



**ANÁLISE ESTRUTURAL DE REDES SEMÂNTICAS: UM ESTUDO EXPLORATÓRIO DAS
RELAÇÕES ENTRE REPRESENTAÇÕES PROPOSICIONAIS E EVOLUÇÃO CONCEITUAL EM UM
TÓPICO DA FÍSICA**

*Structural analysis of semantic networks: an exploratory study on the relationship between
propositional representation and conceptual ecology in a physics topic*

Ernani Vassoler Rodrigues [ernanivr@usp.br]

*Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física
Universidade Federal do Espírito Santo
Av. Fernando Ferrari, 514, Vitória, ES, Brasil
Faculdade de Educação
Universidade de São Paulo*

Av. da Universidade, 308, Butantã, São Paulo, SP, Brasil

Giuseppi Gava Camiletti [giuseppi.ufes@gmail.com]

*Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física
Universidade Federal do Espírito Santo
Av. Fernando Ferrari, 514, Vitória, ES, Brasil*

Resumo

Neste trabalho exploramos, por meio de avaliações multi-formato, a Evolução Conceitual de um grupo de estudantes do ensino médio (N=28) em um tópico da Física (Acústica). Nos apoiamos numa vertente reconsiderada para Mudança Conceitual, na qual a complexificação conceitual é utilizada como contraponto à versão inicial dessa teoria. Foram utilizadas diferentes formas de representação proposicional dos estudantes (mapas mentais livres e redes semânticas estimuladas), além de testes de múltipla escolha e declarações de autoeficácia. Os mapas mentais mostram uma inclusão incremental de elementos da ciência por parte dos alunos. As medidas topológicas das redes semânticas foram confrontadas via Análise de Componentes Principais com traços latentes de habilidade, obtidos por Modelagem Rasch nos testes de múltipla escolha, e também com a declaração do senso de autoeficácia dos sujeitos de pesquisa. Os dados empíricos analisados mostraram um crescimento das características topológicas das redes semânticas, associado ao aumento no senso de autoeficácia e também do traço latente de habilidade. Esses resultados indicaram um aumento da complexidade nos sistemas de conhecimento dos estudantes, durante o processo de aprendizagem.

Palavras-Chave: Ecologia conceitual; Modelagem Rasch; Mudança conceitual; Redes complexas.

Abstract

In this paper, we explore the Conceptual Evolution through the use of multi-format assessment tools in a student's group (N=28). We took a reconsidered version of conceptual Change theory in which the conceptual complexity antagonizes the former version of this theory. We used different propositional representation (free mental maps and stimulated semantic networks) also multiple-choice test and self-efficacy statement. The mental maps showed an incremental inclusion of scientific elements by students. The topological measurement of semantic networks was compared with Rasch latent trait of ability in a multiple-choice test and with students' self-efficacy statement via Principal Component Analysis. Our empirical data showed increasing of topological characteristics of semantic network associated to increasing of self-efficacy sense as well as the ability latent trait. These results indicated increasing in the complexity of students' knowledge system on the ongoing learning process.

Keywords: Complex networks; Conceptual change; Conceptual ecology; Rasch modeling.

INTRODUÇÃO

A análise de representações é uma das abordagens utilizadas para acesso das formas de pensar dos estudantes. A partir das representações, é possível inferir desde crenças e opiniões, até aprendizagem dos alunos acerca de um tema. Representações são constructos que podem ser captados a partir das produções dos estudantes, se fazendo então, observáveis e passíveis de análise. Para isso, é necessário primeiramente tipificar duas formas de representações, ambas das ciências cognitivas: as representações analógicas (ou simbólicas), nas quais busca-se uma correspondência direta entre o mundo representado e o representador e estão associadas à tradição Simbólica e as representações proposicionais, nas quais é procurada uma unidade mínima do conhecimento sobre a qual se possa fazer algum juízo de valor, seja uma relação ou uma associação. Esse segundo tipo é ligado à tradição Conexionista (Dias & Meneses, 1993).

Para Dias e Meneses (1993), o curso da aprendizagem envolve construções de representações tanto simbólicas quanto proposicionais acerca do mundo natural. Assim, um estudo que se valha de uma análise representacional se ocupa de modelar processos de pensamento ou estruturas de significados, partindo das produções dos estudantes. Por sua relação entre o mundo natural e as construções individuais, os estudos com representações têm um papel particularmente importante nas relações de ensino e aprendizagem das ciências naturais. A análise das representações analógicas pode ser vista em trabalhos como de Azevedo, diSessa e Sherin (2012) e Köse (2008), onde imagens, desenhos, formas ou traços rudimentares são produzidos, referentes a um cenário pensado sobre uma situação real. Já com representações proposicionais Cicuto e Correira (2012) tomam as redes proposicionais de mapas conceituais para analisar conceitos vizinhos. Fischer *et al.* (2002) propõem uma ferramenta onde aspectos teóricos e empíricos de uma atividade deveriam ser representados pelos estudantes em colaboração. Num sentido semelhante ao descrito por Dias e Meneses (1993), Schnotz e Bannert (2003) propõem uma análise do curso de aprendizagem combinando representações descritivas e retratáveis, ou seja, proposicionais e simbólicas, respectivamente.

Alguns modelos de representação podem ser reconhecidos como ferramentas exclusivas de determinados aportes teóricos¹. Todavia, neste trabalho fazemos uma apropriação metodológica que subverte essa exclusividade. Importamos algumas das métricas das ciências das redes complexas para observar aspectos estruturais emergentes de representações proposicionais de um grupo de estudantes e cruzamos as mudanças estruturais vistas na topologia dessas representações com outras medidas avaliativas realizadas. Com isso, exploramos as relações emergentes entre as representações e outros instrumentos de análise para elucidarmos aspectos das Ecologias Conceituais dos estudantes.

Essa mescla que fazemos, ao utilizarmos as métricas das redes complexas para exploração das estruturas semânticas emergentes das representações proposicionais construídas pelos alunos, é um esforço para olharmos antigos objetos de estudo por uma nova lente metodológica e ainda de, num senso lakatiano (Lakatos, 1968), mirarmos por sobre os cinturões de proteção e das amarras teórico-metodológicas dos seus núcleos teóricos. Isso se traduz num convite ao leitor para, ao menos de início, abrir mão da dicotomia quantitativo/qualitativo. Assim, poderá ver como os ganhos que identificamos nos sujeitos de pesquisa apareceram tanto na topologia estrutural das redes semânticas quanto nos traços latentes de habilidade acerca dos conceitos trabalhados. Mais ainda, como a posição do constructo autoeficácia nos chamou a atenção nas análises procedidas.

O presente estudo é fruto de um Mestrado Profissional em Ensino de Física (Rodrigues, 2016). Porém, não nos ocuparemos de descrever a proposta didática desenvolvida², mas sim de discutir as relações entre diferentes constructos levantados a partir dos resultados das abordagens avaliativas que utilizamos, integrando: representações proposicionais (mapas mentais livres e redes de associação semântica), teste de múltipla escolha e indicador de autoeficácia.

Buscando responder à questão de pesquisa *Como se relacionam as estruturas das diferentes representações proposicionais (mapas mentais e redes semânticas) e a performance dos estudantes (habilidade latente e senso de autoeficácia), no processo de evolução conceitual em Acústica?* este trabalho reporta os resultados empíricos obtidos de um grupo de alunos do ensino médio, durante a implementação de um ciclo de atividades didáticas. A partir desses resultados, exploramos aspectos da evolução conceitual dos indivíduos, observando a complexificação estrutural de suas representações. Buscamos relações entre

1 Os mapas conceituais novakianos (Novak, 1990) são um exemplo particularmente interessante, sendo tratados muitas vezes como ferramenta exclusiva da proposta teórica de D. Ausubel, não se considerando o fato de que são um dentre muitos modelos de representação proposicional.

2 Ver na íntegra a dissertação defendida (<http://repositorio.ufes.br/handle/10/7534>).

métricas topológicas das redes representadas e os demais constructos levantados, como traço latente de habilidade e indício de autoeficácia. Num último movimento de análise, concatenamos as redes semânticas individuais para construirmos uma rede coletiva, a fim de explorar a produção de consensos em contraste com a presença de associações idiossincráticas nas representações proposicionais.

QUADRO TEÓRICO

O viés cognitivo que a análise de representações carrega nos remete a trabalhos que buscavam adaptar os achados das ciências cognitivas, que nos idos dos anos 70 e 80 era uma nova e promissora área, para o ensino de ciências, especialmente o de Física. A frente teórica da chamada Mudança Conceitual é possivelmente a representante mais forte do movimento cognitivista pensado como modelo de aprendizagem da Física. No entanto, essa frente teórica é talvez mais reconhecida e criticada pela ideia de que, a partir de um conflito cognitivo, um processo de ruptura faria o indivíduo abandonar uma concepção não-científica coerente e abraçar uma outra concepção coerente, mas cientificamente aceita. O trabalho de Posner *et al.* (1982) é emblema dessa síntese.

