfrentados pelos sistemas educacionais apresentam grande complexidade e não são adequadamente respondidos por ações isoladas (UNESCO, 2005). As universidades, por exemplo, investem tempo e esforços em grandes quantidades para melhorar a qualidade do ensino oferecido aos seus alunos. Mesmo assim, os resultados obtidos sempre ficam muito aquém das expectativas que norteiam as ações voltadas ao ensino de graduação.

A falta de um modelo, que unifique os conceitos relevantes para o entendimento da complexidade dos problemas a serem enfrentados, impede a busca por soluções mais efetivas. A visão fragmentada dos elementos que constituem a prática docente, tais como o planejamento do ensino, as concepções sobre o papel do currículo e as cobranças institucionais referentes à pesquisa, ensino e extensão, levam a perspectivas parciais do problema e à produção de respostas pouco adequadas para encaminhar soluções robustas.

Essas preocupações, que tem caráter global, levaram Kinchin (2015) a propor o modelo da fragilidade pedagógica como forma de integrar elementos relevantes para descrever as atividades docentes no Ensino Superior. Esse modelo, formulado a partir da literatura relacionada com o desenvolvimento profissional dos docentes, surge para ajudar no processo de integração dos esforços institucionais para que a melhoria da qualidade do ensino de graduação seja perceptível. A proposta do modelo é capturar de forma mais precisa os motivos

que levam muitos professores (incluindo os mais experientes) a enfrentarem situações estressantes durante sua prática docente. Tais situações revelam a fragilidade pedagógica, ou seja, a perda de capacidade em se adaptar a mudanças repentinas e a situações inéditas (Kinchin, 2017). Segundo esse autor “... we see frailty as resulting from the quality and degree of interaction with and between key elements of the professional environment” (Kinchin et al., 2016).

O primeiro estudo para o desenvolvimento do modelo da fragilidade pedagógica ocorreu em 2014 e contou com a participação de docentes da *University of Surrey*. Quatro elementos-chave vinculados à fragilidade pedagógica foram identificados a partir de entrevistas individuais mediadas por mapas conceituais - MCs (Figura 1_Anexo).

Figura 1_Anexo. Modelo da fragilidade pedagógica e os quatro elementos chave identificados em seu estudo.
Fonte: Kinchin et al. 2016, traduzida e reproduzida com autorização do autor.

- **Discurso regulativo**

Refere-se à falta de explicitação e compartilhamento de valores pedagógicos nas discussões sobre o currículo (discurso regulativo), os quais deveriam informar as decisões sobre o processo de ensino-aprendizagem (discurso instrucional).

- **Pedagogia e disciplina**

Refere-se à distância existente entre as linguagens adotadas para ensinar conteúdos específicos das disciplinas e sua aplicação para a vida profissional.

- **Nexo pesquisa-ensino**

Refere-se à tensão entre as atividades de ensino e pesquisa, configurada num contexto de recompensas, status e motivações assimétricas.

- **Lócus de controle**

Refere-se à supressão do controle e da autonomia sobre decisões relativas ao ensino ou que impactam o ensino, bem como a falta de processos de regulação e avaliação das melhores práticas de ensino.

Kinchin et al. (2016) obteve um registro consolidado ao término de cada entrevista por meio dos MCs. A elaboração do mapa durante a entrevista se dá por meio de perguntas e respostas, onde os docentes escolhem conceitos e proposições para representar o entendimento que eles possuem sobre o tema em questão. Isso permite ao entrevistado interferir para ajustar o conteúdo do mapa conceitual ao longo da entrevista, tornando a representação externa do conhecimento mais fiel às suas representações internas (Kinchin, Streatfield & Hay, 2010). Ao término da entrevista, o mapa conceitual manuscrito é transcrito para o formato digital e encaminhado ao entrevistado para revisão final.

No 1º semestre de 2016, um estudo de caso foi conduzido com três docentes da Universidade de São Paulo (USP)²⁶. A elaboração dos MCs obedeceu um quadro de investigação que maximiza o rigor a confiabilidade de estudos de casos centrados na pessoa, alinhando-se com a metodologia auto etnográfica analítica e colaborativa (Starr, 2010). A Figura 2_Anexo apresenta os MCs sobre “Pedagogia e disciplina” de cada entrevistado. Uma lista de conceitos foi apresentada aos docentes, que poderiam (ou não) utilizá-los: atividades, autêntico, conteúdo disciplinar, estratégias, prática e profissional. A heterogeneidade de entendimentos sobre os elementos chave do modelo da fragilidade pedagógica fica evidente ao compararmos conceitos em comum e suas conexões. Por exemplo, o conceito “profissional” aparece nos três MCs, porém com conexões diversas:

Na Figura 2a_Anexo, a docente da área de Educação diz que o fundamental para a ação profissional são as atitudes dialéticas e dialógicas, focando sua disciplina no desenvolvimento do ser humano. Já na Figura 2b_Anexo, o docente de Química evidencia que sua disciplina se preocupa com a aplicação de conteúdos para a vida profissional, salientando uma linguagem focada no conhecimento disciplinar. Por fim, a Figura 2c_Anexo, mostra um docente que atua na interface do Ensino de Ciências. Sua visão ressalta que o conhecimento disciplinar subsidia a formação profissional.

²⁶ Os docentes autorizaram a divulgação dos resultados e são considerados coautores em qualquer pesquisa que contenha os dados obtidos, atendendo às questões éticas de pesquisas com seres humanos.

Figura 2_Anexo. MCs elaborados a partir de entrevistas individuais com docentes da Universidade de São Paulo sobre 'Pedagogia e disciplina'. O conceito 'profissional' em vermelho, apesar de presente nos três mapas, realizam conexões de caráter diversos, ressaltando a visão do docente das áreas de: (a) Educação, (b) Química e (c) Ensino de Ciências. **Fonte:** a autora.

Os MCs tornam visíveis as diferenças entre os perfis docentes, revelando as concepções, muitas vezes implícitas, sobre temas que informam suas atividades. A predominância de uma linguagem voltada ao conhecimento do conteúdo disciplinar, em vez da aplicação desse conteúdo, nos permite compreender como os docentes entendem o papel da sua disciplina para a formação profissional (Canning, 2007). Os docentes de Química e Ensino de Ciências são mais parecidos nesse sentido, tendo ambos uma maior prevalência da fragilidade pedagógica quando se analisa essa dimensão isoladamente. Já o docente da área da Educação consegue fazer uma maior inserção entre os conteúdos disciplinares e a aplicação desses conteúdos para a formação de futuros professores em suas aulas de Didática. Possivelmente, as características das disciplinas ministradas por esses docentes e o currículo na qual estão inseridos exercem forte influência em suas visões e comportamentos (Cunha, 2007).

A pequena quantidade de MCs disponíveis nesse momento não permite generalizar as diferenças observadas (não tendo sido esse o objetivo do trabalho de Kinchin et al., 2016). Por outro lado, a captura das variações no uso das linguagens adotadas em suas disciplinas sinaliza que a realização de mais entrevistas com outros docentes desses departamentos é uma possibilidade que deve ser considerada. Merece destaque, portanto, a validade de se registrar com MCs o discurso dos docentes com certa profundidade, retratando um relato que possivelmente não seria ouvido em outras circunstâncias. A coleção desses mapas, adquiridos no âmbito de um departamento ou curso, viabiliza a enunciação e caracterização de fatores do ambiente profissional que podem acentuar a fragilidade pedagógica dos docentes em um nível não só pessoal, mas também institucional.

1.1 Problema de pesquisa, o objetivo e a proposta

A ampliação do uso de entrevistas mediadas por MCs apresenta alguns desafios que limitam a disseminação do modelo da fragilidade pedagógica, tais como:

- O tempo necessário para a realização de cada entrevista é longo (cerca de 3 horas), sem contar a etapa de revisão dos mapas digitalizados posterior à entrevista.
- A necessidade de um encontro presencial para mediar a entrevista é dificultado pela falta de compatibilização de agendas entre entrevistador e entrevistado.
- O entrevistador precisa ter bom entendimento do modelo da fragilidade pedagógica, suas dimensões e conexões bem como da técnica de mapeamento conceitual e sua construção ao longo de uma entrevista.