Nesta forma da Mudança Conceitual de Posner e colaboradores, a forte influência da obra de Kuhn (1962) pode ser reconhecida. A mudança iria de uma concepção prévia, coerente, para uma nova concepção coerente, incomensurável com aquela que a antecedeu. A presença da incomensurabilidade, invocando uma ruptura, pode ser vista em outros trabalhos. Susan Carey (1999), por exemplo, sugere explicitamente que “*a mudança ocorre num contínuo entre dois tipos: do enriquecimento do conceito, mantendo seu núcleo, para uma evolução de um grupo de conceitos em outro, que é incomensurável com o original*” (p. 288, tradução nossa). O surgimento de anomalias nessa visão sobre uma Mudança Conceitual, sobretudo diante da persistência de concepções alternativas em estudantes, mesmo depois de sequências de instrução focadas em um conflito cognitivo, motivou uma série de críticas (e.g. Caravita & Halldén, 1994; Mortimer, 1995).

Mas de outro lado, essa teoria era vista de maneira diferente por uma outra corrente de autores. Aqueles que se apoiam na perspectiva evolucionista de Toulmin (1967) para pensar uma Mudança Conceitual não pela ruptura ou incomensurabilidade, mas por uma complexificação conceitual. Algo análogo a um processo evolutivo num sistema ecológico, com a diferença de que as variantes intelectuais, e não as espécies, seriam os elementos em interação. Conforme declara o autor, a mudança ocorreria:

“[...] como resultado de um processo duplo: a cada estágio, um conjunto de variantes intelectuais competindo entre si está em circulação e, a cada geração, um processo de seleção está ocorrendo e por este processo algumas dessas variantes são aceitas e incorporadas às considerações da Ciência.” (Toulmin, 1967, p. 465, tradução nossa)

Ao trazer fundamentos de competição e de seleção para o desenvolvimento intelectual, Toulmin sugere que, de geração a geração, revisões de assunções acabariam por reforçar a viabilidade de alguns elementos no sistema e inviabilizariam outros (Ariza & Harres, 2002). Para esses autores a proposta de Toulmin pode ser interpretada como “*um modelo evolucionista para os conceitos análogo ao que Darwin propôs para evolução das espécies*” (p. 71) onde a lógica darwinista originalmente aplicada às populações de espécies seria utilizada para pensar as populações conceituais.

Uma Mudança Conceitual pensada no sentido toulmiano diverge da corrente kuhniiana (i) *ontologicamente*: os conceitos na versão toulmiana não possuem coerência, mas sim fragmentos de pensamento, na forma de facetas, como sugere Minstrell (1992) ou das primitivas fenomenológicas de diSessa (1993) e (ii) *processualmente*: mudança, como evolução em um sistema ecológico, não resulta em um novo sistema incomensurável com o anterior, mas sim em um sistema com os mesmos elementos em novas relações, com possíveis novos elementos e com a possível subtração de alguns dos elementos iniciais.

Alguns dos proponentes da primeira versão dessa teoria, posteriormente se apoiaram em Toulmin ao reconsiderarem suas próprias bases e se alinharem a um modelo revisionista da Mudança Conceitual: algo que ocorreria numa Ecologia Conceitual, sendo esta ecologia um conjunto de artefatos cognitivos (i.e. metáforas, analogias, conhecimentos de outras áreas, etc.) que ocupariam nichos intelectuais³ distintos e

3 Esta é uma interpretação nossa. Strike e Posner (1992) não falam explicitamente em nichos ecológicos adaptados a artefatos cognitivos, embora vejamos essa ideia como razoável, considerando o suporte toulmiano.

que, ao mesmo tempo, competem entre si, inviabilizando alguns dos fragmentos, reforçando outros e incluindo novos (Strike & Posner, 1992).

Embora não exista garantia de que o modelo de elementos e relações dê conta amplamente dos aspectos da aprendizagem dos estudantes⁴, a oposição que esse modelo faz à proposta de ruptura ou incomensurabilidade de Kuhn, coloca a aprendizagem como num processo mais orgânico, envolvendo inclusão ou exclusão de elementos associados a uma reorganização de suas relações, algo que se aproxima mais de um sistema real do mundo natural.

O trabalho de diSessa (2002) é outro que corrobora o senso toulmiano de desenvolvimento conceitual, sugerindo que, numa Ecologia Conceitual, a evolução ocorre com mudanças estruturais no complexo do conhecimento e não como rupturas que tornariam um novo conceito incomensurável com o anterior. Nessa proposta de diSessa, o desenvolvimento então se dá iterativamente, com turnos de revisões e de vivências, complexificando o emaranhado de ideias e de representações acerca do mundo, conforme esquematizado na Figura 1, a seguir.

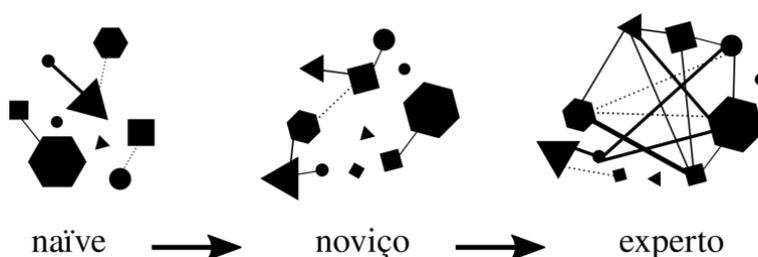


Figura 1 – Representação esquemática da evolução em um sistema complexo de conhecimento. Adaptado de diSessa (2002)

O esquema de evolução numa Ecologia Conceitual, mostrado na Figura 1 é deveras genérico e não foi proposto por diSessa sugerindo associações semânticas. Mas representações proposicionais, onde palavras ou sentenças são associadas, resultam num sistema complexo, numa rede onde os elementos são vértices e suas relações são as arestas. Uma vez que as relações proposicionais indicam formas de pensar dos indivíduos, é factível que vejamos, nas redes semânticas, traços do sistema complexo de conhecimento, semelhantes àqueles que diSessa apresenta esquematicamente. E isso é o que nos permite observar uma evolução conceitual, no sentido ecológico apresentado, a partir da análise estrutural das redes semânticas.

As análises de representações proposicionais é uma abordagem metodológica estabelecida em várias vertentes da pesquisa educacional no ensino de Ciências. Isso pode ser visto em um vasto uso dessa abordagem, que parte de modelos representacionais. Os modelos representacionais do tipo node-link (elementos e relações) são tidos como forma de representação de objetos na memória (Larkin *et al.*, 1980) e também em hipertextos estruturados a partir de redes de associações semânticas (Jonassen, 1990).

A análise de representações proposicionais do tipo conceito — verbo → conceito, que configuram os mapas conceituais de Novak (Novak, 1990), é feita numa sorte de trabalhos. Desde a análise de seus formatos estruturais (radial, cadeia ou rede) como indicadores de aprendizado superficial ou profundo (Kinchin & Hay, 2007), pela análise de conceitos vizinhos (Cicuto & Correia, 2012), a partir de pontuações em relação à hierarquia (Reis & Silva, 2015; Gomes, Caetano & Alves, 2017) até por sua avaliação estrutural (Correia & Aguiar, 2017).

Numa outra perspectiva, as representações proposicionais são modeladas na forma de redes semânticas e utilizadas para análise dos elementos centrais e periféricos de representações sociais. Essas redes podem ser obtidas a partir de questionários (Gouveia & Silva, 2015), cujas respostas são convertidas em categorias semânticas para a construção da rede de associações ou a partir de evocações de palavras e textos discursivos (Ribeiro *et al.*, 2017), casos em que a rede semântica é construída a partir da coocorrência de termos.

⁴ Na verdade, estamos bem certos de que não dá. Ressalvamos as limitações de um ponto de partida cognitivo, uma vez que o entorno social e o contexto não são a fonte de informações brutas para análise nesse tipo de estudo.

Esses diferentes usos das representações proposicionais nos apontam uma potencialidade do uso das redes semânticas para observação de relações entre fragmentos do conhecimento nas Ecologias Conceituais dos estudantes. Embora utilizemos alguns aspectos dos trabalhos de representações proposicionais citados acima, o presente estudo se situa numa lacuna que não nos parece bem documentada. Combinamos a utilização das medidas topológicas das estruturas de redes e as confrontamos com os traços latentes de habilidades dos estudantes e com suas declarações de autoeficácia. Isso nos coloca mais próximos de explorarmos a complexidade do processo de aprendizagem.

Em trabalho anterior (Rodrigues & Camiletti, 2017) nossos resultados indicavam a emergência de robustez e de complexidade nas redes semânticas conectadas pelos dos alunos. Mas apontavam também a necessidade de inclusão de outras formas de avaliação a serem relacionadas com as medidas estruturas das redes. E esse foi o caminho analítico que percorremos e que mostraremos a seguir.

METODOLOGIA

O desenvolvimento do presente estudo se deu em 04 encontros semanais de 02 h de duração cada, durante o mês de outubro de 2015, em duas unidades de uma escola privada da região metropolitana de Vitória, ES. Os sujeitos de pesquisa foram alunos da 3ª série do ensino médio (N=28) e a pesquisa se desenhou num formato quasi-experimental com um grupo pré/pós teste (Campbell & Stanley, 1966). A coleta dos dados se deu na primeira e na última semanas. Nesta última, todos os instrumentos de coleta foram reaplicados, dando a oportunidade de que os estudantes revisassem suas posições perante os instrumentos de coleta. Os dados obtidos foram processados na plataforma estatística R (R Core Team, 2008) utilizando-se pacotes dedicados, declarados à frente. As verificações de mudança de tendência central nas medidas quantitativas foram feitas com teste não paramétrico de ranqueamento (Wilcoxon, 1945) em todos os dados que gerassem escores e que pudessem ter uma comparação pós/pré feita.

Os estudantes construíram mapas mentais livres sobre o entendimento que possuíam sobre o som e sobre a Física do som. Tiveram todos os termos evocados listados para a produção de uma nuvem de palavras, feita com a ferramenta *wordclouds* (Zigomatic, 2015). Em uma nuvem de palavras, cada uma tem seu tamanho proporcional à frequência com a qual ela é evocada, indicando preferência por termos que se referem ao objeto representado.

Também foi aplicado um teste de múltipla escolha que constava de 15 itens adaptados da obra *Física Conceitual* (Hewitt, 2002), versando sobre as características do som e suas relações causais e dos modos normais de vibração. A escolha dos itens foi decidida em acordo entre o pesquisador e orientador da pesquisa foi submetida à discussão em seminário interno. Os escores desses testes foram coletados dicotomicamente (acerto → 1 e erro → 0) e submetidos a uma modelagem Rasch (Rasch, 1960) utilizando se o pacote *eRm* (Mair, Hatzinger & Maier, 2015) do R.

A modelagem Rasch permite que seja levantada, a partir do padrão de acertos e erros dos itens do instrumento, uma propriedade psicométrica latente dos participantes, ou seja, um traço latente de habilidade dos alunos. É a modelagem Rasch que dá suporte à Teoria de Resposta ao Item, utilizada em exames de larga escala (Karino & Andrade, 2011). No entanto essa modelagem pode também ser utilizada para grupos menores, desde que se verifique a adequação dos itens ao modelo. O teste de adequação dos itens é chamado teste *infit*, e indica quais são os itens que podem ser utilizados na modelagem Rasch, garantindo um intervalo de confiança de 95%. Esse teste de adequação é feito por uma razão de verossimilhança de Andersen (Golino & Gomes, 2015). Uma vez testada a adequação dos itens, a modelagem Rasch é feita apenas com os itens do instrumento que se mostrem adequados ao levantamento da propriedade psicométrica latente dos alunos, isto é, a modelagem sacrifica alguns itens do teste de múltipla escolha em prol da manutenção do traço latente de habilidade que se está levantando.

O processo da modelagem Rasch parte de uma regressão logística de probabilidade para fornecer um traço latente de habilidade do aluno. Isso pode ser feito com um parâmetro logístico 01PL (dificuldade do item), com dois 02PL (dificuldade mais poder de discriminação do item) ou com três 03PL (dificuldade, discriminação e probabilidade de acerto casual do item) (Golino & Gomes, 2015). Utilizamos o modelo 01PL, pois devido ao número relativamente pequeno de participantes (28), os parâmetros de discriminação e de acerto casual dos itens não se mostraram viáveis.

Então, calculou-se o parâmetro de habilidade de cada aluno em função do parâmetro de dificuldade dos itens, para obtenção de um mapa de parâmetros item-pessoa, numa régua *logit*. A régua *logit* assegura um posicionamento corrigido do parâmetro de habilidade do aluno, em função da dificuldade do item respondido, e o parâmetro de dificuldade do item, obtido a partir da distribuição de respostas dada pelo grupo de respondentes.

Em cada item do teste, três emoticons eram oferecidos para que os alunos marcassem, antes de responder o item, indicando o quão seguro estariam. Os emoticons foram plotados em barras de frequência, como um indicio de autoeficácia dos estudantes (Pajares & Valiante, 1997; Medeiros *et al.*, 2000). Para Pajares e Valiante, a crença de autoeficácia *“influencia aquilo que os estudantes escolhem fazer, o esforço que eles empregam e a persistência e perseverança que eles dispõem diante da adversidade, bem como a ansiedade que eles experimentam”* (p. 353, tradução nossa). Por isso, decidimos incluir um indicador desse construto nos testes conceituais aplicados para explorar a existência ou não de alguma relação com as outras medidas realizadas.

A outra fonte de evidências utilizada no estudo foi uma rede semântica, feita com relações que os alunos construíram entre termos típicos da Acústica que eram fornecidos a eles. Para essa representação proposicional, foram oferecidas 34 caixas com termos ou pequenas sentenças (Apêndice A) que os alunos deveriam conectar com linhas, a partir do julgamento da relação proposicional que eles mesmos fizessem. Com isso, uma rede semântica estimulada era construída, composta de 34 vértices. Cada conexão feita pelos alunos representava uma associação semântica que passava a ser representada visualmente por uma aresta de rede, também chamada de grafo (Feofiloff, Kohayakawa & Wakabayashi, 2011). Com isso, cada aluno construiu um grafo individual, em papel, como uma representação proposicional do tema.

Com a finalidade de se analisar as estruturas desses grafos, todas as redes foram transformadas em matrizes de adjacência 34×34 contendo o valor 0 para caixas (ou vértices) não conectadas entre si e valor 1 para vértices conectados. As estruturas dos grafos foram analisadas a partir de suas medidas topológicas: a densidade do grafo, que é a relação entre o número de arestas existentes no grafo e o número máximo de arestas possíveis; o número de clusters, que são agrupamentos de vértices, formados no grafo – foram considerados apenas os clusters com mais de dois vértices; e o número de pontos de articulação, que são arestas que fazem interligação entre dois diferentes clusters no grafo. Todas essas medidas foram feitas a partir da matriz de adjacências, no ambiente computacional R, com o pacote *igraph* (Csardi & Nepusz, 2006).

Uma vez que estamos explorando a complexidade das relações, a emergência de eventuais organizações hierárquicas não foi considerada. Ao invés disso, preferimos observar a formação de agrupamentos (clusters) dos fragmentos de pensamento dos estudantes.

As redes de todos os alunos foram concatenadas produzindo dois grafos coletivos. Nesses grafos coletivos, os vértices foram representados tendo seu diâmetro proporcional ao seu grau, ou seja, ao número de vezes que foram conectados. E as arestas dos grafos coletivos tiveram seus pesos representados por diferentes espessuras. Se muitos alunos fizeram a mesma relação entre dois boxes (Apêndice A), a aresta, no grafo coletivo, era proporcionalmente mais espessa. Se poucos alunos fizeram uma determinada relação proposicional, a aresta no grafo coletivo era proporcionalmente menos espessa. As arestas de maior peso indicaram consensos, pois eram conectadas por vários dos estudantes. Já as arestas de menor peso indicaram idiossincrasias, pois eram conectadas por apenas alguns poucos estudantes. Foi feita também uma interpretação de todas as arestas dos grafos construídos, classificando-as como cientificamente aceitas ou não. Essa interpretação se deu pelo pesquisador e pelo orientador da pesquisa e foi apresentada em seminário interno. Então mediu-se, para cada grafo, a frequência relativa das arestas válidas.

Então, o julgamento interpretativo das arestas foi utilizado tanto nos grafos individuais quanto nos coletivos. Nos grafos individuais, cada aluno teve o cálculo da porcentagem de arestas cientificamente aceitas (que estamos chamando de conexões válidas ou de concepções não-alternativas). Já nos grafos coletivos, separamos os pesos das arestas em quartis: olhamos o quartil inferior como indicativo do conjunto de relações idiossincráticas, pois representa os 25% das arestas de menor peso; e olhamos o quartil superior, que contém os 25% das arestas de maior peso, como indicativo de consenso, por serem relações feitas sistematicamente por muitos alunos. Então, contabilizamos, tanto no quartil inferior quanto no quartil superior, a porcentagem de arestas válidas (concepções não alternativas) e a porcentagem de arestas que representariam concepções alternativas.

Separamos a análise dos resultados em dois grupos. Num deles, os dados são observados por uma estatística descritiva, como na nuvem de palavras dos mapas mentais e na divisão das arestas por quartil nos grafos coletivos. No outro grupo, os dados que geraram escores, como o traço latente de habilidade, os rankings dos emoticons de autoeficácia, as porcentagens de relações cientificamente aceitas nos grafos individuais e também as medidas estruturais dos grafos individuais, foram observados por uma estatística inferencial. A análise inferencial se deu por um processo de Análise de Componentes Principais (PCA) (Wold, Esbensen & Geladi, 1987).