O presente plano de estudos teve como objetivo desenvolver, testar e validar um protótipo de elaboração e edição de MCs, por meio de atividades mediadoras apresentadas em computador. A dimensão “Nexo pesquisa-ensino” será o elemento chave do modelo da fragilidade pedagógica a ser considerada nesse primeiro momento. Essa solução minimiza os desafios listados acima e potencializa o uso do modelo em larga escala.

2. Desenvolvimento, teste e validação das atividades mediadoras

2.1 Etapa 1 - Entrevistas mediadas com MCs: um estudo de caso com docentes da USP

Sete entrevistas mediadas por MCs foram conduzidas com docentes da USP²⁷. Os procedimentos adotados seguiram o modelo de entrevista utilizado pelo Prof. Kinchin com orientações para condução de pesquisas com seres humanos aprovada pelo Comitê de Ética. A realização desse estudo de caso permitiu conhecer profundamente a dinâmica da entrevista mediada por MCs e, de posse desses mapas, realizar um estudo comparativo entre os grupos de docentes entrevistados nas duas instituições (*Surrey* e USP). Com base nos mapas dos docentes sobre a dimensão “nexo ensino-pesquisa”, foi possível determinar os conceitos-chave e as relações conceituais mais recorrentes no discurso dos acadêmicos.

2.2 Etapa 2 - Desenvolvimento do protótipo para assistir à elaboração de MCs

A elaboração e a edição dos MCs foram mediadas por atividades apresentadas ao usuário numa tela de computador. O fluxo de atividades proposto para o usuário é apresentado na Figura 4_Anexo. A interação com o usuário começa com informações gerais sobre o plano de estudos e um convite para responder às atividades, que poderá ser aceito ou recusado. Posteriormente, apresentam-se diversas atividades a serem respondidas pelo usuário. Duas sequências foram desenvolvidas para que seja possível assistir ao usuário durante a elaboração (sequência 1) e a edição (sequência 2) do MC.

²⁷ Os resultados desse estudo de caso estão sendo devidamente divulgados no meio acadêmico. Isso inclui a apresentação oral em evento internacional visto em Aguiar, Correia & Kinchin (2017), no artigo submetido à *International Journal of Science Education* e o artigo nacional submetido à Educação & Pesquisa.

As atividades da sequência 1 tiveram como objetivo capturar o entendimento que o usuário tem sobre o tema da fragilidade pedagógica em questão (ver A1-A4, Figura 4_Anexo). As respostas dadas pelo usuário foram transformadas em proposições que, ao serem combinadas, geraram o MC (versão 1).

A apresentação do MC (versão 1) ofereceu ao usuário um ponto de partida privilegiado para refletir sobre a precisão das proposições frente ao seu conhecimento. Evita-se, por exemplo, o impacto que a tela em branco exerce sobre quem vai começar a escrever um MC. A dificuldade imposta pela técnica é minimizada ao apresentar um mapa para o usuário, que pode ler e julgar a pertinência do conteúdo. É importante ressaltar que, do ponto de vista das teorias cognitivistas que embasam esse plano de estudos, ler MCs requer menos esforço cognitivo do que construí-los (Stull & Mayer, 2007).

As atividades da sequência 2 tiveram como objetivo permitir a edição do MC abrindo espaço para ajustes a serem feitos pelo usuário a partir de uma representação externa inicial. A sequência 2 de atividades (ver A5-A7, Figura 4_Anexo) criou os estímulos necessários para que o usuário refletissem sobre a primeira versão desse mapa, considerando os termos de ligação (A5), a inclusão de novos conceitos à rede (A6) e a formação de novas proposições (A7). Além disso, o usuário foi questionado quanto ao grau de convicção revelado por proposições cujos termos de ligação contém palavras condicionantes como, por exemplo, “pode” ou “talvez”. O produto final, após a realização das atividades da sequência 2, foi um MC editado pelo usuário (versão 2). Espera-se que essa versão seja uma representação mais precisa e fiel do seu perfil naquela dimensão da fragilidade pedagógica.