A primeira parte de uma PCA é o teste Scree (Cattell, 1966). Nesse teste, são determinados quantos componentes são suficientes para explicar a maior parte da variância dos dados. O teste Scree foi feito no ambiente R, com o pacote nFactors (Raiche & Magis, 2010). Todos os componentes que apresentarem autovalor maior que 1 e que ainda tiverem autovalores maiores que os componentes aleatórios, obtidos numa análise paralela, devem ser retidos. Uma vez definido o número de componentes a serem retidos, procedeu-se a Análise de Componentes Principais (PCA) também no ambiente R, utilizando-se o pacote FactoMineR (Lê, Josse & Husson, 2008). A PCA foi feita com todos os dados referentes aos indivíduos e foi procedida tanto com os escores pré-instrução, pós-instrução e com os ganhos dados pelas diferenças pós-pré. Cada variável teve suas projeções nos componentes principais representada como vetores num plano cartesiano. Esse processo permitiu avaliarmos a existência ou não de uma dimensionalidade comum entre variáveis originadas em diferentes fontes de evidência.

Quadro 1 – Síntese das fontes de evidência e das formas de análise utilizadas no trabalho.

Instrumento	Registro	Dados	Foco	Análise
Mapas Mentais (pré/pós)	Termos evocados livremente Relações construídas livremente	Nuvem de palavras	grupo	Descritiva
Avaliação Objetiva (pré/pós)	Questões objetivas (dicotômicas)	Modelagem Rasch Parâmetro latente de habilidade	indivíduos	Inferencial (PCA)
	Emoticons por questão	Frequência por ranking Índice de senso de Auto-eficácia	indivíduos	
Redes Semânticas (pré/pós)	Termos fornecidos (Apênd. A) Relações construídas livremente	Medidas estruturais das redes - n° de clusters - densidade - n° de pontos de articulação Avaliação das relações - % das conexões válidas	indivíduos	Descritiva
	Redes concatenadas	Avaliação das relações por peso das Arestas - 1° quartil (idiosincrasias) - 4° quartil (consensos)	grupo	

Como a proposta da presente pesquisa é a utilização de múltiplas fontes de evidência, apresentamos, no Quadro 01 acima, uma síntese da estratégia metodológica do trabalho. Note-se que os dados referentes aos indivíduos foram analisados pela PCA. Isso porque a estrutura das informações, que tinham uma observação para cada aluno, permitia a análise inferencial e serviu à proposta da pesquisa que passava por explorar as relações entre as estruturas das redes semânticas e o processo de evolução conceitual dos alunos. Já os dados relativos a informações coletivas, também servem de aporte, mas por não terem uma estrutura de observação por cada aluno, preferimos, para esses dois, uma análise descritiva. Os resultados de cada uma das formas avaliativas são mostrados a seguir.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os mapas mentais eram construídos a partir de representações livres dos alunos. Isto é, os termos eram evocados a partir do repertório léxico de cada aluno e das relações que esse repertório possuía com o som e a Física do som. Verificou-se uma mudança sensível da evocação de termos associados a objetos e eventos do som, na nuvem de palavras obtida pré-instrução (Fig. 2, esq.) para a evocação de termos ligados a conceitos de Acústica, presente no vocabulário da ciência (Fig. 2, dir.).



Figura 2 – Nuvens de palavras pré e pós instrução, respectivamente à esquerda e à direita.

Observa-se que, para o grupo, a inclusão de termos ligados à física do som não ocorreu de forma cabal nem tampouco de maneira a substituir um senso de cotidianos pelo vocabulário dos profissionais da Acústica. A coexistência de concepções científicas e de concepções cotidianas reforça o senso toulmiano de uma evolução conceitual. Entretanto, a evocação notavelmente mais frequente de frequência, timbre e intensidade, é indício de que, nas Ecologias Conceituais dos estudantes, alguns elementos ligados à ciência do som se tornaram mais viáveis. As representações associadas a objetos ainda são presentes, mas agora em interação com elementos cientificamente aceitos.

Com relação aos testes objetivos, a verificação *infit* é mostrada com as elipses de 95% de intervalo de confiança (Fig. 3, sup.). No pré-teste, todos os itens foram adequados ao modelo. Mas os itens 01, 02, 03, 11 e 13 não se mostraram adequados ao modelo no pós-teste. Por isso foram rejeitados na obtenção dos parâmetros de habilidade dos alunos.

Procedida a modelagem Rasch, o mapa de parâmetros apresentou itens e alunos, numa escala logística de probabilidade. Os parâmetros de dificuldade dos itens (β) e parâmetros de habilidades dos alunos (θ) são postos na mesma régua. Na figura 3 (inf.), cada ponto representa o valor de dificuldade do item, no teste. As barras representam os valores de habilidades dos alunos e a altura de cada barra, a quantidade de alunos que teve o mesmo valor de parâmetro de habilidade. Nota-se uma migração da distribuição das habilidades dos alunos para valores acima do zero logístico. A posição zero indica habilidade média dos alunos ($\theta = 0$) ou dificuldade média dos itens ($\beta = 0$). Embora isso seja indício de evolução conceitual dos alunos, a hipótese de aumento de habilidades para o grupo foi testada com teste de Wilcoxon.

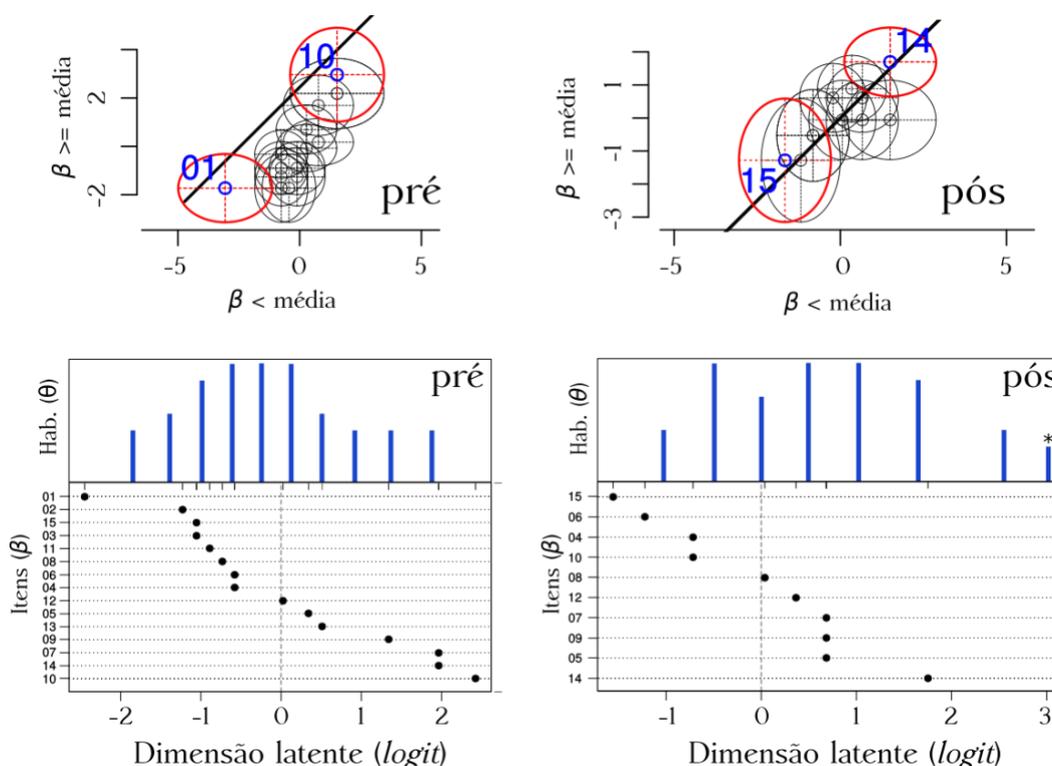


Figura 3 – Modelagem Rasch com 01 parâmetro logístico: teste *infit* (sup.) e mapa de parâmetros (inf.).

Os alunos A10 e A27 (código para omissão de identidade) assinalaram todas as questões do teste pós-instrução corretamente e por isso, não tiveram seus valores do parâmetro de habilidade (θ) computados no modelo. A título de ilustração, os parâmetros θ desses alunos foram postos como $\theta = +3$ logit e estão destacados com "*" na Figura 3 (inf.).

Via teste de Wilcoxon, pareado, rejeitou-se a hipótese de manutenção das médias dos parâmetros θ dos alunos ($V = 603$, $p < .001$), aceitando-se como hipótese alternativa o aumento de seus parâmetros de habilidade, com significância estatística. O ganho identificado para o grupo, verificado no pós-teste, associado à inclusão de termos ligados ao vocabulário científico das características do som, vista na nuvem de palavras, nos parecem indícios de inclusão de elementos no complexo da Ecologia Conceitual, após os ciclos de revisões, procedidos das atividades em sala de aula

Entretanto, por não nos parecer bastante, afirmarmos esse ganho apenas pelo traço de habilidade, pudemos observar também um ganho nos indicativos de autoeficácia dos alunos. Esse ganho pode ser visto na distribuição das frequências dos emoticons (Fig. 04), mas foi também confirmado pelo teste de Wilcoxon não pareado, com significância estatística.