Figura 4_Anexo. Fluxo de atividades mediadoras para assistir à elaboração de mapas conceituais. Duas seqüências de atividades estão previstas para desenvolvimento do protótipo: atividades de elaboração (resulta no mapa conceitual versão 1) e atividades de edição (resulta no mapa conceitual versão 2). **Fonte:** a autora..

2.2.1 As atividades propostas no questionário

O questionário foi elaborado em seis partes (A - F). Cada parte teve o objetivo de levantar as concepções e crenças dos docentes sobre um tópico específico do nexo pesquisa-ensino. O objetivo, tipo de pergunta e formato de resposta foram fornecidos na Tabela 1_Anexo. A plataforma de pesquisa qualitativa *Qualtrics* foi usada para hospedar o questionário, o qual foi controlado por senha²⁸. As respostas dos participantes foram baixadas e analisadas para considerar seu conteúdo. Cada parte do questionário forneceu informações que foram “traduzidas” em conceitos e proposições necessárias para elaboração de seus MCs. As Figuras 5_Anexo e 6_Anexo apresentam, de forma ilustrativa, como esse procedimento foi feito.

2.3 Etapa 3 - Teste e validação do protótipo desenvolvido

O questionário desenvolvido foi incluído na plataforma *Qualtrics* e um *link* com a senha foi enviado a dez professores, sendo um deles da USP e os outros nove de *Surrey*. Não havia restrição de tempo para responder ao questionário, sendo que a média gasta por esse grupo de docentes foi de 19,3 minutos (desvio-padrão 8,4 minutos). A elaboração dos MCs a partir das respostas dos docentes levou aproximadamente 10-12 minutos por MC.

A validação do protótipo foi feita a partir da percepção dos participantes frente às atividades propostas, considerando as seguintes escalas:

- Demanda mental - escala de 1 (muito baixo) a 5 (muito alto);
- Clareza das questões – escala de 1 (muito obscuro) a 5 (muito claro);
- Nível de interesse – escala de 1 (entediante) a 5 (interessante);
- Nível de desafio imposto – escala de 1 (nada desafiador) a 5 (muito desafiador);
- Fidedignidade do MC – escala de 1 (impreciso) a 5 (preciso);
- Utilidade do MC como uma ferramenta de visualização e reflexão – escala de 1 (nada útil) a 5 (muito útil).

²⁸ Para ter acesso ao questionário, em inglês, utilize a senha “unlock” e o *link* https://qtrial2017q3az1.az1.qualtrics.com/jfe/form/SV_aeNjmBflQnz29jn [fev. 18].

Também foi solicitado aos participantes que oferecessem alguns benefícios e limitações do questionário sobre nexos pesquisa-ensino e sobre a técnica de mapeamento conceitual. As respostas dos acadêmicos foram analisadas e utilizadas para aprimorar o protótipo. Os resultados mostraram que, para esses docentes, responder ao questionário não exigiu uma demanda mental muito alta dos participantes (média = 3,4), indicando que a carga cognitiva imposta por esta atividade está longe de levar a uma situação de sobrecarga cognitiva (Sweller, Ayres & Kalyuga, 2011). No entanto, algumas melhorias precisam ser feitas para que as questões tenham maior nível de clareza (média = 3,2). Alguns participantes apontaram a falta de clareza como limitação de questionário, como, por exemplo²⁹:

- “A pesquisa poderia ser mais clara no questionário como sendo aquela pedagógica *versus* aquela específica do conteúdo disciplinar”.
- “Algumas das perguntas estavam um pouco ambíguas, podendo ser interpretadas de maneiras diferentes.”
- “Foi difícil entender através do questionário o tipo de problema imposto em algumas questões. Isso significa que respondemos essencialmente a diferentes perguntas, o que provavelmente pode ter mudado um pouco os nossos mapas”.

Os participantes também declararam que o questionário ofereceu um desafio (média = 3,9) para eles sem ser uma atividade entediante (média = 4,3). O *feedback* sobre o nível de utilidade (média = 4,7) e precisão (média = 4,2) foi muito importante para melhorar o questionário. Para eles, não só o MC era uma representação precisa de seu ponto de vista, mas também era muito útil visualizar sua perspectiva sobre as tensões existentes entre pesquisa e ensino dentro de seus departamentos. A evidência é fornecida por comentários sobre o questionário e os benefícios do MC, como, por exemplo:

- “Foi possível uma consideração consciente de como esses assuntos [pesquisa e ensino] se encaixam e talvez eu planeje como tentar mover o equilíbrio entre elas no futuro”.
- “Foi um bom processo para destacar áreas comuns com outros membros da equipe e perceber como, às vezes, abordamos as coisas de maneiras diferentes”.
- “No geral, os mapas pareciam precisos e foram extremamente úteis para pensar agora em um “mapa de equipe”.

²⁹ As respostas dos docentes foram traduzidas do inglês com algumas adequações para a língua portuguesa. As respostas originais serão devidamente publicadas nos meios acadêmicos – um artigo internacional para a *British Journal of Educational Technology* (submetido) e outro nacional para a Educação & Pesquisa (em preparação).

Table 1_Anexo: Questionário desenvolvido como parte das atividades mediadoras para assistir à elaboração e edição dos MCs. Cada parte do questionário (A-F) teve um propósito, questões e formatos de respostas específicos. Alguns exemplos são fornecidos para ilustrar.

PARTE: PROPÓSITO	TIPO DE QUESTÃO	FORMATO DE RESPOSTA	EXEMPLO
A: Nível de importância e prioridade considerando atividades de pesquisa e ensino.	14 atividades aleatoriamente embaralhadas de ensino e pesquisa	Ordem de classificação Classificar em ordem de importância e prioridade quando não há restrição de tempo para sua realização	(a) Atividade de pesquisa: gerir projetos aprovados, se dedicar a revisão de artigos (b) Atividade de ensino: ministrar aulas, corrigir provas, preparar materiais para aula
B: Nível de concordância considerando algumas crenças genéricas sobre pesquisa e ensino no âmbito universitário	30 afirmações a serem julgadas	Matriz múltipla Julgue as afirmações usando escala Likert 6-níveis (discordo a concordo fortemente mais a opção N/A)	(a) Pesquisa é supervalorizado pela Universidade (b) A Universidade possui uma forma sistemática de avaliar o bom professor
C: Crenças pessoais quando comparamos pesquisa e ensino em termos de reconhecimento, status, motivação e recompensas	6 questões que compara pesquisa e ensino	Múltipla escolha Escolha entre as opções: mais, menos ou igual	(a) Para mim, pesquisa gera [mais menos igual] motivação em relação ao ensino
D: Exemplo de recompensas, reconhecimento e status para ensino e pesquisa	6 questão requisitando exemplos	Texto curto Máximo de 75 caracteres para cada questão	(a) Na pesquisa, o reconhecimento vem de que forma? (b) No ensino, o status é consequência basicamente de duas coisas:
E: Percepção sobre quão influente são alguns “atores” para definir as recompensas, status e reconhecimento nas atividades de pesquisa e ensino	2 questões requisitando a influência dos “atores”: universidade, colegas, a comunidade acadêmica, estudantes, chefe de departamento e a sociedade	Barras dinâmicas Mova a barra considerando 0 (nenhuma influência) ou 100 (influência muito forte) para cada “ator” em análise	Considerando apenas as atividades de pesquisa, quão influente é o chefe de departamento para se definir o status, as recompensas, e o reconhecimento de um acadêmico?
F: Comportamento frente a um determinado cenário considerando um curto prazo de tempo	2 questões que colocam em tensão a realização de atividades de pesquisa e ensino	Texto longo Máximo de 1000 caracteres considerando cada cenário	Imagine que você tem um prazo curto para finalizar um projeto de doutorado do seu aluno e de corrigir as provas a serem devolvidas na sua aula amanhã. Como você resolveria essa situação?

Fonte: a autora.

Figura 5_Anexo. Exemplo ilustrativo de atividades de elaboração, com destaque para a seleção de conceitos (A1) e de relações conceituais (A2). Os conceitos destacados em azul estão isolados, mas podem ser utilizados para a formulação de proposições nas próximas atividades. **Fonte:** a autora.