As rejeições das hipóteses nulas se deram para “Bem seguro(a). Acho que sei.” com hipótese alternativa de aumento ($W = 185, p < .05$); “Resolvo, mas com alguma dúvida.” com hipótese alternativa a redução ($W = 65, p < .05$) e “Muito inseguro(a). Vou chutar.” com hipótese alternativa também de redução ($W = 57, p < .001$).

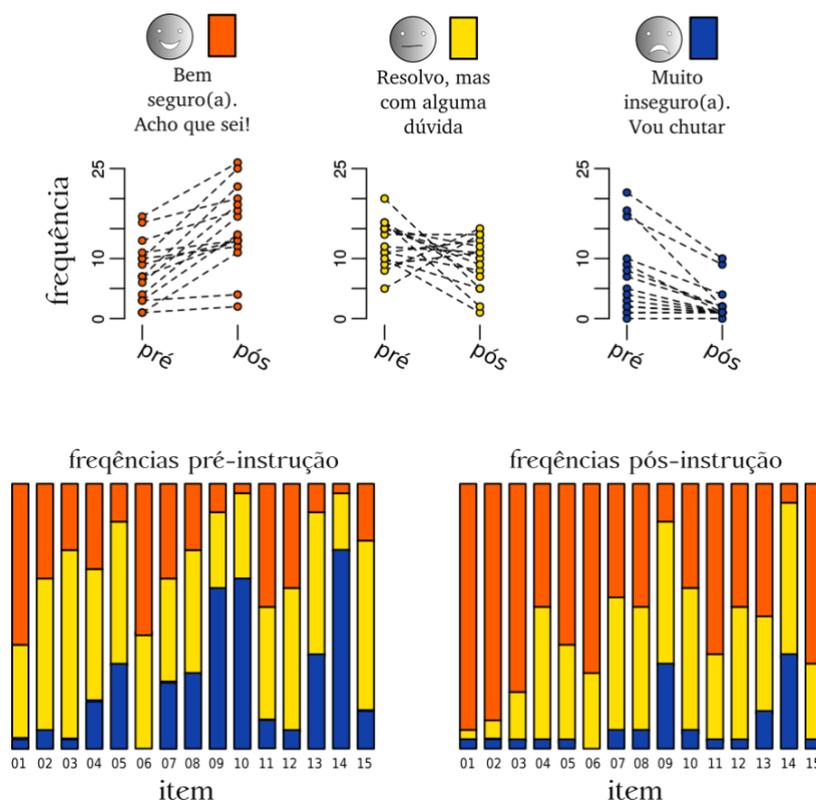


Figura 4 – Emoticons indicadores de autoeficácia: frequência por indicador (sup.) e por item do teste (inf.).

Senso de autoeficácia e desempenho escolar são reportados como positivamente correlacionados em testes de escrita (Pajares & Valiante, 1997). Os índices verificados, embora aplicados a itens de múltipla escolha, apresentam ganhos que podem estar associados a uma melhor performance nos testes. Essa proposta não apenas se corrobora em nossos resultados, mas coloca o senso declarado de autoeficácia com um papel central, conforme mostraremos à frente na PCA (Fig. 8).

As redes semânticas, diferentemente dos mapas mentais (mesmo que estes possam também ser considerados versões de redes semânticas), demandavam dos estudantes a conexão entre sentenças oferecidas. Nessa representação o que era evocado era uma relação, uma associação, mas não o elemento em si, já oferecido escrito (Apêndice A, ao final).

Para cada aluno, uma estrutura proposicional (conexionista) peculiar emergiu. Isso nos faz reconhecer a diversidade de elementos das diferentes Ecologias Conceituais, apontando-nos cautela em relação a inferências que possam ser feitas para o grupo. A título de ilustração, a rede do aluno A17, comparada pré/pós, mostrou um aumento no número de arestas evocadas ($20 \rightarrow 30$), na densidade do grafo ($3, 57 \rightarrow 5, 35$), no número de pontos de articulação ($10 \rightarrow 14$) e no número de comunidades, contabilizando apenas os clusters com mais de dois vértices ($4 \rightarrow 6$) (Fig. 5).

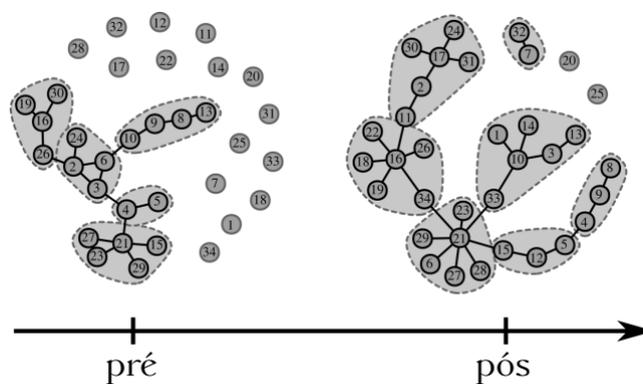


Figura 5 – Evolução estrutural da rede semântica conectada pelo aluno A17.

Embora não seja uma medida topológica, mas sim interpretativa nossa, o grafo em questão apresenta um aumento na frequência relativa de relações válidas (65% → 66,67%). Isto é, mesmo tendo abarcado mais elementos, o que poderia aumentar a possibilidade de relações ligadas a um senso comum cotidiano, houve aumento na validade das relações. O aumento nas medidas estruturais, verificado com o aluno A17, se mostrou uma tendência também para todo o grupo. Em todas as medidas realizadas, rejeitou-se a hipótese nula de manutenção dos valores medidos, tendo o aumento na categoria medida como hipótese alternativa, com significância estatística. Número de arestas ($V=314$, $p < .001$), densidade do grafo ($V=313$, $p < .001$), número de pontos de articulação ($V=248$, $p < .05$), número de clusters na rede ($V=193$, $p < .05$) e frequência relativa das conexões válidas ($V=374$, $p < .001$).

O aumento em todas as medidas estruturais indica um crescimento de complexidade das representações feitas, ao compararmos pré/pós instrução. Um indicio de enriquecimento das relações semânticas, visto nas representações proposicionais. A complexificação estrutural das redes aponta ganho na diversidade de elementos e de relações estabelecidas, corroborando a proposta de um processo complexificação na Ecologia Conceitual (diSessa, 2002).

O processo de complexificação das redes despertou interesse por explorar uma possível rede coletiva. Esse movimento implicou numa mudança de atenção das redes individuais para a representação de uma cognição coletiva, inspirada pelo trabalho de Ribeiro *et al.* (2017). Concatenamos então, todas as redes pré e todas as redes pós, conforme mostramos na Figura 6.

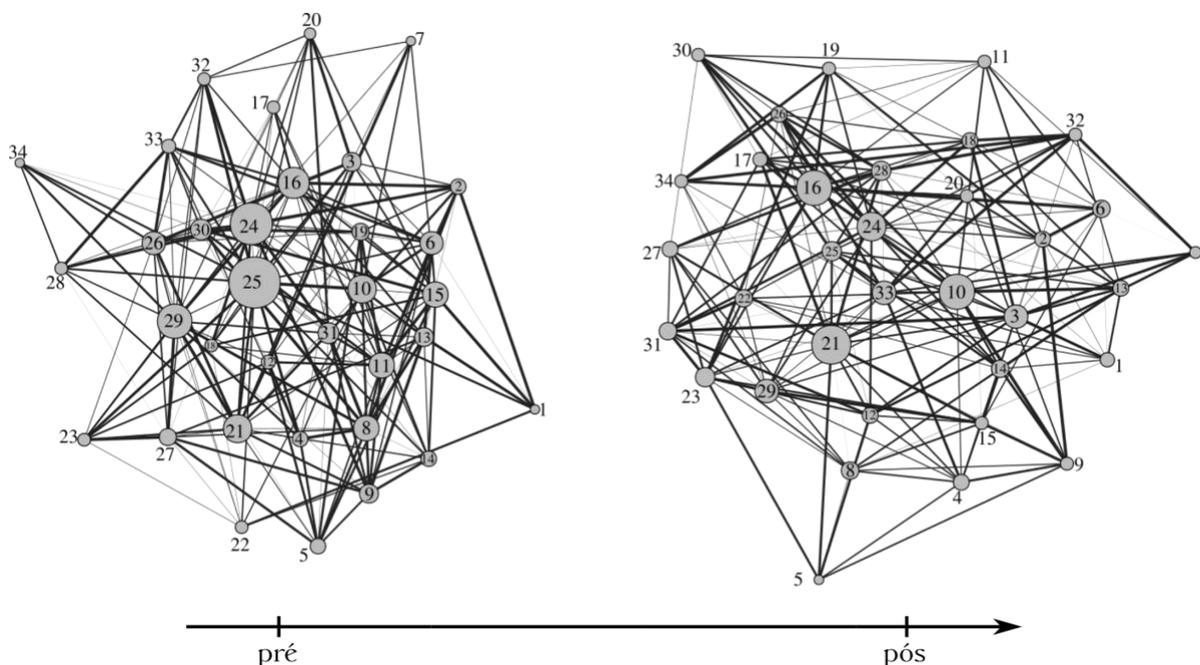


Figura 6 – Evolução estrutural da rede coletiva.

Os vértices dos grafos coletivos, mostrados na Figura 6 acima, são os boxes contendo termos utilizados em Acústica, mostrados no Apêndice A. A rede concatenada pré, tem o vértice 25 (identidade sonora) como vértice de destaque. Esse termo é mais relacionado à linguagem cotidiana do que aos conceitos típicos da Acústica. Já na rede concatenada pós, esse vértice perde centralidade, dando espaço para os vértices 21 (som mais grave), 16 (som mais agudo), 10 (timbre) e 24 (som alto). Essa mudança é semelhante à mudança vista na nuvem de palavras, que indica uma preferência a posteriori pela inclusão de termos da linguagem científico profissional do som, ou seja, de uma representação coletiva que abarca elementos da ciência.

Além da mudança topológica dos vértices, elementos do sistema, também as relações (arestas) de maior peso, os consensos, mostraram uma maior consideração pelas relações cientificamente aceitas, conforme visto na Figura 7. Idiossincriticamente essa tendência não é verificada. Esse remanescente nas relações individualizadas pode ser um indício da diversidade de concepções trazidas pelos estudantes, ligadas às realidades peculiares de cada um.

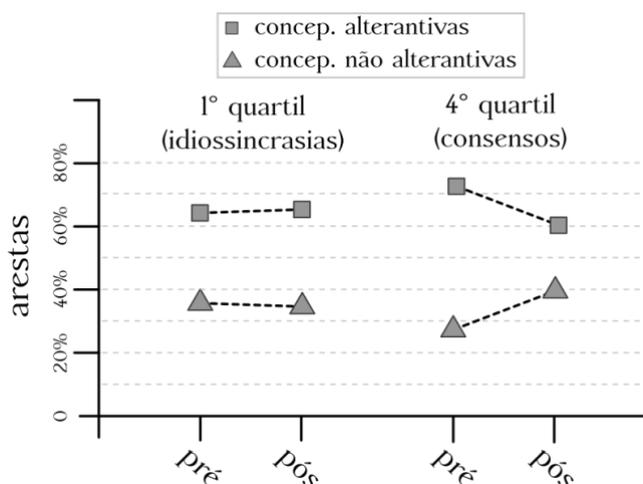


Figura 7 – Mudança nas frequências de arestas válidas com menor peso (no 1º quartil) e com maior peso (no 4º quartil).

Interpretamos esse dado por uma perspectiva escolar: as vivências na escola produzem algum tipo de consenso. Os debates, as atividades e as sucessivas iterações intelectuais criam estabilidades de significados que são compartilhadas pelo grupo. Mas os elementos em diferentes Ecologias Conceituais podem vir de experiências e/ou conhecimentos prévios muito distantes. Assim, as idiossincrasias, mesmo que não alinhadas às concepções científicas, são inevitavelmente presentes. Tais particularidades parecem ser vitais à diversidade de ideias, mantendo a complexidade dos sistemas individuais e do sistema coletivo do conhecimento e com isso, sendo tão importantes quanto a diversidade de espécies num sistema ecológico na natureza.

Na exploração de dimensionalidade comum das variáveis o teste de Scree indicou que em todos os casos, (pré, pós e ganho) dois componentes deviam ser retidos na explicação da variância dos dados (nos três casos os dois fatores retidos explicam mais de 60% da variância). As projeções das variáveis nos componentes retidos na PCA estão representadas na Figura 8.

As medidas topológicas dos grafos pré contribuem para o primeiro componente. Mas essa aglutinação já não é vista pós. Nos ganhos, o número de clusters dos grafos e as habilidades Rasch projetam no segundo componente, seguidas de uma projeção dos pontos de articulação dos grafos, no sentido oposto desse componente. Retomamos a ideia de Ecologia Conceitual para inferir que um ganho em clusters, especialmente associado ao crescimento do traço latente de habilidade, representa um aumento dos nichos de ideias. Fragmentos que se agrupam para representar fenômenos sutilmente diferentes.

O crescimento de diversidade (e de complexidade) imprime à Ecologia Conceitual um número maior de pontos de articulação, ou seja, de arestas que podem fraccionar o grafo. O sentido oposto dos pontos de articulação nos indica menor coesão (menor robustez) com o aumento da complexidade.

Chama a atenção a sobreposição dos parâmetros de habilidades Rasch e as porcentagens de conexões válidas. A primeira advém de um modelo logístico de probabilidade e a segunda decorre da

interpretação dos pesquisadores acerca das relações proposicionais. As duas variáveis num mesmo componente indicam que as associações de termos, aceitas pela comunidade científica, se apresentam tanto nas habilidades latentes quanto nas representações proposicionais. Tal resultado sugere uma possibilidade de avaliação a partir das representações e não necessariamente a partir dos testes tradicionais, uma vez que ambas estão representadas pelo mesmo componente latente encontrado na PCA.

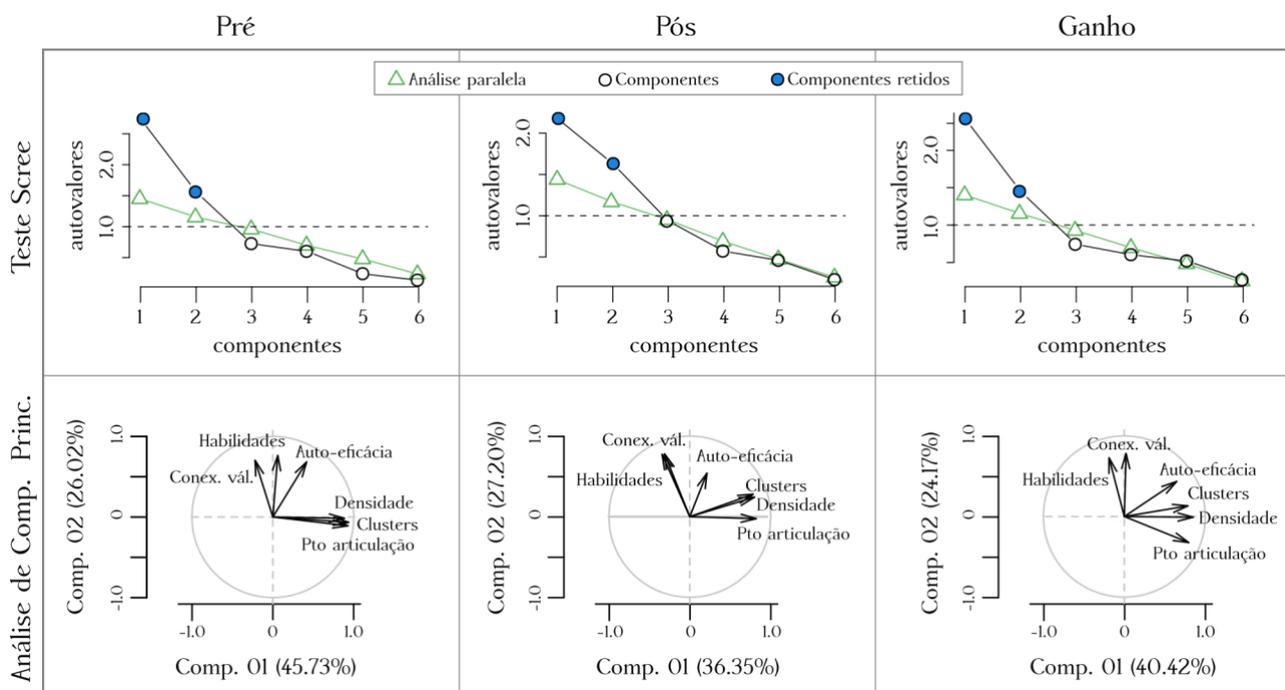


Figura 8 – Acima, o teste Scree para determinação do número de fatores a reter. Abaixo, o diagrama das variáveis de pesquisa, projetadas nos componentes retidos.

As medidas topológicas dos grafos pré contribuem fortemente para o primeiro componente. Mas essa aglutinação já não é vista no grafo pós, onde clusters e densidade já apresentam também projeção no segundo componente. Nos ganhos, o número de clusters dos grafos e as habilidades Rasch projetam no segundo componente, seguidas de uma projeção dos pontos de articulação dos grafos, no sentido oposto desse componente. Retomamos a ideia de Ecologia Conceitual para inferir que um ganho em clusters, especialmente associado ao crescimento do traço latente de habilidade, representa um aumento dos nichos de ideias. Fragmentos que se agrupam para representar fenômenos sutilmente diferentes.