A3 Julgue as afirmações a seguir:

	Discordo totalmente	Discordo parcialmente	Concordo parcialmente	Concordo totalmente
Os estudantes são uma fonte de estresse no meu dia-a-dia	☐	☒	☐	☐
A constante necessidade de mudança é algo que me causa estresse	☐	☐	☐	☒
A falta de resiliência afeta negativamente meus estudantes	☐	☐	☐	☒
Eu me adapto rapidamente à mudanças	☒	☐	☐	☐

A4 Escolha o desfecho do cenário ao qual você mais se identifica:

O currículo do curso que você leciona foi todo remodelado e você ministrará uma nova disciplina para alunos novos. Nessa situação você:

- ☐ Se estressa porque terá que mudar toda a dinâmica e conteúdo da sua disciplina, além de repensar os métodos de avaliação.
- ☒ Se estressa porque terá que se adaptar num curto prazo de tempo a uma nova situação desconhecida.
- ☐ Se adapta às novas mudanças e aproveita pra repensar a sua prática.

Figura 6_Anexo. Exemplo ilustrativo de atividades de elaboração, com destaque para o julgamento de afirmações (A3) e análise de cenários (A4). A espessura das linhas indica concordância/discordância. A proposição em azul foi gerada a partir da análise do cenário. **Fonte:** a autora.

3. Considerações finais e etapas futuras

A elaboração de MCs por docentes novatos a respeito de um tema que eles não dominam possivelmente os levaria a uma situação de sobrecarga cognitiva, resultando em um MC pobre em qualidade de estrutura visual e conteúdo semântico. No caso da fragilidade pedagógica, o prof. Kinchin vem sendo o mediador desse processo por meio de entrevistas em que MCs são elaborados como produto de um discurso “co-construído” entre entrevistador e entrevistado. A alta demanda tempo e especialização do entrevistador impedem a disseminação do modelo em larga escala.

O desenvolvimento de um questionário que propõe atividades para assistir à elaboração dos MCs oferecidos aos docentes em uma tela do computador diminuiu drasticamente o tempo necessário para a elaboração dos MCs, além de oferecer um ponto de partida para uma discussão mais aprofundada sobre suas visões e concepções a respeito da dimensão nexa pesquisa-ensino.

As próximas etapas devem buscar uma forma automatizada de produção desses MCs diretamente a partir das respostas dos professores além da elaboração dos questionários sobre as demais dimensões que contemplam a fragilidade pedagógica. Por fim, deve ser prevista uma etapa de aplicação do questionário completo e validado em larga escala tanto no âmbito individual como institucional, com docentes brasileiros e ingleses.

4. Referências citadas no Anexo

- Canning, J. (2007). Pedagogy as a discipline: emergence, sustainability and professionalisation. *Teaching in Higher Education*, 12(3), 393 – 403.
- Cunha, M. I. (Org.) (2007). *Reflexões e práticas em pedagogia universitária*. Campinas: Papirus.
- Kinchin, I. M. (2015). Pedagogic frailty: an initial consideration of aetiology and prognosis. In *Proc. Annual Conference of the Society for Research into Higher Education (SRHE)*, País de Gales, Reino Unido.
- Kinchin, I. M. (2017). Mapping the terrain of pedagogic frailty. In Kinchin, I. M. & Winstone, N. E. (Eds.) *Pedagogic frailty and resilience in the university*, (pp. 1–16). Rotterdam: Sense Publishers.

- Kinchin, I. M., Alpay, E., Curtis, K., Franklin, J., Rivers, C., & Winstone, N. E. (2016). Charting the elements of pedagogic frailty. *Educational Research*, 58(1), 1-23.
- Kinchin, I. M., Streatfield, D., & Hay, D. B. (2010). Using concept mapping to enhance the research interview. *International Journal of Qualitative Methods*, 9(1), 52-68.
- Starr, L. J. (2010). The use of autoethnography in educational research: locating who we are in what we do. *Canadian Journal for New Scholars in Education*, 3(1), 1-9.
- Stull, A. T., & Mayer, R. E. (2007). Learning by doing versus learning by viewing: three experimental comparisons of learner-generated versus author-provided graphic organizers. *Journal of Educational Psychology*, 99(4), 808-820.
- UNESCO (2005). *Towards Knowledge Societies: UNESCO World Report*. Paris: UNESCO Publishing.