O crescimento de diversidade (e de complexidade) imprime à Ecologia Conceitual um número maior de pontos de articulação, ou seja, de arestas que podem fraccionar o grafo. O sentido oposto dos pontos de articulação nos indica menor coesão (menor robustez) com o aumento da complexidade.

A posição da variável de ganho de autoeficácia intriga e interessa. Em todas as projeções, a autoeficácia se apresenta como contribuinte dos dois componentes. Isso parece estender os resultados reportados em outros trabalhos (Medeiros *et al.*, 2000) para além da performance escolar, perpassando também a performance representacional na rede de associações semânticas. A variável associada à autoeficácia é obtida pelas declarações dos alunos. Essa variável cresce tanto com as habilidades quanto com a topologia das representações proposicionais. Isso nos mostra que, durante a evolução conceitual dos estudantes – vista tanto nas medidas topológicas das redes como na performance nos testes –, os alunos se sentem mais confiantes em lidar com as demandas escolares.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Resgatando a pergunta de pesquisa *Como se relacionam as estruturas das diferentes representações proposicionais (mapas mentais e redes semânticas) e a performance dos estudantes (habilidade latente e senso de autoeficácia), no processo de evolução conceitual em Acústica?*, pudemos mostrar que o traço latente de habilidade nos testes e a porcentagem de conexões cientificamente aceitas crescem positivamente correlacionados na Análise de Componentes Principais em todos os cenários. Vimos

também que as representações proposicionais na forma de redes semânticas se apresentaram como potenciais ferramentas para acesso às Ecologias Conceituais dos estudantes.

Se, de um lado, orientados pela teoria, indicamos duas vertentes de pensamento da Mudança Conceitual e nos afiliamos àquela que trata de um processo evolutivo, no sistema complexo do conhecimento, de outro lado, orientados pelos dados, vimos que nas representações proposicionais livres, os termos do vocabulário da ciência, para o tema, foram incluídos de maneira incremental, e não disruptiva, no repertório léxico dos alunos. Numa comparação pós/pré instrução, as representações proposicionais, estimuladas pelos termos e sentenças presentes nos boxes (Apênd. A), ficaram estruturalmente mais complexas e com mais relações válidas, especialmente nas conexões que eram compartilhadas por muitos dos alunos. Isso acontecia à medida que os estudantes demonstravam uma maior habilidade em testes e se declaravam mais seguros ao fazê-lo.

Além de corroborar nosso aporte teórico, os resultados apresentados sugerem que as representações podem ser utilizadas como alternativas para avaliação. Mas vemos que isso demanda, naturalmente, um cuidado: a complexidade do sistema de ideias dos alunos (vista nas redes semânticas) nos afasta das padronizações instantâneas e de uma forma de aprender uniformizada.

No curso do ensino, muitas vezes ignoramos as idiosincrasias ou as reprovamos com o carimbo de incorretas. Mas, quando o fazemos, assumimos o risco de reduzir o ensino a um processo no qual os alunos limpariam das suas caixas de ideias aquilo que representa uma concepção alternativa (saí o erro) para abraçar um aprendizado da ciência dos cientistas (fica o acerto). Entretanto os resultados aqui apresentados rejeitam essa ruptura, essa troca do incorreto pelo correto e mostram – ao menos para o grupo estudado e com os instrumentos de pesquisa utilizados – que os estudantes viabilizam as concepções cientificamente aceitas em suas Ecologias Conceituais paulatinamente, de incremento em incremento.

Retomando a ideia toulmiana de variantes intelectuais em competição no complexo ecológico do conhecimento, podemos refletir sobre como sistemas ecológicos pouco diversos são frágeis. Frágeis seriam também os sistemas de conhecimento cujas Ecologias Conceituais fossem idênticas ou uniformizadas. Seriam como monoculturas imperando sobre a diversidade, o que cercearia a criatividade e a possibilidade de avanço do conhecimento humano. Mas num outro extremo, nos é claro que a complexificação absoluta, sem nenhuma sistematização, também dificulta tal avanço.

Mantemos as duas ressalvas acima reforçando que cada um dos resultados apresentados aponta para uma Mudança Conceitual mais assemelhada a uma evolução incremental no sistema complexo de associações, construindo consensos em torno do tema trabalhado, mas também conservando idiosincrasias inerentes à diversidade de pensamentos. E isso se afasta daquela (criticada) versão desta teoria que tanto se popularizou nas décadas de 80 e 90. Nem rupturas estruturais dramáticas nem tampouco incomensurabilidades pós versus pré foram detectadas nas representações dos alunos.

As limitações deste trabalho pairam sobre duas incertezas em relação às redes semânticas. A primeira, se os vértices utilizados cobrem adequadamente o repertório representacional dos alunos. E a segunda, se as medidas topológicas escolhidas representam adequadamente a estrutura das associações dos mesmos. Mas isso não torna os resultados empíricos que observamos menos animadores. Todavia, aponta para uma ampliação de estudos sobre estruturas representacionais, incluindo novas formas de semear vértices da rede semântica e de medir sua estrutura.

O avanço dos estudos de redes, visto em publicações de impacto global (e.g. Gao, Barzel & Barabási, 2016) mostra que a ciência das redes (a Network Science) se expande e se consolida como programa de pesquisa interdisciplinar, com aplicações em múltiplos sistemas reais. Suas ferramentas podem contribuir em muito para avanços no entendimento das evoluções conceituais no aprendizado de ciências. Este campo de estudos é como uma porta ainda se abrindo e que vem desvelando resultados promissores.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos aos estudantes que se dispuseram a ser sujeitos de pesquisa deste trabalho. Ainda, a G. R. Coelho e M. Pietrocola por importantes sugestões e comentários dados a versões anteriores deste trabalho. Também às instituições que viabilizaram a presente pesquisa. À Sociedade Brasileira de Física (SBF), ao Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Programa de Pós-graduação em Ensino de

Física da Universidade Federal do Espírito Santo (PPGE nFís) e à Faculdade de Educação da Universidade de São Paulo (FEUSP).

REFERÊNCIAS

- Ariza, R. P., & Harres, J. B. S. (2002). A epistemologia evolucionista de Stephen Toulmin e o ensino de ciências. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 19(n. esp.), 70-83.
- Azevedo, F., diSessa, A. A., & Sherin, B. (2012). An evolving framework for describing student engagement in classroom activities. *The Journal of Mathematical Behavior*, 31(2), 270-289. DOI: [10.1016/j.jmathb.2011.12.003](https://doi.org/10.1016/j.jmathb.2011.12.003).
- Campbell, D. T., & Stanley, J. C. (1963). Experimental and quasi-experimental designs for research on teaching. In N. L. Gage (Ed.), *Handbook of research on teaching* (pp. 171-246). Chicago: Rand McNally. Recuperado de https://wagner.nyu.edu/files/doctoral/Campbell_and_Stanley_Chapter_5.pdf
- Cattell, R. B. (1966). The Scree test for the number of factors. *Multivariate behavioral research*, 1(2), 245-276. DOI: [10.1207/s15327906mbr0102_10](https://doi.org/10.1207/s15327906mbr0102_10)
- Cicuto, C. A. T., & Correia, P. R. M. (2012). Análise de vizinhança: uma nova abordagem para avaliar a rede proposicional de mapas conceituais. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 34(1), 1-10. Recuperado de <http://www.scielo.br/pdf/rbef/v34n1/v34n1a12>
- Correia, P. R., & Aguiar, J. G. (2017). Avaliação da proficiência em mapeamento conceitual a partir da análise estrutural da rede proposicional. *Ciência & Educação (Bauru)*, 23(1), 71-90. DOI: [10.1590/1516-731320170010005](https://doi.org/10.1590/1516-731320170010005)
- Csardi, G., & Nepusz, T. (2006). The igraph software package for complex network research. *InterJournal, Complex Systems*, 1695, 1-9. Recuperado de <http://www.necsi.edu/events/iccs6/papers/c1602a3c126ba822d0bc4293371c.pdf>
- Dias, P., & Meneses, M. I. C. (1993). Problemática da representação em hipertexto. *Revista Portuguesa de Educação*, 6(3), 83-91. Recuperado de <https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/524/1/1993%2c6%283%29%2c83-92%28PauloDias%29.pdf>
- diSessa, A. A. (1993). Toward an epistemology of physics. *Cognition and instruction*, 10(2-3), 105-225. DOI: [10.1080/07370008.1985.9649008](https://doi.org/10.1080/07370008.1985.9649008)
- diSessa, A. A. (2002). Why “conceptual ecology” is a good idea. In M. Limón & L. Mason (Eds.), *Reconsidering conceptual change: Issues in theory and practice* (pp. 28-60). Dordrecht: Springer. DOI: [10.1007/0-306-47637-1_2](https://doi.org/10.1007/0-306-47637-1_2)
- Feofiloff, P., Kohayakawa, Y., & Wakabayashi Y. (2011). Uma introdução sucinta à teoria dos grafos. Recuperado de www.ime.usp.br/~pf/teoriadosgrafos/
- Fischer, F., Bruhn, J., Gräsel, C., & Mandl, H. (2002). Fostering collaborative knowledge construction with visualization tools. *Learning and Instruction*, 12(2), 213-232. DOI: [10.1016/S0959-4752\(01\)00005-6](https://doi.org/10.1016/S0959-4752(01)00005-6)
- Gao, J., Barzel, B., & Barabási, A. L. (2016). Universal resilience patterns in complex networks. *Nature*, 530(7590), 307-312. Recuperado de <https://www.nature.com/articles/nature16948> .
- Golino, H. F., & Gomes, C. M. (2015). Modelo logístico simples de Rasch para dados dicotômicos. In H. F. Golino, C. M. Gomes, A. Amantes & G. Coelho (Eds.), *Psicometria Contemporânea: Compreendendo os modelos Rasch* (pp. 109-145). São Paulo: Casa do Psicólogo.
- Gomes, F. H. F., Caetano, E. W. S., & Alves, F. R. V. (2017). O uso de mapas conceituais no ensino de Física. *#Tear: Revista de Educação, Ciência e Tecnologia*, 6(1), 1-17. Recuperado de <https://periodicos.ifrs.edu.br/index.php/tear/article/view/2046/1547> .

- Gouveia, D. D. S. M., & Silva, A. M. T. B. D. (2015). A formação educacional na EJA: dilemas e representações sociais. *Ensaio Pesquisa em Educação em Ciências (Belo Horizonte)*, 17(3), 749-767. DOI: [10.1590/1983-21172015170310](https://doi.org/10.1590/1983-21172015170310).
- Hewitt, P. G. (2002). *Física conceitual*. Porto Alegre: Bookman.
- Jonassen, D. H. (1990). *Semantic network elicitation: tools for structuring hypertext*. In R. McAleese, & C. Green (Eds.), *Hypertext: State of the Art* (pp. 142-152). Oxford: Intellect Books.
- Karino, C. A., & Andrade, D. F. (2011). Entenda a Teoria de Respostas ao Item (TRI), utilizada no Enem. Recuperado de http://download.inep.gov.br/educacao_basica/enem/nota_tecnica/2011/nota_tecnica_tri.pdf.
- Kinchin, I. M., & Hay, D. B. (2007). The myth of the research-led teacher. *Teachers and Teaching: theory and practice*, 13(1), 43-61. DOI: [10.1080/13540600601106054](https://doi.org/10.1080/13540600601106054).
- Köse, S. (2008). Diagnosing student misconceptions: Using drawings as a research method. *World Applied Sciences Journal*, 3(2), 283-293. Recuperado de <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.388.382&rep=rep1&type=pdf>.
- Kuhn, T. S. (1962). *The structure of scientific revolutions*. Chicago: University of Chicago Press.
- Lakatos, I. (1968). Criticism and the methodology of scientific research programmes. In: *Proceedings of the Aristotelian society*, 69, 149-186. Recuperado de <https://www.jstor.org/stable/4544774>
- Larkin, J., McDermott, J., Simon, D. P., & Simon, H. A. (1980). Expert and novice performance in solving physics problems. *Science*, 208(4450), 1335-1342. DOI: [10.1126/science.208.4450.1335](https://doi.org/10.1126/science.208.4450.1335)
- Lê, S., Josse, J., & Husson, F. (2008). FactoMineR: an R package for multivariate analysis 1.3.2. *Journal of Statistical Software*, 25(1), 1-18. DOI: [10.18637/jss.v025.i01](https://doi.org/10.18637/jss.v025.i01)
- Mair, P., Hatzinger, R., & Maier, M. J. (2015). eRm: Extended Rasch Modeling 0.15-5. Recuperado de <http://erm.r-forge.r-project.org/>
- Medeiros, P. C., Loureiro, S. R., Linhares, M. B. M., & Marturano, E. M. (2000). A auto-eficácia e os aspectos comportamentais de crianças com dificuldade de aprendizagem. *Psicologia: Reflexão e Crítica*, 13(3), 327-336. Recuperado de <http://www.scielo.br/pdf/%0D/prc/v13n3/v13n3a02.pdf>
- Minstrell, J. (1992). Facets of students' knowledge and relevant instruction. In R. Duit, F. Goldberg, & H. Niedderer (Eds.), *Research in physics learning: Theoretical issues and empirical studies* (pp. 110-128). Kiel: IPN.
- Mortimer, E. F. (1995). Conceptual change or conceptual profile change? *Science & Education*, 4(3), 267-285. DOI: [10.1007/BF00486624](https://doi.org/10.1007/BF00486624)
- Skak, J. D. (1990). Concept mapping: A useful tool for science education. *Journal of Research in Science Teaching*, 27(10), 937-949. DOI: [10.1002/tea.3660271003](https://doi.org/10.1002/tea.3660271003).
- Pajares, F., & Valiante, G. (1997). Influence of self-efficacy on elementary students' writing. *The Journal of Educational Research*, 90(6), 353-360. DOI: [10.1080/00220671.1997.10544593](https://doi.org/10.1080/00220671.1997.10544593).
- Posner, G. J., Strike, K. A., Hewson, P. W., & Gertzog, W. A. (1982). Accommodation of a scientific conception: Toward a theory of conceptual change. *Science Education*, 66(2), 211-227. DOI: [10.1002/sce.3730660207](https://doi.org/10.1002/sce.3730660207)
- R - Core Team. (2008). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. Recuperado de <http://www.R-project.org>
- Raiche, G., & Magis, D. (2010). *nfactors: Parallel Analysis and Non Graphical Solutions to the Cattell Scree Test 2.3.3*. Recuperado de <https://cran.r-project.org/web/packages/nFactors/index.html>
- Rasch, G. (1960). *Studies in mathematical psychology: Probabilistic models for some intelligence and attainment tests*. Oxford: Nielsen & Lydiche.

- Reis, N. A., & Silva, E. L. (2015). Estrutura da matéria: buscando discutir história da ciência e mapas conceituais no ensino superior. *Scientia Plena*, 11(6), 1-11. Recuperado de <https://scientiaplenu.org.br/sp/article/view/2514> .
- Ribeiro, T. L., de Oliveira, M. A. F., Martins, Á. K. L., Vilela, A. B. A., Martins Filho, I. E., Franklin, T. A., ... & Lopes, C. R. (2017). Representational comparisons of health education for alcoholics: a study of anco-networks. *International Archives of Medicine*, 10, 1-8. DOI: [10.3823/2336](https://doi.org/10.3823/2336) .
- Rodrigues, E. V. (2016). Atividades para o aprendizado de Acústica. Dissertação de Mestrado. Recuperado de <http://repositorio.ufes.br/handle/10/7534>
- Rodrigues, E. V., & Camiletti, G. G. (2017). Análise de Redes como ferramenta exploratória da Ecologia Conceitual em um tópico da Física. In *Atas do XI Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências*. (p. 1-10). Florianópolis, SC, Brasil. Recuperado de <http://www.abrapecnet.org.br/enpec/xi-enpec/anais/resumos/R0874-1.pdf>
- Schnotz, W., & Bannert, M. (2003). Construction and interference in learning from multiple representation. *Learning and instruction*, 13(2), 141-156. DOI: [10.1016/S0959-4752\(02\)00017-8](https://doi.org/10.1016/S0959-4752(02)00017-8)
- Strike, K. A., & Posner, G. J. (1992). A revisionist theory of conceptual change. In R. A. Duschl, & R. J. Hamilton (Eds.), *Philosophy of science, cognitive psychology, and educational theory and practice* (pp. 147-176). Albany: State University of New York Press.
- Toulmin, S. E. (1967). The evolutionary development of natural science. *American Scientist*, 55(4), 456-471. Recuperado de <https://www.jstor.org/stable/27837039> .
- Wilcoxon, F. (1945). Individual comparisons by ranking methods. *Biometrics bulletin*, 1(6), 80-83. DOI: [10.2307/3001968](https://doi.org/10.2307/3001968)
- Wold, S., Esbensen, K., & Geladi, P. (1987). Principal component analysis. *Chemometrics and intelligent laboratory systems*, 2(1-3), 37-52. DOI: [10.1016/0169-7439\(87\)80084-9](https://doi.org/10.1016/0169-7439(87)80084-9)
- Zigomatic (2015). Wordcloud: Free online Wordcloud generator. Recuperado de <http://www.wordclouds.com/>

Recebido em: 01.12.2017

Aceito em: 13.08.2018

APÊNDICE A

Boxes utilizados como vértices da rede semântica que os estudantes conectaram a partir da proximidade de significados. Os números foram utilizados como código a posteriori e não foram mostrados para os estudantes.

